

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**


# **Известия**

**Юго-Западного  
государственного университета**

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

**Научный журнал**

Том 12 № 4 / 2022



# **Proceedings**

**of the Southwest  
State University**

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

**Scientific Journal**

Vol. 12 № 4 / 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:

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

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

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

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

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

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

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

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Учредитель и издатель:**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**

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

**Телефон:** +7(4712) 22-25-26,

**Факс:** +7(4712) 50-48-00.

**E-mail:** rio\_kursk@mail.ru

**Наименование органа, зарегистрировавшего издание:**

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

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 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. А. Леоновой

Подписано в печать 22.12.2022. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 30.12.2022.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,3.

Тираж 1000 экз. Заказ 82.

16+



**Proceedings of the Southwest State University.**  
**Series: Control, Computer Engineering,**  
**Information Science. Medical Instruments Engineering**

Peer-reviewed scientific journal

Published since 2011

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

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

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

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

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

**EDITOR-IN-CHIEF**

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

**DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF**

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

**EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Vitaly S. Titov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,  
Southwest State University (Kursk, Russia)

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

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

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

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

**Founder and Publisher:**

“Southwest State University”

**Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:**

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

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

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

**E-mail:** rio\_kursk@mail.ru

**The Journal is officially registered by:**

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,  
Information Technology and Mass media  
(PI №FS77-82285 of 23.11.2021).

**ISSN** 2223-1536 (Print)

**DOI Prefix:** 10.21869

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

**Printing office:**

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str., 94,

Kursk 305040, Russian Federation

**Subscription and distribution:**

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 44288

in the General Catalogue “Pressa Rossii”

**Frequency:** Quarterly

**Free price**

Original lay-out design: O. A. Leonova

16+

© Southwest State University, 2022



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

Signed for printing 22.12.2022. Format 60x84/8.

Release date 30.12.2022.

Offset paper. Printer's sheets: 22,3.

Circulation 1000 copies. Order 82.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ .....</b>	<b>8</b>
Оригинальные статьи	
Программное обеспечение для тромбоэластографа «НПТЭГ Меднорд».....	8
<i>Слизевич Д. С., Губарев Ф. А., Жуков Е. Л.</i>	
<b>МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....</b>	<b>23</b>
Оригинальные статьи	
Разработка структуры генератора сверх низкоинтенсивных микроволновых, биомодулированных излучений для экспериментальных медико-биологических исследований.....	23
<i>Евтушенко Н. Д., Пятакович Ф. А., Якунченко Т. И., Артамонов М. Ю.</i>	
Метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга источников радиоизлучения с квадратурной амплитудной модуляцией спутниковых систем связи.....	41
<i>Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Бабанина Е. Ю., Хмелевская А. В.</i>	
<b>РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ .....</b>	<b>64</b>
Оригинальные статьи	
Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов.....	64
<i>Филист С. А., Томакова Р. А., Нефедов Н. Г., Пузырев Е. И., Горбачев И. Н.</i>	
<b>СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ .....</b>	<b>86</b>
Оригинальные статьи	
Нетрадиционное растительное сырье в пищевых системах функционального назначения .....	86
<i>Завидовская К. В., Алиева Д. А., Лазурина Л. П., Доценко Ю. М., Джанчатова Н. В., Басарева О. И.</i>	
Концепция создания и разработки комплексного метода оценки опасности лесных пожаров на населенные пункты.....	102
<i>Назаров С. А., Волошенко А. А., Шипицын С. А., Шевцов М. В.</i>	
Способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными БПЛА .....	122
<i>Хмелевская А. В., Севрюков А. А., Севрюков А. Е., Бабанин И. Г., Бабанина Е. Ю.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ .....</b>	<b>142</b>
Оригинальные статьи	
Моделирование и реализация онлайн-сервиса для поиска попутчиков для междугородних поездок .....	142
<i>Малышев А. В., Пигарева Н. А., Конаныхина Т. Н., Заикин Я. О.</i>	
Математические модели ранней диагностики и прогнозирования нейротоксикоза у рабочих сварочного производства.....	162
<i>Григорьев И. Ю., Будневский А. В.</i>	
Модель обработки информации в коэффициентной обратной задаче для алгебраического многочлена.....	177
<i>Локтионов А. П.</i>	
<b>К сведению авторов .....</b>	<b>192</b>

## CONTENT

<b>INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS .....</b>	<b>8</b>
Original articles	
Software for Thromboelastograph "NPTEG Mednord" .....	8
<i>Slizevich D. S., Gubarev F. A., Zukov E. L.</i>	
<b>MECHATRONICS, ROBOTICS .....</b>	<b>23</b>
Original articles	
Development of the Structure of a Generator of Superlowintensity Microwave Biomodulated Radiations for Experimental Medical-Biological Research .....	23
<i>Evtushenko N. D., Pyatakovich F. A., Yakunchenko T. I., Artamonov M. Yu.</i>	
Method of Parametric Synthesis of Systems for Providing Electromagnetic Access for Radio Monitoring Facilities of Radio Emission Sources with Quadrature Amplitude Modulation of Satellite Communication Systems .....	41
<i>Babanin I. G., Mukhin I. E., Babanina E. Yu., Khmelevskaya A. V.</i>	
<b>IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING .....</b>	<b>64</b>
Original articles	
Intelligent Image Processing System Obtained from Unmanned Aerial Vehicles .....	64
<i>Filist S. A., Tomakova R. A., Nefedov N. G., Puzyrev I. E., Gorbachev I. N.</i>	
<b>SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING .....</b>	<b>86</b>
Original articles	
On the Practical Application of Non-Traditional Plant Raw Materials in Food Systems .....	86
<i>Zavidovskaya K. V., Alieva D. A., Lazurina L. P., Dotsenko Y. M., Dzhanchatova N. V., Basareva O. I.</i>	
The Concept of Creating and Developing an Integrated Method for Assessing the Risk of Forest Fires on Human Settlements.....	102
<i>Nazarov S. A., Voloshenko A. A., Shipitsyn S. A., Shevtsov M. V.</i>	
Method for Implementing Cryptographic Protection of Channels to Organize Communication via MAVLink Protocol when Control of Autonomous UAVS .....	122
<i>Khmelevskaya A. V., Sevryukov A. A., Sevryukov A. E., Babanin I. G., Babanina E. Yu.</i>	
<b>MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS .....</b>	<b>142</b>
Original articles	
Modeling and Implementation of an Online Service for Finding Travel Companions for Long-Distance Trips .....	142
<i>Malyshev A. V., Pigareva N. A., Konanykhina T. N., Zaikin Ya. O.</i>	
Mathematical Models of Early Diagnosis and Prediction of Neurotoxicosis in Welding Workers .....	162
<i>Grigorov I. Yu., Budnevsky A. V.</i>	
Information Processing Model in the Coefficient Inverse Problem for an Algebraic Polynomial.....	177
<i>Loktionov A. P.</i>	
<b>Information for Authors .....</b>	<b>192</b>

### Программное обеспечение для тромбозагрофа «НПТЭГ Меднорд»

Д. С. Слизович<sup>1,2</sup>, Ф. А. Губарев<sup>3</sup> ✉, Е. Л. Жуков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
ул. Усова 155, г. Томск 634050, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Меднорд-Техника»  
ул. Белинского 38, г. Томск 634029, Российская Федерация

<sup>3</sup> Севастопольский государственный университет  
ул. Университетская 31, г. Севастополь 299053, Российская Федерация

✉ e-mail: gubarevfa@tpu.ru

#### Резюме

**Целью исследования** явилась разработка программного обеспечения (ПО) для аппаратно-программного комплекса низкочастотной пьезотромбозагрографии «НПТЭГ Меднорд», предназначенного для прикроватной оценки функционального состояния системы гемостаза с использованием нативной крови пациента (исследования цельной крови в режиме Point-of-care test).

**Методы.** Разработка программного обеспечения (ПО) комплекса состояла из ПО для микроконтроллера аппарата и пользовательского ПО. В материалах статьи приводятся результаты разработки алгоритмов обработки данных и разработки программного обеспечения для аппаратно-программного комплекса низкочастотной пьезотромбозагрографии «НПТЭГ Меднорд». Рассматриваются основные программные решения по сбору и обработке данных с пьезоэлектрического датчика, регистрирующего изменение агрегатного состояния нативной венозной крови.

**Результаты.** Приведен пример управляющей команды, предназначенный для связи аппаратной и программных частей комплекса. Основное внимание в статье уделено программному обеспечению для персонального компьютера, осуществляющему управление аппаратной частью, обработку первичных данных, отображение кривой процесса свертывания крови в режиме реального времени (изменение вязкости сгустка во времени), получение реперных точек, выбор расчётных параметров. Представлен интерфейс разработанного приложения с указанием основных вкладок, необходимых для работы врачей. Проведена оценка сосудистотромбоцитарного гемостаза у условно здоровых добровольцев сибирской популяции в режиме реального времени с использованием пьезотромбозагрографа «НПТЭГ Меднорд» с разработанным программным обеспечением. Выполнен корреляционный анализ выбранных параметров низкочастотной пьезотромбозагрограммы с существующими методами исследования системы гемостаза.

**Заключение.** Разработанное программное обеспечение «Гемо-5» предназначено для работы в составе аппаратно-программного комплекса «НПТЭГ Меднорд», зарегистрировано как медицинское изделие (№ РЗН 2020/12855). В состав ПО комплекса входят: ПО микроконтроллера, пользовательская часть, СУБД. ПО аппаратно-программного комплекса позволяет оценивать 21 параметр системы гемостаза, в том числе вести непрерывный мониторинг состояния системы гемостаза (on-line).



**Ключевые слова:** гемостаз; тромбоэластография; программное обеспечение; автоматизация; медицинское приборостроение.

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

**Для цитирования:** Слизевич Д. С., Губарев Ф. А., Жуков Е. Л. Программное обеспечение для тромбоэластографа «НПТЭГ Меднорд» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 8–22. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-8-22>.

Поступила в редакцию 04.10.2022

Подписана в печать 02.11.2022

Опубликована 22.12.2022

## Software for Thromboelastograph "NPTEG Mednord"

Dmitry S. Slizevich<sup>1,2</sup>, Fedor A. Gubarev<sup>3</sup> ✉, Egor L. Zukov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Tomsk Polytechnic University  
155 Usova Str., Tomsk 634050, Russian Federation

<sup>2</sup> Mednord-Tekhnika LLC  
38 Belinsky Str., Tomsk 364029, Russian Federation

<sup>3</sup> Sevastopol State University  
31 Universitetskaya Str., Sevastopol 299053, Russian Federation

✉ e-mail: gubarevfa@tpu.ru

### Abstract

**The purpose of research** was to develop software for the hardware and software complex of low-frequency piezothromboelastography "NPTEG Mednord", designed for bedside assessment of the functional state of the hemostasis system using the patient's native blood (whole blood studies in Point-of-care test mode).

**Methods.** The software development of the complex consisted of software for the microcontroller of the device and user software. The article presents the results of the development of algorithms for data processing and software development for the hardware and software complex of low-frequency piezothromboelastography "NPTEG Mednord". The main software solutions for collecting and processing data from a piezoelectric sensor that registers changes in the aggregate state of native venous blood are considered.

**Results.** An example of a control command designed to link the hardware and software parts of the complex is given. The main attention in the article is paid to the software for a personal computer that controls the hardware, processes primary data, displays the curve of the blood clotting process in real time (changes in the viscosity of the clot over time), obtaining reference points, and selecting design parameters. The interface of the developed application is presented, indicating the main tabs necessary for the work of doctors. Vascular-platelet hemostasis was assessed in conditionally healthy volunteers of the Siberian population in real time using a piezothromboelastograph "NPTEG Mednord" with the developed software. A correlation analysis of the selected parameters of a low-frequency piezothromboelastogram with existing methods of studying the hemostasis system was performed.

**Conclusion.** The developed software "Gemo-5" is designed to work as part of the hardware and software complex "NPTEG Mednord", registered as a medical device (No. RZN 2020/12855). The software of the complex includes: microcontroller software, user part, DBMS. The software of the hardware and software complex allows you to evaluate 21 parameters of the hemostasis system, including continuous monitoring of the state of the hemostasis system (on-line).

**Keywords:** hemostasis; thromboelastography; software; automation; medical instrumentation.

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

**For citation:** Slizevich D. S., Gubarev F. A., Zukov E. L. Software for Thromboelastograph "NPTEG Mednord". *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(4): 8–22. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2022-12-4-8-22](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-8-22).

Received 04.10.2022

Accepted 02.11.2022

Published 22.12.2022

\*\*\*

## Введение

Система гемостаза является связующей системой всего организма человека. Тромбогеморрагические осложнения сопровождают практически любое заболевание (инсульты, инфаркты, хирургические вмешательства и т. д.) и требуют противотромботической терапии, важнейшую роль в которой играют антиагреганты, доза и назначение которых зависит от индивидуальных особенностей организма [1; 2].

В условиях борьбы с инфекциями применение комплексной оценки состояния системы гемостаза является необходимым в связи с использованием в терапии противовоспалительных препаратов, антикоагулянтов, антиагрегантов, которые влияют на агрегационную активность тромбоцитов и вызывают резкую гипокоагуляцию. Не является исключением и новая короновирусная инфекция [3; 4].

Традиционно применяемые клоттинговые методы: АЧТВ, протромбиновое время, МНО, определение количества тромбоцитов, D-димер и т. д. – не позволяют оценить глубину расстройства системы гемостаза и не дают полной картины протекания заболевания, особенно в динамике [5; 6]. Глобальные

тесты имеют ряд преимуществ по сравнению с клоттинговыми тестами [7; 8; 9]. При работе с цельной кровью анализ начинается сразу после забора крови с образцом, содержащим все компоненты, которые присутствуют в кровотоке во время забора крови (эндотелий, факторы свертывания крови, ингибиторы / активаторы гемостаза и фибринолиза и т. д.) и влияют на процесс коагуляции. При этом регистрируется полный цикл фибриногенеза в условиях стандартизированной контактной активации.

Вязкие свойства крови изменяются при изменении ее агрегатного состояния, и графическое представление изменения этих свойств в режиме реального времени важно для последующей оценки состояния системы гемостаза и принятия решений относительно тактики лечения. В нашей работе [10] представлены результаты разработки аппаратно-программного комплекса для кроватной оценки функционального состояния системы гемостаза на основе метода пьезотромбоэластографии, которые легли в основу прибора НПТЭГ «Меднорд» компании ООО «Меднорд-Техника» (№ РЗН 2020/12855). Рассмотрено построение функциональной схемы прибора и его блоков, однако не рассмотрено построение программной части.

Целью данной работы является рассмотрение программной части прибора НПТЭГ «Меднорд» в следующих аспектах:

- прием и обработка сигнала с пьезодатчика;
- управление аппаратной частью;
- разработка алгоритма расчета параметров;
- разработка пользовательского интерфейса.

### Материалы и методы

Рассмотрим структурную схему автоматизированной системы для исследования свёртывания крови (рис. 1). В состав пьезотромбозагрографа входят: микроконтроллер, узел питания, пленочная клавиатура с индикаторами, дисплей, генератор сигнала, модуль Wi-Fi, термостат, измерительная плата. Питание прибора обеспечивается от сетевого

адаптера ~220В, 50 Гц, обеспечивающего выходное напряжение в диапазоне +8...+16 В при токе 1А.

Принцип определения вязкости анализата и конфигурация пьезоэлектрического датчика, использованного в пьезотромбозагрографе АРП-01М «Меднорд», описаны нами ранее в работе [10]. Ключевым элементом аппарата является микроконтроллер ATmega2560-16AU, осуществляющий сбор первичных данных, необходимые автономные функции и связь с персональным компьютером, управляемый программой, хранящейся в его энергонезависимой памяти. Микроконтроллер обладает набором встроенных периферийных устройств для подключения необходимых аналоговых и цифровых устройств [11; 12]. Данный микроконтроллер выбран благодаря относительно низкой цене, надежности и достаточному уровню производительности.

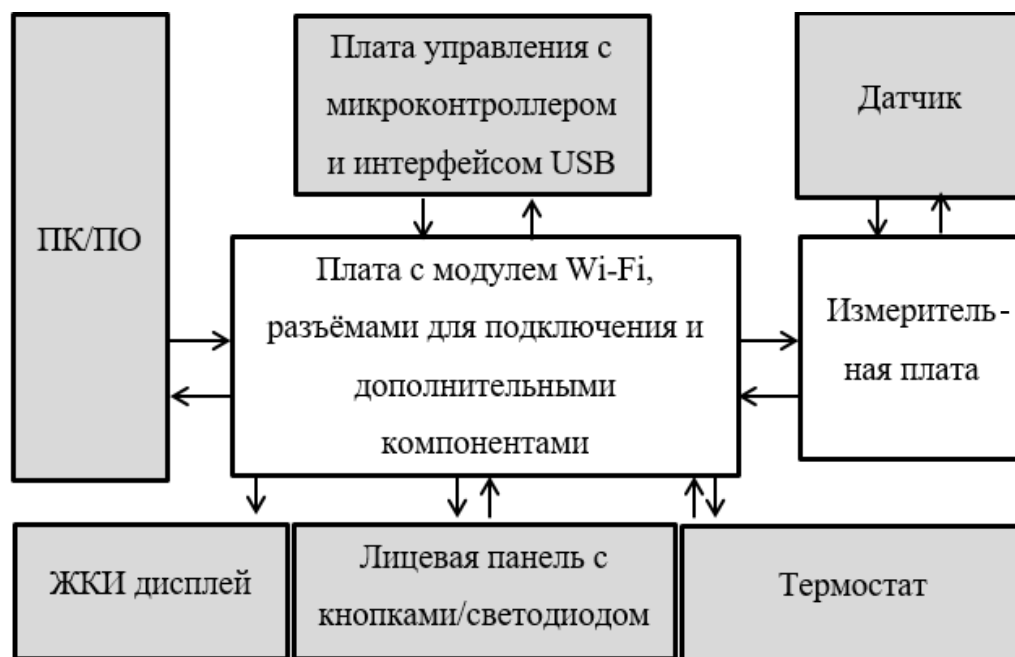


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Fig. 1. Block diagram of the hardware and software complex

Плата усиления, преобразования и декодирования аналоговых сигналов, к которой подключается датчик, выполнена с использованием микросхемы цифрового DDS-генератора сигналов (AD9833BRMZ), управляемой командами от микроконтроллера. Данная микросхема генерирует синусоидальный сигнал в диапазоне +0,04...0,65 В с перестраиваемой частотой, который преобразуется из однополярного в двуполярный переменный сигнал, усиливается и подаётся на одну из половин пьезоэлемента датчика [10]. В зависимости от вязкости среды, в которую погружена игла, соединённая с пьезоэлементом, меняется сигнал, снимаемый со второй половины пьезодатчика. Этот сигнал поступает в узел аналоговой обработки, в котором происходит усиление, преобразование из двуполярного переменного в постоянный сигнал, амплитуда которого пропорциональна максимальной амплитуде исходного сигнала. Полученное постоянное напряжение измеряется АЦП микроконтроллера, производится пересчёт значения напряжения с требуемыми коэффициентами для получения значений в нужном диапазоне.

Обмен информацией между ПО, установленным на ПК, и аппаратом (микроконтроллером) происходит посредством управляющих команд. Текст команды посылается в кодировке символов ASCII. После команды посылаются 2 байта контрольной суммы (далее – YY), которая получается вычислением по алгоритму расчёта CRC-16 на основе полинома A001 [13; 14].

Например, команда SendYY запрашивает значения напряжения, температуры термостата и состояния прибора (CRC = 44, 244 (\$2C, F4)). Ответ микроконтроллера имеет формат UUZXRXRTLFFFFFFAAABBBYY, где UU – два байта кода напряжения, Z – знак «+» или «-» (положительная или отрицательная температура), R – символ-разделитель целой и дробной частей, который берётся из команды установки температуры термостата (по умолчанию – запятая), XXRX – значение температуры термостата в кодировке ASCII (например, «+37,1» означает температуру +37,1 °C), T – состояние нагрева термостата («0» – нагрев термостата выключен, «1» – включен), L – состояние светодиода на передней панели прибора («0» – светодиод выключен, «1» – включен), FFFFFFFF – значение частоты, установленной в приборе (всегда 6 байт; незначащие заменяются нулями), AAA – уровень сигнала, установленный в приборе (всегда 3 байта; незначащие заменяются нулями), BBB – чувствительность, установленная в приборе (всегда 3 байта; незначащие заменяются нулями).

Помимо опроса «состояния» аппарата, имеется ряд управляющих команд для него: задание частоты, уровня сигнала, температуры, чувствительности, включение / выключение термостата, светодиода на лицевой панели, Wi-Fi, сохранение настроек аппарата, сброс настроек, вывод сообщений на экран аппарата. Ответ: OKYY; означает успешное получение данных и установку нового значения.

## Результаты и их обсуждение

Для разработки пользовательского программного обеспечения «Гемо-5» для ПЭВМ использовались инструменты Embarcadero RAD Studio. Основными функциями ПО являются: обмен данными с аппаратной частью (получение и сохранение информации от аппарата, калибровка и настройка), сохранение Ф. И. О. пациентов и их исследований в БД, онлайн-запись исследования. В качестве системы управления базой данных был выбран Microsoft Access [15].

Для удобства навигации по программе интерфейс выполнен в виде быстрых вкладок (рис. 2):

1. Пациенты – база данных пациентов.
2. Исследования – база данных исследований у выбранного пациента.
3. Графики – отображение графиков исследований.
4. Калибровка и тестирование – вкладка для подготовки комплекса к работе.
5. Новое исследование – вкладка для проведения нового исследования.
6. Управление – вкладка для изменения настроек как ПО, так и аппарата.
7. Нормы – вкладка для возможности корректировки норм в различных гендерных и возрастных группах.

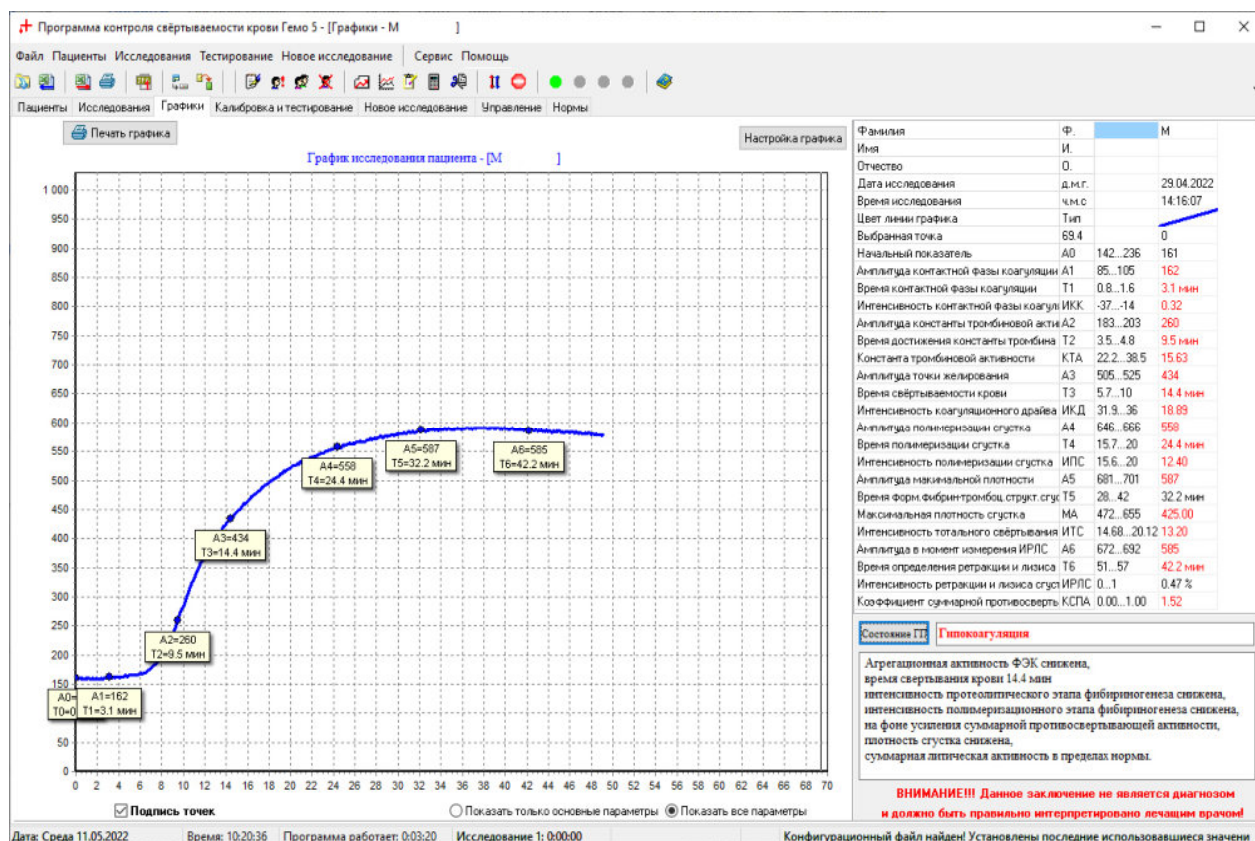


Рис. 2. Интерфейс ПО «Гемо-5». Вкладка «Графики»

Fig. 2. The interface of the software "Gemo-5". The "Charts" tab

## Расчёт параметров тромбоэластограммы

При отправке управляющей команды SendYY с ПК микроконтроллер передаёт требуемое значение напряжения. Итоговое значение напряжения вычисляется из двух байт (UU) по формуле

$$U = ((\text{InByte}[0] \text{ shl } 8) + \text{InByte}[1]) \cdot 0,01,$$

где InByte[0] и InByte[1] – первый и второй байт соответственно; Shl – поразрядный сдвиг влево целого числа. При проведении исследования, исходя из полученных данных, строится график изменения напряжения (амплитуды в относительных единицах) во времени.

Объектом исследования является нативная венозная кровь, предметом исследования – функциональное состояние сосудисто-тромбоцитарного, коагуляционного и фибринолитического звеньев системы гемостаза. Исследование проводилось с группой условно здоровых добровольцев ( $n = 20$ ), у которых была проведена запись полной пьезотромбоэластограммы (рис. 3). Из представленных данных следует, что ПТЭГ крови человека имеет характерный вид и может быть количественно оценена рядом параметров.

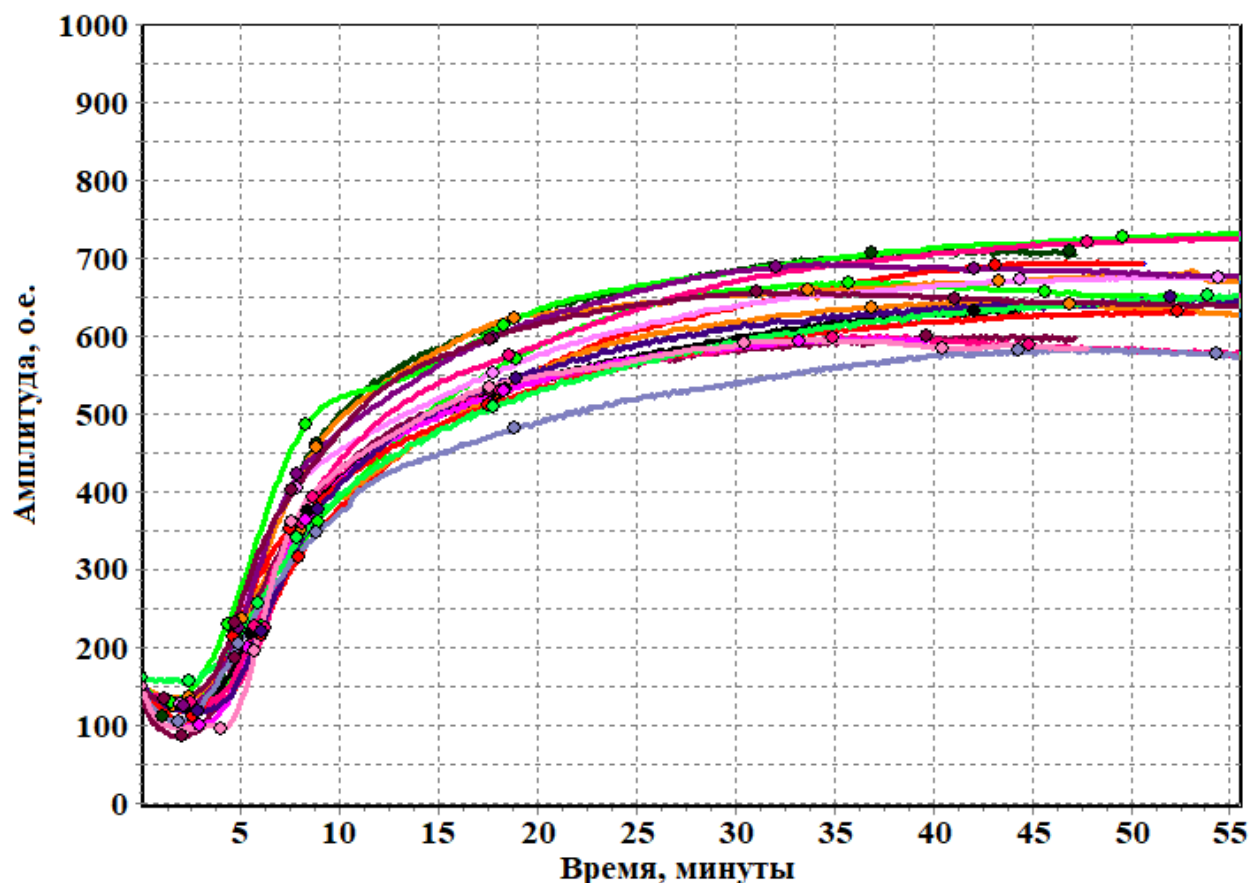


Рис. 3. Типичные ПТЭГ условно здоровых добровольцев ( $n = 20$ ) [16]

Fig. 3. Typical PTEG of conditionally healthy volunteers ( $n = 20$ ) [16]



Разработанная нами программа «Гемо-5» позволяет рассчитывать совокупность параметров (амплитудных, временных и интегративных) (табл. 1). Пояснение к расчёту параметров дано на рисунке 4. Ряд точек был выбран исходя из «типичного вида» графиков: начальная ( $A_0$ ), минимальная ( $A_1$ – $T_1$ ), максимальная ( $A_5$ – $T_5$ ) точки, точка «перегиба» ( $A_3$ – $T_3$ ) – изменение угла наклона кривой. Точки  $A_2$ – $T_2$ ,  $A_4$ – $T_4$ ,  $A_6$ – $T_6$  выбраны экспериментально для оценки определенных этапов фибриногенеза (тромбиновая, полимеризационная и фибринолитическая активности). Дополнительно к физическим параметрам (измеряемым) были введены рассчитываемые

(интегративные) параметры ИКК, КТА, ИКД, ИПС, МА, ИРЛС, КСПА. Их введение обусловлено необходимостью унификации оценки различных звеньев системы гемостаза, повышения информативности теста.

Выбранные параметры рассчитываются и сохраняются в базу данных в автоматическом режиме. Информация о состоянии пациента является важной составляющей дальнейшего лечения, в связи с этим важным вопросом является правовая защита результатов интеллектуальной деятельности [17; 18]. Разработанное ПО «Гемо-5» зарегистрировано как медицинское изделие (№ РЗН 2020/12855) [16].

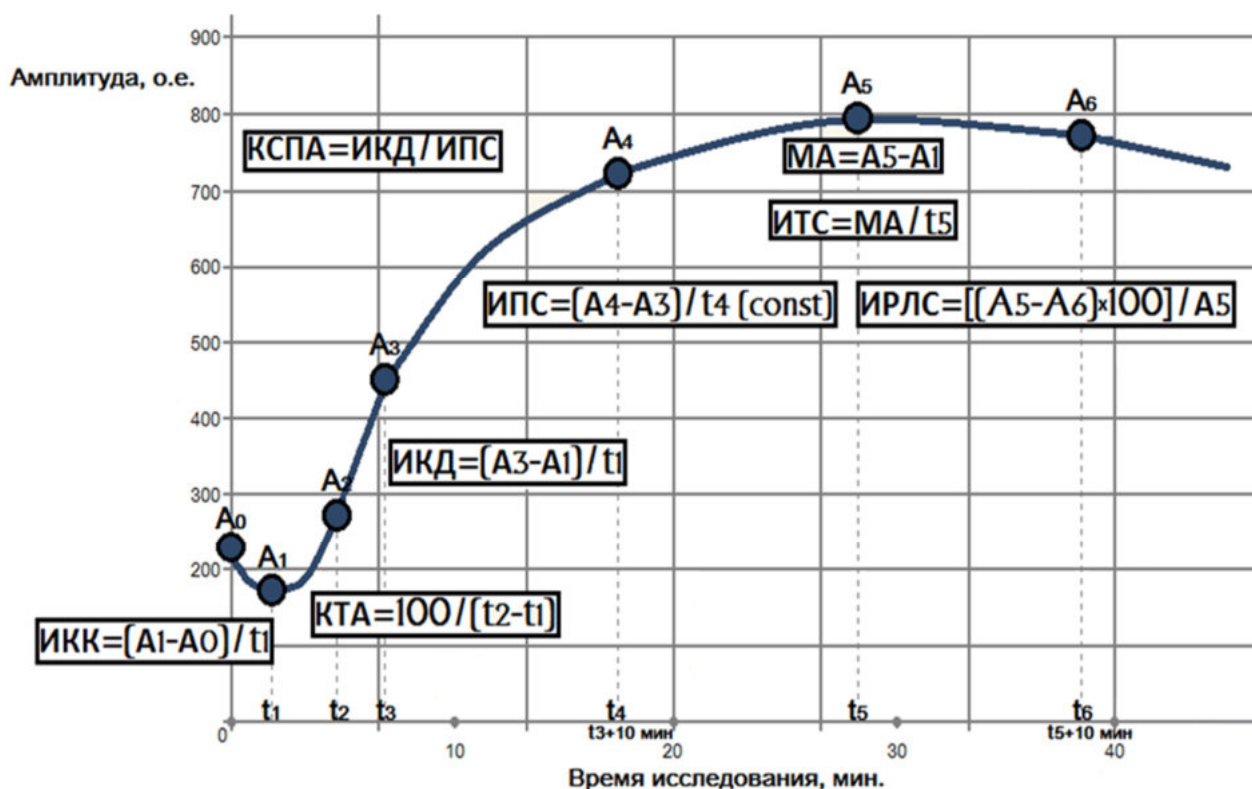


Рис. 4. Информативные параметры ПТЭГ

Fig. 4. Informative parameters of the PTEG

**Таблица 1.** Параметры ПТЭГ**Table 1.** PTEG parameters

Сокращение	Параметр	Определение
$A_i$	Текущий показатель амплитуды графика, отн. ед.	Интегрированная кривая НПТЭГ, каждая точка которой ( $A_i$ ) соответствует агрегатному состоянию системы в конкретный момент времени исследования ( $t_i$ )
$t_i$	Текущее время исследования, мин	Интервал времени между началом исследования и текущим моментом исследования
$A_0$	Начальный показатель агрегатного состояния крови в момент времени $t_0$ , отн. ед.	Начальное значение амплитуды в момент времени $t_0$
$A_1$	Амплитуда контактной фазы коагуляции, отн. ед.	Максимальное снижение амплитуды за время $t_1$ (период реакции)
$A_2$	Амплитуда константы тромбина, отн. ед.	Увеличение амплитуды НПТЭГ на 100 отн. ед.
$t_1$	Время контактной фазы коагуляции, мин	Период реакции (время в минутах от начала исследования до достижения минимальной амплитуды НПТЭГ – $A_1$ )
$t_2$	Время достижения константы тромбина, мин	Время достижения амплитуды $A_2$ НПТЭГ
$t_3$ (ТЖ)	Время свёртывания крови, мин	Время свёртывания крови (точка желирования), определяется автоматически при изменении тангенса угла наклона кривой на 60%
$A_3$	Амплитуда времени свёртывания крови, отн. ед.	Величина амплитуды НПТЭГ в точке желирования
$t_4$	Время полимеризации сгустка, мин	Регистрируется через 10 минут после $t_3$
$A_4$	Амплитуда полимеризации сгустка, отн. ед.	Значение амплитуды НПТЭГ через 10 мин после достижения точки желирования
$A_5$	Амплитуда образования фибринтромбоцитарной структуры сгустка, отн. ед.	Максимальная амплитуда НПТЭГ, регистрируемая по истечении 10 минут при условии отсутствии изменений $\pm 5$ отн. ед.
$t_5$	Время формирования фибрин тромбоцитарной структуры сгустка, мин	Время достижения МА, т. е. время формирования поперечно сшитого фибрина
ИКК	Интенсивность контактной фазы коагуляции	Интенсивность контактной коагуляции, определяется как частное от деления разницы амплитуд ( $A_0-A_1$ ) на период реакции $t_1$



Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Сокращение	Параметр	Определение
КТА	Константа тромбиновой активности	Константа тромбиновой активности, определяется как частное от деления амплитуды НПТЭГ $A_2 = (100 \text{ const})$ на время $(t_2 - t_1)$
ИКД	Интенсивность коагуляционного драйва	Интенсивность коагуляционного драйва, определяется как частное от деления разницы амплитуд $(A_3 - A_1)$ на время свёртывания крови
ИПС	Интенсивность полимеризации сгустка	Интенсивность полимеризации сгустка, определяется как частное от деления разницы амплитуд НПТЭГ $(A_4 - A_3)$ на постоянную временную $= 10 \text{ мин}$
МА	Максимальная плотность сгустка, отн. ед.	Максимальная амплитуда сгустка, определяется как разница величин $(A_5 - A_1)$ в о.е., показатель, характеризующий максимальную плотность сгустка, обусловленную активностью тромбоцитов и количественную / качественную характеристику ПСФ
ИРЛС	Интенсивность ретракции и лизиса сгустка, %	Интенсивность лизиса и ретракции сгустка, определяется в процентах, на которые уменьшается величина амплитуды сгустка в течение 10 мин $(A_6)$ после достижения МА: $(A_5 - A_6) / A_5 \cdot 100\%$ .
КСПА	Коэффициент суммарной противосвертывающей активности	Определяется как частное от деления ИКД/ИПС

Поскольку метод пьезотромбозагрографии принципиально отличается от других методов исследования системы гемостаза [7], прямая калибровка прибора невозможна. Поэтому проверка выбранных параметров, определяемых с использованием данных ПТЭГ, заключалась в установлении соответствия значений параметров данным, полученным другими методами. Результаты сравнения приведены ниже (табл. 2).

Параметры системы гемостаза, полученные с использованием разработанного комплекса, сравнивались с «золотым стандартом» реаниматологии – тромбозагрометрией (Rotem Delta)

[19; 20]. Коагулологическое исследование крови проводили на бедной тромбоцитами плазме с использованием 4-канального полуавтоматического коагулометра Amelung KC 4 delta (Trinity Biotech, Ирландия). Исследование агрегационной активности тромбоцитов производили на аппарате «Алат-2» Биола по методу Борна и О'Брайена. Для постановки ТГТ использовали реагенты и программное обеспечение производства Thrombinoscope™ bv (Нидерланды).

Исследование проведено на базе клиник ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России и клиник НИИФиРМ им. Е. Д. Гольдберга Томского НИМЦ.

**Таблица 2.** Соответствие параметров ПТЭГ известным методам**Table 2.** Correspondence of PTEG parameters to known methods

Параметр	Метод проверки	Соответствие
A0	Гематокрит	Сильная положительная корреляция
A1	СОЭ	Сильная отрицательная корреляция
t1	Агрегационная активность тромбоцитов	Сильная отрицательная корреляция
ИКК	Агрегационная активность тромбоцитов	Сильная положительная корреляция
t2	Тест генерации тромбина (T-peak)	Сильная положительная корреляция
КТА	МНО, АЧТВ	Сильная положительная корреляция
t3, ИКД	ВСК	Сильная положительная корреляция
A4, t4, ИПС	ТЭГ/ТЭМ ( $\alpha$ )	Сильная положительная корреляция
A5, МА	ТЭГ/ТЭМ (МА, MCF)	Сильная положительная корреляция
t5, ИТС	ТЭГ/ТЭМ (К, A20)	Сильная положительная корреляция
A6	ТЭГ/ТЭМ (ML, Ly30)	Сильная положительная корреляция
t6, ИРЛС	ТЭГ/ТЭМ (LOT, EPL)	Сильная положительная корреляция

## Выводы

Разработано ПО «Гемо-5» для работы в составе аппаратно-программного комплекса «НПТЭГ Меднорд» и зарегистрировано как медицинское изделие (№ РЗН 2020/12855).

В состав ПО комплекса вошли: ПО микроконтроллера, пользовательская часть, СУБД. ПО аппаратно-программного комплекса позволяет оценивать 21 параметр системы гемостаза, в том числе вести непрерывный мониторинг состояния системы гемостаза (on-line). Графический интерфейс – интуитивно

понятный. База данных позволяет сохранять пациентов и их исследования.

Предложена совокупность параметров (амплитудных, временных и интегративных) и их способов определения, характеризующая особенности пьезотромбоэластограммы. Преимуществом применения ПТЭГ является использование одного прибора для анализа функционального состояния системы гемостаза на всех этапах фибриногенеза. Определяемые параметры соответствуют стандартам, применяемым в настоящее время для исследования системы гемостаза.

## Список литературы

1. Баркаган З. С., Момот А. П. Основы диагностики нарушений. М.: Ньюдиамед-АО, 1999. 217 с.
2. Современные методы распознавания состояния тромботической готовности: монография / А. П. Момот, Л. П. Цыпкина, И. А. Тараненко, А. Н. Мамаев, Г. В. Сердюк, И. И. Шахматов, И. В. Лыдина, Е. В. Григорьева, Д. Е. Белозеров, Д. А. Никитина,

Л. А. Строзенко, О. В. Петрекова, О. В. Беспалова, И. С. Ломаев. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета, 2011. 138 с.

3. Явелов И. С., Драпкина О. М. COVID-19: состояние системы гемостаза и особенности антитромботической терапии // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2020. Т. 19, № 3. С. 310–318.

4. Влияние антикоагулянтной терапии на течение COVID-19 у коморбидных пациентов / Т. А. Руженцова, Д. А. Хавкина, П. В. Чухляев, А. А. Гарбузов, А. А. Плоскирева // Вопросы вирусологии. 2021. Т. 66, № 1. С. 40–46.

5. Лабораторные методы исследования системы гемостаза / В. П. Балуда, З. С. Баркаган, Е. Д. Гольдберг, Б. И. Кузник, К. П. Лакин; под ред. Е. Д. Гольдберга. Томск: Изво Томского медицинского университета, 1980. 314 с.

6. Медицинская лабораторная диагностика: программы и алгоритмы: руководство для врачей / А. И. Карпищенко, В. А. Андреев, В. Г. Антонов [и др.]; под ред. А. И. Карпищенко. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 696 с.

7. Тютрин И. И., Удут В. В. Низкочастотная пьезотромбоэластография цельной крови: алгоритмы диагностики и коррекции гемостазиологических расстройств. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2016. 170 с.

8. Hartmann J., Murphy M., Dias J. Viscoelastic hemostatic assays: moving from the laboratory to the site of care – a review of established and emerging technologies // *Diagnostics*. 2020. Vol. 10, N 2. P. 118–122.

9. Референсные показатели ротационной тромбоэластометрии у беременных и рожениц: систематический обзор и метаанализ / А. М. Роненсон, Е. М. Шифман, А. В. Куликов, Ю. С. Распопин // *Анестезиология и реаниматология*. 2021. № 3. С. 28–40.

10. Слизевич Д. С., Губарев Ф. А., Тютрин И. И. Прикроватный аппаратно-программный комплекс для оценки функционального состояния системы гемостаза // *Медицинская техника*. 2020. № 3. С. 10–13.

11. Arduino Hardware. Arduino Company; 2022. URL: <https://www.arduino.cc/en/hardware/mkr-family> (дата обращения: 10.08.2022)

12. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Tiny и Mega фирмы Atmel: Руководство. М.: ДМК Пресс, 2015. 558 с.

13. Брауде Э. Технология разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2004. 655 с.

14. Кобринский Б. А., Зарубина Т. В. Медицинская информатика. М.: Академия, 2009. 192 с.

15. Аронов А. М., Пичугин В. Ф., Твердохлебов С. И. Разработка и внедрение новых медицинских изделий. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. 238 с.

16. А. с. 2019620555. База данных показателей, характеризующих состояние гемостатического потенциала, условно здоровых добровольцев сибирской популяции / И. И. Тютрин, Е. Л. Жуков, Д. С. Слизевич. Оpubл. 01.04.19.

17. Коммерциализация и правовая защита результатов интеллектуальной деятельности / А. Н. Солдатов, С. Л. Миньков, В. П. Беличенко, Д. М. Хлопцов, Г. Г. Фомин, Н. К. Шумихина. Томск: Томский государственный университет, 2011. 334 с.
18. Разина И. С., Жукова И. В., Иванова С. Н. Регистрация медицинского программного обеспечения // Перспективы науки. 2022. № 7. С. 23–26.
19. Кишкун А. А. Клиническая лабораторная диагностика. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 976 с.
20. Применение ротационной тромбоэластометрии для диагностики дефицита факторов свертывания и контроля гемостатической терапии у больных наследственными коагулопатиями / Г. М. Галстян, О. А. Полеводова, Е. В. Яковлева, А. Е. Щекина // Гематология и трансфузиология. 2019. Т. 64, № 3. С. 297–316.

### References

1. Barkagan Z. S., Momot A. P. Osnovy diagnostiki narushenii [Fundamentals of diagnosing disorders of hemostasis]. Moscow, Nyudiamed-AO Publ., 1999. 217 p.
2. Momot A. P., Tsyvkina L. P., Taranenko I. A., Mamaev A. N., Serdyuk G. V., Shakhmatov I. I., Lydina I. V., Grigorieva E. V., Belozarov D. E., Nikitina D. A., Strozenko L. A., Petrekova O. V., Besspalova O. V., Lomaev I. S. Sovremennye metody raspoznavaniya sostoyaniya tromboticheskoi gotovnosti [Modern methods of recognizing the state of thrombotic readiness]. Barnaul, Altai State University Publ., 2011. 138 p.
3. Yavelov I. S., Drapkina O. M. COVID-19: sostoyanie sistemy gemostaza i osobennosti antitromboticheskoi terapii [COVID-19: state of the hemostasis system and features of antithrombotic therapy]. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular Therapy and Prevention*, 2020, no. 19 (3), pp. 310–318.
4. Ruzhentsova T. A., Khavkina D. A., Chukhlyaev P. V., Garbuzov A. A., Ploskireva A. A. Vliyanie antikoagulyantnoi terapii na techenie COVID-19 u komorbidnykh patsientov [Effect of anticoagulant therapy on the course of COVID-19 in comorbid patients]. *Voprosy virusologii = Problems of Virology*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 40–46.
5. Baluda V. P., Barkagan Z. S., Goldberg E. D., Kuznik B. I., Lakin K. P. Laboratornye metody issledovaniya sistemy gemostaza [Laboratory methods for studying the hemostasis system]; ed. by E. D. Gol'dberga. Tomsk, Tomsk Medical University Publ., 1980. 314 p.
6. Karpishchenko A. I., Andreev V. A., Antonov V. G., eds. Meditsinskaya laboratornaya diagnostika: programmy i algoritmy: rukovodstvo dlya vrachei [Medical laboratory diagnostics: programs and algorithms: a guide for doctors]. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2014. 696 p.
7. Tyutrin I. I., Udut V. V. Nizkochastotnaya p'ezotromboelastografiya tsel'noi krovi: algoritmy diagnostiki i korrektsii gemostaziologicheskikh rasstroistv [Low-frequency piezothromboelastography of whole blood: algorithms for diagnosing and correcting hemostatic disorders]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2016. 170 p.

8. Hartmann J., Murphy M., Dias J. Viscoelastic hemostatic assays: moving from the laboratory to the site of care – a review of established and emerging technologies. *Diagnostics*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 118–122.
9. Ronenson A. M., Shifman E. M., Kulikov A. V., Raspopin Yu. S. Referensnye pokazateli rotatsionnoi tromboelastometrii u beremennykh i rozhe-nits: sistematicheskii obzor i metaanaliz [Reference indicators of rotational thromboelastometry in pregnant women and women in childbirth: a systematic review and meta-analysis]. *Anesteziologiya i reanimatologiya = Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology*, 2021, no. 3, pp. 28–40.
10. Slizevich D. S., Gubarev F. A., Tyutrin I. I. Prikrovatnyi apparatno-programmnyi kompleks dlya otsenki funktsional'nogo sostoyaniya sistemy gemostaza [Bedside hardware and software complex for assessing the functional state of the hemostasis system]. *Meditsinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 10–13.
11. Arduino Hardware. Arduino Company; 2022. Available at: <https://www.arduino.cc/en/hardware#mkr-family>. (accessed 10.08.2022)
12. Evstifeev A. V. Mikrokontrollery AVR semeistva Tiny i Mega firmy Atmel: Rukovodstvo [AVR microcontrollers of the Tiny and Mega families from Atmel. Guide]. Moscow, DKM Press, 2015. 558 p.
13. Braude E. Tekhnologiya razrabotki programmnoy obespecheniya [Technology of software development]. St. Petersburg, Piter Publ., 2004. 655 p.
14. Kobrinsky B. A., Zarubina T. V. Meditsinskaya informatika [Medical informatics]. Moscow, Academy Publ., 2009. 192 p.
15. Aronov A. M., Pichugin V. F., Tverdokhlebov S. I. Razrabotka i vnedrenie novykh meditsinskikh izdelii [Development and implementation of new medical products]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 238 p.
16. Tyutrin I. I. e.a. Baza dannykh pokazatelei, kharakterizuyushchikh sostoyanie gemostaticheskogo potentsiala, uslovno zdorovykh dobrovol'tsev sibirskoi populya-tsii [Database of indicators characterizing the state of hemostatic potential of conditionally healthy volunteers of the Siberian population]. Certificate RF, no. 2019620555, 2019.
17. Soldatov A. N., Minkov S. L., Belichenko D. M., Khlopzov G. G., Fomin G. G., Shumikhina N. K. Kommertsializatsiya i pravovaya zashchita rezul'tatov intellektual'noi deyatelnosti [Commercialization and legal protection of the results of intellectual activity]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2011. 334 p.
18. Razina I. S., Zhukova I. V., Ivanova S. N. Registratsiya meditsinskogo programmnoy obespecheniya [Registration of medical software]. *Perspektivy nauki = Reports Scientific Society*, 2022, no. 7, pp. 23–26.
19. Kishkun A. A. Klinicheskaya laboratornaya diagnostika [Clinical laboratory diagnostics]. Moscow, GEOTAR-Media, 2010. 976 p.
20. Galstyan G. M., Polevodova O. A., Yakovleva E. V., Shchekina A. E. Primenenie rotatsionnoi tromboelastometrii dlya diagnostiki defitsita faktorov svertyvaniya i kontrolya

gemostaticheskoi terapii u bol'nykh nasled-stvennymi koagulopatiyami [Rotation thromboelastometry for the diagnosis of factor deficiency and management of the hemostatic therapy in patients with inherited coagulation disorders]. *Gematologiya i transfuziologiya = Russian Journal of Hematology and Transfusiology*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 297–316.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Дмитрий Сергеевич Слизович**, аспирант, Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; помощник научного руководителя, ООО «Меднорд-Техника», г. Томск, Российская Федерация, e-mail: dmitry\_slizevich@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5053-1561

**Dmitry S. Slizevich**, Post-Graduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University; Assistant of to the Scientific Supervisor, Limited Liability Company "Mednord-Technique", Tomsk, Russian Federation, e-mail: dmitry\_slizevich@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5053-1561

**Федор Александрович Губарев**, доктор технических наук, профессор кафедры паротурбинных установок, Институт ядерной энергии и промышленности, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация e-mail: gubarevfa@tpu.ru, ORCID: 0000-0002-7499-6109

**Fedor A. Gubarev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor Department of Steam Turbine Plants, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: gubarevfa@tpu.ru, ORCID: 0000-0002-7499-6109

**Жуков Егор Леонидович**, аспирант, Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; коммерческий директор, ООО «Меднорд-Техника», г. Томск, Российская Федерация, e-mail: zukentiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3198-6306

**Egor L. Zhukov**, Post-Graduate Student, Research School of Chemical and Biomedical Technologies, National Research Tomsk Polytechnic University; Commercial Director, Limited Liability Company "Mednord-Technika", Tomsk, Russian Federation, e-mail: zukentiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3198-6306

### Разработка структуры генератора сверхнизкоинтенсивных микроволновых, биомодулированных излучений для экспериментальных медико-биологических исследований

Н. Д. Евтушенко<sup>1</sup>, Ф. А. Пятакович<sup>2</sup>, Т. И. Якунченко<sup>2</sup>, М. Ю. Артамонов<sup>3</sup> ✉

<sup>1</sup> Губкинский филиал Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова  
ул. Дзержинского 15-а, г. Губкин 309186, Российская Федерация

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Победы 8, г. Белгород 308015, Российская Федерация

<sup>3</sup> Американское общество медицинских газов  
г. Ист-Страудсбург 18301, Соединённые Штаты Америки

✉ e-mail: DrMike@mjahealthcare.com

#### Резюме

**Цель исследования** заключается в разработке аппарата микроволнового излучения сверхнизкой интенсивности в диапазоне 1 ГГц и мощности <10 мВт, предназначенного для проведения медико-биологических экспериментальных исследований.

**Методы.** Научную работу выполнила трансляционная группа исследователей, включающая врачей-цитологов для оценки эффективности биотехнической системы микроволнового воздействия на биологические объекты растительного происхождения и мезенхимальные стволовые клетки человека, а также биологов, инженеров, радиофизиков и программистов. Для решения поставленных задач использовалась методология системного анализа, теория принятия решений, теория управления и теория моделирования. В материалах статьи рассмотрена структура модуля генерации СВЧ-аппарата, структура и принципиальная электрическая схема таймера устройства. Даны обоснования выбора частот биомодуляции на основе фундаментальных принципов хронобиологии, учитывающих циклические процессы функционирования клеток, а именно элонгации цепи синтеза протеинов, ритмов микроциркуляции, работы центра терморегуляции, околочасовые циклы клеточного деления и синтеза РНК.

**Результаты.** На основании проведенных исследований разработана и представлена структура низкочастотного биомодулятора. Функционирование аппарата обеспечивает разработанный программный код микроконтроллера. Разработанный макетный образец аппарата был протестирован при помощи анализатора спектра и сигналов немецкой фирмы: ROHDE & SCHWARZ FSV SIGNAL ANALYZER 5 kHz 40 GHz. Снятый с рамочной антенны аппарата сигнал имел частоту 1000 МГц с добротностью сигнала 100 кГц.

**Заключение.** Показан положительный эффект влияния сверхнизкоинтенсивного микроволнового излучения на мезенхимальные стволовые клетки (МСК). Выявлено достоверное увеличение интенсивности флуоресценции МСК в режиме низкочастотной биомодуляции.

**Ключевые слова:** модуль СВЧ-генерации; НЧ-биомодулятор; смеситель сигналов; таймер; микроконтроллер управления; излучающая рамочная антенна; мезенхимальные стволовые клетки.

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

**Для цитирования:** Разработка структуры генератора сверхнизкоинтенсивных микроволновых, биомодулированных излучений для экспериментальных медико-биологических исследований / Н. Д. Евтушенко, Ф. А. Пятакович, Т. И. Якунченко, М. Ю. Артамонов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 23–40. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-23-40>.

Поступила в редакцию 29.09.2022

Подписана в печать 24.10.2022

Опубликована 22.12.2022

## Development of the Structure of a Generator of Superlowintensity Microwave Biomodulated Radiations for Experimental Medical-Biological Research

Nikolay D. Evtushenko<sup>1</sup>, Felix A. Pyatakovich<sup>2</sup>, Tatiana I. Yakunchenko<sup>2</sup>, Mikhail Yu. Artamonov<sup>3</sup> ✉

<sup>1</sup> Gubkin Branch of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov  
15-a Dzerzhinsk Str., Gubkin 309186, Russian Federation

<sup>2</sup> Belgorod State National Research University  
8 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation

<sup>3</sup> American Society of Medical Gases  
East Stroudsburg 18301, United States of America

✉ e-mail: DrMike@mjahealthcare.com

### Abstract

**The purpose of research** is to develop a microwave device—a new ultra-low intensity radiation in the range of 1 GHz and a power of <10 MW, designed for conducting biomedical experimental studies.

**Methods.** The scientific work was carried out by a translational group of researchers, including doctors, biologists, engineers, radiophysicists and programmers. In the materials of the article, the structure of the microwave generation module of the device, the structure and the circuit diagram of the timer of the device are considered. The reasons for the choice of biomodulation frequencies are given on the basis of the fundamental principles of chronobiology, taking into account the cyclic processes of cell functioning, namely, the elongation of the protein synthesis chain, microcirculation rhythms, the work of the thermoregulation center, near-hourly cycles of cell division and RNA synthesis.

**Results.** Based on the conducted research, the structure of a low-frequency biomodulator has been developed and presented. The functioning of the device is provided by the developed program code of the microcontroller. The developed mock-up sample of the device was tested using the spectrum and signal analyzer of the German company: ROHDE & SCHWARZ FSV SIGNAL ANALYZER 5 kHz 40 GHz. The signal taken from the frame antenna of the device had a frequency of 1000 MHz with a signal quality of 100 kHz.

**Conclusions.** The positive effect of the effect of ultra-low intensity microwave radiation on mesenchymal stem cells (MSCs) is shown. A significant increase in the intensity of MSCs fluorescence in the mode of low-frequency biomodulation was revealed.

**Keywords:** microwave generation module; LF biomodulator; signal mixer; timer; control microcontroller; radiating frame antenna; mesenchymal stem cells.

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

**For citation:** Evtushenko N. D., Pyatakovich F. A., Yakunchenko T. I., Artamonov M. Yu. Development of the Structure of a Generator of Superlowintensity Microwave Biomodulated Radiations for Experimental Medical-Biological Re-



search. *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(4): 23–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-23-40>.

Received 29.09.2022

Accepted 24.10.2022

Published 22.12.2022

\*\*\*

## Введение

Медикаментозная терапия при многих заболеваниях занимает ведущее место среди всех возможных методов лечения. Однако наличие разнообразных побочных эффектов, осложнений и неэффективности, используемых фармпрепаратов заставляет медиков акцентировать внимание на поиске альтернативных методов лечения (в частности, экологически чистых электромагнитных излучениях). Использование физических факторов для лечения различных заболеваний требует решения проблемы оптимизации физиотерапевтического воздействия.

В последние годы было показано, что наиболее эффективным способом лечения поврежденных нервных волокон является использование так называемых мультипотентных мезенхимальных стромальных клеток [1].

Стволовые клетки, которые содержатся в костном мозге [2] и выделены из тканей челюстно-лицевой области, относятся к наиболее изученным [3].

Широкое применение находят стволовые клетки и в лечении заболеваний слизистой полости рта, включая и ткани зубочелюстной системы [4].

Важно подчеркнуть, что эти клетки имеют низкий иммуногенный потенциал, т. е. не склонны к отторжению.

Они также способны мигрировать и накапливаться в зоне повреждения.

Использование стволовых клеток не нарушает этических норм, следовательно, они имеют большое будущее для использования их в регенеративной терапии [5].

Известны эффекты синтеза периодонтальных тканей, которые в последующем хорошо иннервируются и васкуляризируются [6].

Для интенсификации дифференцировки стволовых клеток на практике прибегают к использованию цитокинов [7].

Особые формы стволовых клеток могут трансформироваться в клетки костной и хрящевой ткани [8]. Этот подход открывает перспективу их использования в ортопедической практике при различных заболеваниях.

Помимо отмеченных выше влияний цитокинов на дифференцировку стволовых клеток в литературе были показаны также влияния низкоинтенсивного лазерного излучения на мезенхимальные стволовые клетки человека [9; 10] и животных [11].

Интересно отметить, что еще в 80-е годы XX века в экспериментальных исследованиях новосибирских ученых, выполненных под руководством академика В. П. Казначеева, была установлена роль сверхслабых физических полей в развитии цитопатологического

действия биологических объектов вирусной природы, агентов химической и физической природы [12]. Помимо этого, была подтверждена информация о принципиально новых механизмах взаимодействия биологических объектов со сверхмалыми дозами биологически активных веществ и сверхслабыми электромагнитными излучениями [13].

Как известно, в медицинской практике широко используется аппаратура миллиметровой или КВЧ-терапии для лечения большого круга различных заболеваний. КВЧ-терапия относится к методам нетеплового информационного воздействия мощностью  $\leq 10$  мВт. Следует особо подчеркнуть, что авторы совместного российско-итальянского научного исследования выявили факты влияния краткосрочного и низкоинтенсивного воздействия миллиметровых волн на генетический аппарат человека [14].

Однако необходимо отметить, что используемые одночастотные сигналы модуляции в известных аппаратах с позиций хронобиологии не могут считаться корректными, поскольку биологические коды относятся к многочастотным сигналам, которые могут изменяться циклически, но при этом сохранять отношение частот постоянным. Одночастотные сигналы, как правило, подавляются более высокими уровнями регуляции [15].

Использование модулированных дециметровых волн сверхнизкой интенсивности позволило получить положительные эффекты в лечении больных сахарным диабетом II типа [16].

Положительные результаты коррекции нейродинамической активности мозга пациента были получены при модуляции ЭМИ СВЧ-диапазона посредством паттерна ЭЭГ-сигналов [17]. Важно подчеркнуть, что интегральная концепция механизма воздействия крайне высокой частоты миллиметрового диапазона длин волн на человека существенно отличается от механизмов рецепции, ретрансляции и воздействия на человека сверхнизкоинтенсивных  $\leq 10$  мкВт сантиметровых волн с частотой 1 ГГц. Как стало известно, при таких параметрах вода становится радиопрозрачной для проникновения СВЧ-сигналов непосредственно к органам пациента [18; 19]. Эффект «непропускания» водными средами резонансных радиоволн **повышенной плотности мощности** обусловлен переходом молекулярной системы в нелинейный режим со смещением резонанса. Так, например, стохастический режим нелинейной динамики при плотности мощности  $>10$  мВт/см<sup>2</sup> и автоколебательный режим при плотности мощности 1–10 Вт/см<sup>2</sup> приводят к поглощению радиоволн в приповерхностном слое воды. И только стационарный режим при плотности мощности  $\leq 10$  мкВт/см<sup>2</sup> обеспечивает эффект пропускания водными средами резонансных радиоволн.

Отсюда следует, что актуальным является разработка аппарата микроволновых излучений сверхнизкой интенсивности с частотой 1 ГГц и мощностью излучения  $\leq 10$  мкВт, в котором используется низкочастотная биомодуляция в

виде циклического паттерна биотропных параметров человека, как для физиотерапевтических целей, так и для проведения экспериментальных медико-биологических исследований.

**Цель исследования** – разработать портативный макетный образец программно-управляемого аппарата для генерации биомодулированных микроволн в диапазоне 1 ГГц сверхнизкой интенсивности  $\leq 10$  мкВт.

**Задачи исследования включают:**

1. Разработку структуры аппарата модульного типа, включающего блок питания, излучающий СВЧ-генератор, управляющий микроконтроллер, излучающий элемент в виде рамочной антенны.

2. Создание модели паттерна сигналов низкочастотной биомодуляции.

3. Формирование алгоритма управления микроконтроллером.

4. Разработку излучателя СВЧ-сигналов в виде рамочной антенны.

5. Проведение оценки эффективности функционирования разработанного программно-управляемого аппарата в экспериментальных условиях на мезенхимальных стволовых клетках человека.

## Материал и методы

Как известно, имеющиеся междисциплинарные научные проблемы могут быть разрешены, если использовать интеграцию интеллектуальных, научных, технических, административных, финансовых ресурсов в одном проекте.

В таком случае генеральной стратегией решения поставленных задач явля-

ется организация кластера трансляционной медицины [20], функционирующего на договорной основе.

Реализация целевых функций в нем обеспечивалась посредством привлечения финансовой составляющей проекта и с рекрутированием необходимых компетенций и нематериальных активов его подразделений для выполнения проекта. Обязательным условием является привлечение сотрудников, имеющих стратегические навыки мышления.

Инфраструктура кластера включает 6 модулей: 1) координатор кластера; 2) креативный модуль генерации инновационных идей с декомпозицией целей и функций проекта; 3) модуль системного программирования; 4) производственный модуль для технической реализации задач проекта; 5) модуль трансфера технологий; 6) модуль экспериментальных медико-биологических исследований.

Функционально каждый модуль относился к подразделениям высших учебных заведений Губкина, Белгорода, Воронежа:

1. Губкинский филиал Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова.

2. Кафедра пропедевтики внутренних болезней и клинических информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

3. Кафедра биологии Института инженерных технологий и естественных наук. НИУ «БелГУ».

4. Кафедра прикладной математики и механики Воронежского государственного технического университета.

Для преодоления трансляционных барьеров из сотрудников перечисленных кафедр и предприятий была создана междисциплинарная трансляционная команда, которая включает авторов проекта, специалистов по информационным технологиям (медики и системные программисты), инженеров (электроников и конструкторов), а также врачей-цитологов для оценки эффективности биотехнической системы микроволнового воздействия на биологические объекты растительного происхождения и мезенхимальные стволовые клетки человека.

Для решения поставленных задач использовалась методология системного анализа, теория принятия решений, теория управления и теория моделирования. В первую очередь была разработана

структурная модель макетного образца аппарата генерирующего микроволновые излучения в диапазоне частот 1 ГГц и сверхнизкоинтенсивной мощности  $\leq 10$  мкВт (рис. 1).

Структура микроволнового генератора включает: блок питания – 1; генерирующий модуль СВЧ – 2; микроконтроллер – 3; рамочную антенну – 4.

Генерирующий модуль сконструирован на базе микросхемы, которая в комплексе с генератором управляемого напряжения выполнена на кристалле цифрового синтезатора и аттенюатора в едином технологическом цикле. Дополненная внешним петлевым фильтром микросхема образует законченную систему синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты (ФАП). Встроенный ГУН настроен на частоту 1 ГГц с высокой добротностью сигнала порядка 100 кГц.

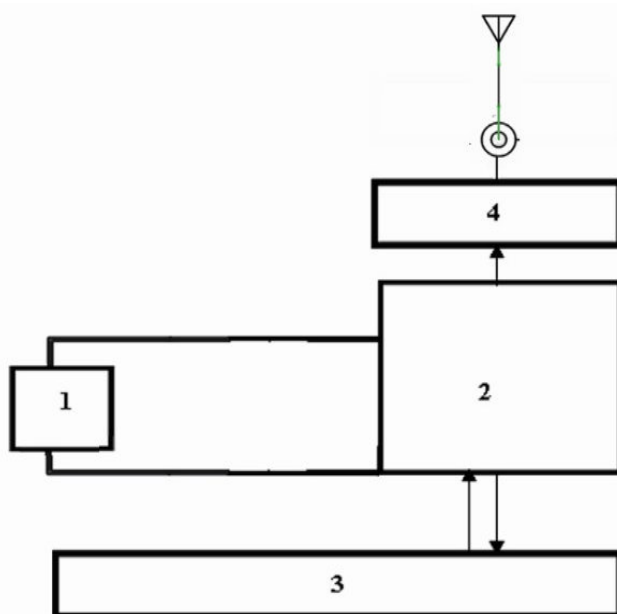


Рис. 1. Структура микроволнового генератора 1 ГГц

Fig. 1. Structure of a 1 GHz microwave generator

Применение встроенных делителей частоты на выходе петли ФАП позволяет дополнительно снизить уровень фазовых шумов выходного сигнала на 6–24 дБ. Вместе с фильтрующими свойствами самой петли ФАП это позволяет получить стабильный и спектрально-чистый выходной сигнал для применения в радиочастотном модуляторе на частоте 1 ГГц.

Звуковой индикатор работы устройства и световые индикаторы отображения информации на схеме не показаны (рис. 1).

Антенна устройства рамочного типа, проводник которой выполнен круглой формы диаметром 50 мм, из медной проволоки диаметром 2 мм. Антенна размещена в корпусе из поливинилхлорида, который имеет размер

(Д×Ш×В) 100×100×3 мм. Антенна подключается к основному блоку тонким и гибким коаксиальным кабелем RG-174 с волновым сопротивлением 50 Ом с использованием разъема SMA. В зависимости от назначения рамочной антенны кабель может иметь длину от 150 мм до 1000 мм. Эффективная площадь антенны составляет только 67% от геометрической площади антенны. Максимум СВЧ-излучения формируется в горизонтальной плоскости.

Длительность генерации электромагнитных излучений сантиметрового диапазона длин волн регулирует таймер времени, который реализован на микросхеме 555 серии. Электрическая принципиальная схема представлена ниже (рис. 2).

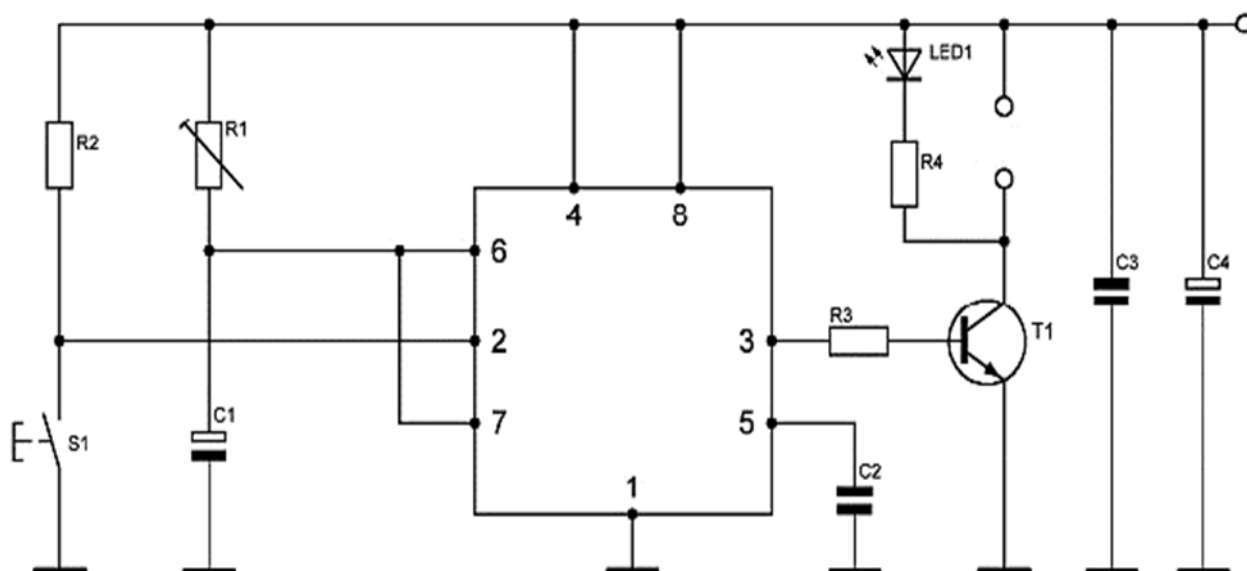


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема таймера

Fig. 2. Electrical schematic diagram of the timer

Схема работает следующим образом. На вход таймера (2) подается оди-ночный импульс, который приводит к пе-реклучению микросхемы и появлению на выходе (3) высокого уровня сигнала.

Продолжительность сигнала рас-считывается в секундах по формуле  $t = 1,1 \cdot R1 \cdot C1$ . По истечении заданного времени на выходе формируется сигнал низкого уровня. Вывод 4 объединен с выводом 8 и имеет высокий потенциал.

Поскольку рассматриваемый аппа-рат предполагается использовать в экс-периментальных исследованиях живого клеточного материала, необходимо рас-смотреть среду, в которой находятся так называемые стволовые клетки.

В частности, мезенхимальные ство-ловые клетки (МСК) интегрированы как в биохимические, так и в электрофизио-логические процессы, направленные на обеспечение разнообразных функций. Все отмеченные процессы носят цикли-ческий характер, связанный с работой управляющих систем и переходных про-цессов.

Структура нервной, сердечно-сосу-дистой и дыхательной системы имеет се-тевое фрактальное ветвление, что и обеспечивает оптимизацию процессов нейроуправления, кровоснабжения и га-зообмена.

При спокойном дыхании соотноше-ние длительности вдоха к выдоху в ды-хательном цикле равняется в среднем 1:1,3 (2:2,6 в секундах). При метрономи-зированном или резонансном дыхании длительность вдоха равна длительности

выдоха и составляет в сумме 10 секунд или 0,10 Гц.

В среднем при нормальных усло-виях частота сердечных сокращений со-ставляет 60 ударов в минуту, что соот-ветствует односекундному межпульсо-вому интервалу или частоте 1 Гц.

Элонгация пептидной цепи за счет присоединения аминокислот на рибосо-мах в среднем составляет 10 Гц. Опти-мизация капиллярного кровотока осу-ществляется с такой же частотой за счет мышечного тремора. Как известно, в се-редине 80-х годов академик Н. И. Арин-чин доказал, что мышцы, вибрируя на звуковой частоте, создают дополнитель-ное давление в капиллярах и венах. Это явление названо автором перифериче-ским сердцем.

Циклическая работа центра термо-регуляции с периодом 300 секунд обес-печивает перераспределение крови и то-нуса мышц. В эту цикличность уклады-вается и синтез рибонуклеиновой кис-лоты (РНК).

Околочасовой цикл от 20 до 200 ми-нут включает ритм клеточного деления. Именно этим временем ограничивается сеанс микроволнового воздействия. Все эти ритмы должны быть использованы в аппаратной системе в качестве низкоча-стотных сигналов биомодуляции, направленных на оптимизацию управле-ния процессом метаболизма.

Следовательно, интегральная модель биомодулированного СВЧ-воздействия должна соответствовать конкретному модельному паттерну управления сер-

дечно-сосудистой и дыхательной системы и процессам метаболизма, а также включать низкочастотную составляющую и временную композицию в виде длительности импульса и длительности паузы.

При реализации смоделированных паттернов модуляции использована форма амплитудной модуляции. Это обусловлено следующими обстоятельствами: при частотной модуляции частота промодулированной несущей меняется и может при определенных условиях достичь значения менее 990 МГц. Такие частоты изменяют гексагональную структуру воды на кубическую форму, которая может привести к зарождению очага онкологии.

По этой причине было принято решение применить амплитудную модуляцию несущего СВЧ-сигнала, увеличивая амплитуду на вдохе и уменьшая на вы-

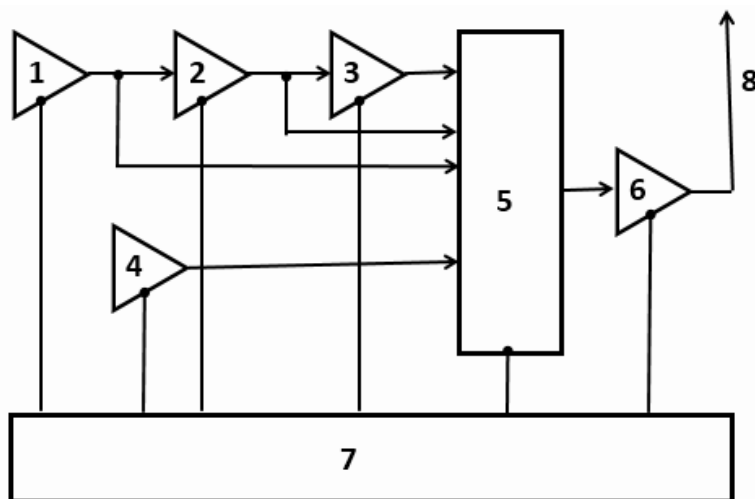
дохе. Это будет оптимизировать процедуру воздействия, поскольку в реальных условиях в этот момент усиливается артериальный кровоток и аэрация кислородом клеток организма.

Соотношение амплитуд сигналов было установлено по 33% между пульсовой составляющей, частотой элонгации 10 Гц и дыхательной составляющей частотой 0,10 Гц.

На рисунке 3 представлена структура низкочастотного биомодулятора.

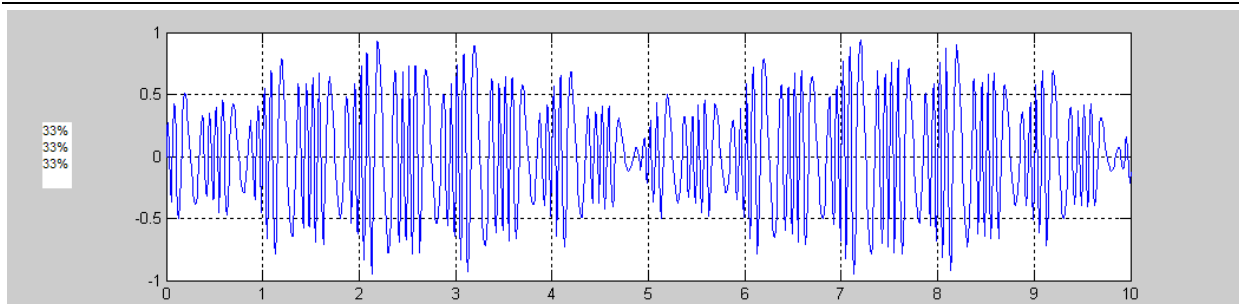
Все три низкочастотных сигнала поступают на смеситель, где складываются между собой, а затем по команде микроконтроллера и с несущим сигналом 1 ГГц. Далее несущая частота промодулированная низкочастотными биотропными сигналами поступает на излучающую антенну.

Рассмотрим амплитудную модуляцию биотропных параметров частотой 1 ГГц, 10 Гц и 0,10 Гц (рис. 4).



**Рис.3.** Низкочастотный биомодулятор: 1 – генератор 1 Гц; 2 – генератор 10 Гц; 3 – генератор 0,1 Гц; 4 – генератор 1 ГГц; 5 – смеситель; 6 – усилитель; 7 – микроконтроллер; 8 – антенна

**Fig.3.** Low-frequency biomodulator: 1 – 1 Hz generator; 2 – 10 Hz generator; 3 – 0,1 Hz generator; 4 – 1 GHz generator; 5 – mixer; 6 – amplifier; 7 – microcontroller; 8 – antenna



**Рис. 4.** Амплитудная модуляция биотропных параметров частотой 1 Гц, 10 Гц и 0,10 Гц

**Fig. 4.** Amplitude modulation of biotropic parameters with a frequency of 1 Hz, 10 Hz and 0,10 Hz

Микроконтроллер содержит программный код, реализующий управление низкочастотной биомодуляцией генерируемых микроволновых излучений в диапазоне 1 ГГц и выходной мощностью сигнала  $\leq 10$  мкВт на излучателе-антенне. Вся длительность процедуры воздействия 15 минут делится на три периода работы по 5 минут и паузы в 1 минуту после каждых 5 минут.

На рисунке 5 представлен общий вид макетного образца аппарата SYNCHROPULSAR AQUA.

Подача электроэнергии на аппарат осуществляется при помощи блока питания с выходным напряжением 5В и максимальным током нагрузки 2А. Подклю-

чение осуществляется через сетевой разъем расположенный на левой боковой панели. Включение аппарата осуществляется переключателем «Сеть», расположенным также на левой боковой панели.

Аппарат Syncypulsar Aqua работает в двух режимах:

- 1) режиме амплитудной биомодуляции;
- 2) режиме непрерывной генерации.

Переключение режима работы осуществляется клавишей на правой боковой панели. Обозначение «0» означает непрерывную генерацию. Обозначение «—» черточка указывает на режим амплитудной биомодуляции.



**Рис. 5.** Аппарат Syncypulsar Aqua с выносной рамочной антенной

**Fig. 5.** Syncypulsar Aqua device with a remote frame antenna



Аппарат Syncypulsar Aqua имеет возможность выбора выходной мощности частотного сигнала – 1 микроватт или 6 микроватт. При этом плотный контакт с антенной обеспечивает выходную мощность 6 микроватт. Наличие фланелевой прокладки толщиной 5 см обеспечивает выходную мощность 1 микроватт. Конструкцией прибора предусмотрена продолжительность цикла работы – 15 мин или 30 мин. Выбор времени цикла работы осуществляется кнопкой Start. Одно нажатие соответствует 15 минутам. После автоматического отключения зеленого светодиода повторное нажатие кнопки Start позволит продлить длительность воздействия на следующие 15 минут.

После автоматического отключения зеленого светодиода кнопки Start выносную антенну аппарата можно убрать с облучаемого объекта.

### **Оценка эффективности аппарата Syncypulsar Aqua**

Исследование проводили с использованием мезенхимальных стволовых клеток (МСК) человека, выделенных из жировой ткани. Культура клеток была приобретена в ООО «Биолот» (Россия).

Продолжительность опыта составила 9 дней. Один раз в сутки флаконы опытной группы устанавливали на 15 минут на рамочную антенну. Мезенхимальные стволовые клетки (МСК) культивировали в колбах с полноценной питательной средой DMEM/F12 с 10%-ной эмбриональной телячьей сывороткой (ПанЭко, Россия). После облуче-

ния культуральные флаконы с МСК помещали в CO<sub>2</sub>-инкубатор и культивировали при 37°C, 5% CO<sub>2</sub>, 100% влажности. После завершения эксперимента пролиферацию клеток оценивали путем подсчета количества клеток с помощью счетчика клеток Scepter 2.0 с наконечниками 40 мкм (Millipore, Merck/Sigma-Aldrich, США). Митохондриальную активность изучали с помощью флуоресцентного микроскопа Nikon Ti-S (Nikon, Япония) со специализированным программным обеспечением Nikon EZ-C1 FreeViewer (Nikon, Япония) с использованием флуоресцентного красителя MitoTracker™ Red CMXRos (ThermoFisher MitoTracker Red CMXRos) – красный флуоресцентный краситель, который окрашивает митохондрии в живых клетках. Данный краситель является флуоресцентным только при окислении в клетке, к этому красителю присоединена алкилирующая хлорметильная группа. Благодаря своему мембранному потенциалу функциональные митохондрии поглощают краситель.

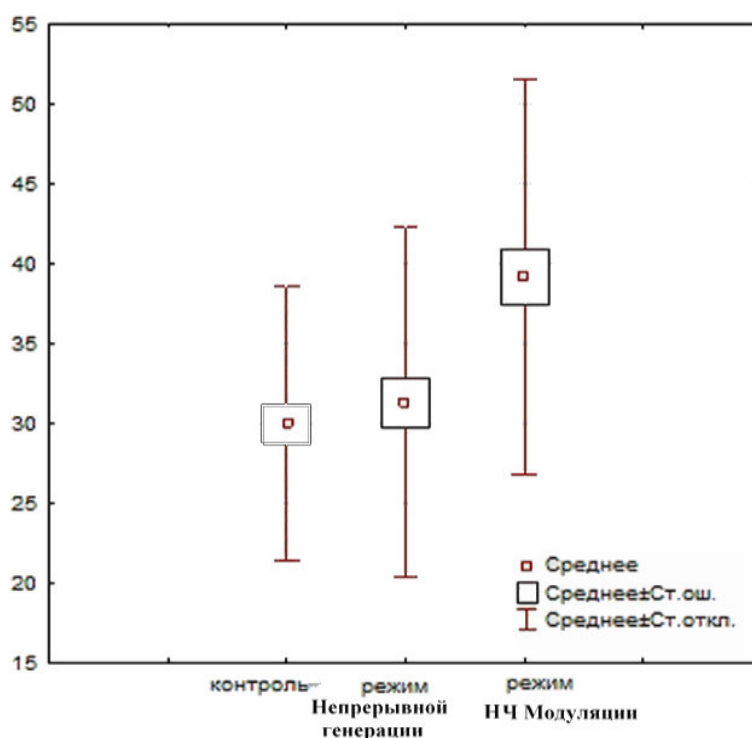
Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета статистических программ STATISTICA 6.0 (StatSoft Inc., США). Данные считались значимыми при  $p < 0,05$ . Использовался непараметрический критерий Вилкоксона, который нечувствителен к конкретному статистическому закону распределения.

### **Результаты и их обсуждение**

Интерфейс программы Nikon EZ-C1 FreeViewer (Nikon, Япония) позволял

получить цветные изображения с оконтуренными стволовыми клетками. В ходе исследования было установлено снижение количества клеток в опытных группах по сравнению с контролем. В контроле вычислено  $3,1 \times 10^6$  кл/мл, в режиме низкочастотной биомодуля-

ции –  $2,5 \times 10^6$  кл/мл; в режиме непрерывной генерации выявлено  $2,1 \times 10^6$  клеток/мл. Оценка интенсивности флуоресценции стволовых клеток в контроле и при различных режимах микроволнового излучения рассмотрена ниже (рис. 6).



**Рис. 6.** Влияние на интенсивность свечения МСК различных режимов генерации микроволн

**Fig. 6.** The effect of different microwave generation modes on the intensity of the MSCs glow

На графике (рис. 6) по оси ординат представлена интенсивность флуоресценции МСК в условных единицах, а по оси абсцисс даны значения в контроле, при непрерывной генерации и при низкочастотной модуляции. В частности, уровень интенсивности свечения изучался в 50 клетках каждого эксперимента ( $M \pm SD$ ): контроль  $30 \pm 8,58$ , непрерывная генерация  $31,28 \pm 10,97$ , низкочастотная биомодуляция  $39,18 \pm 12,39$ .

Из статистического анализа и представленного графика следует, что воздействие микроволнового излучения сверхнизкой интенсивности в режиме контроля и в опыте с непрерывной генерацией статистически достоверно не отличаются ( $p = 0,62$ ).

Результаты сверхнизкоинтенсивного СВЧ-воздействия при непрерывной генерации и в режиме биомодуляции отличаются статистически достоверно ( $p = 0,003$ ).

Также достоверно отличаются полученные результаты в режиме биоимодуляции и в контроле (при отсутствии излучения  $p = 0,00001$ ).

Таким образом, сравнительный флуоресцентный анализ митохондрий показывает, что использование низкочастотной биоимодуляции несущего СВЧ-сигнала приводит к значительному увеличению активности митохондрий.

## Выводы

Итак:

1. Разработана структура портативного программно-управляемого устройства для генерации микроволнового сверхнизкоинтенсивного излучения частотой 1 ГГц и мощностью  $\leq 10$  мВт, включающего модуль СВЧ-генерации, генераторы низкой частоты 0,10 Гц, 1 Гц и 10 Гц, модуль таймера, микропроцессора и излучающий элемент в виде рамочной антенны.

Устройство обеспечивает возможность автоматического управления глубиной амплитудной модуляции несущего терапевтического сигнала посредством задаваемых соотношений низкочастотных сигналов.

2. Сформирована структура модели, направленная на коррекцию метаболических процессов мезенхимальных стволовых клеток человека. Модель включает биохимическую, гемодинамическую, моторную и нейрогуморальную составляющие. Биохимическая составляющая включает процесс элонгации или присоединения аминокислот при синтезе белка на рибосомах с частотой 10 Гц. Нейрогуморальная составляющая обеспечивает ритмические перераспре-

деления кровотока и тонуса мышц с частотой около 0,003 Гц (период около 5 минут, равный 1 циклу воздействия). Питательные вещества, необходимые для синтеза белка, приносятся вместе с кровью, периодичность выброса которой составляет в среднем 1 Гц. Дополнительно к этому объем кровотока модулируется дыхательным циклом со средней частотой 0,10 Гц.

3. Разработан циклический паттерн модели амплитудной модуляции низкочастотного несущего сигнала частотой 10 Гц и модулирующими сигналами 1 Гц и 0,10 Гц, отличающийся получением веретеновидной формы сложно-модулированного сигнала модуляции.

4. Созданы модели интегрального сигнала, полученного путем суммирования амплитуд трех сигналов в форме веретена с сигналами несущей частоты 1 ГГц, отличающиеся использованием процедуры смешения.

5. Разработаны модели для управления глубиной амплитудной модуляции за счет изменения процентного соотношения амплитуд низкочастотных сигналов частотой 1 Гц, 10 Гц и 0,10 Гц, отличающиеся выбором трех режимов: 1) преобладание пульсовой составляющей; 2) преобладание дыхательной составляющей; 3) паритет всех частот (33% – 33% – 33%).

6. В лабораторном эксперименте показано, что выбранные модели и реализованное на их базе устройство для генерации микроволн сверхнизкой интенсивности обеспечивают значительное увеличение активности митохондрий мезенхимальных стволовых клеток в режиме биоимодуляции.

### Список литературы

1. Human Multipotent Mesenchymal Stromal Cell-Derived Extracellular Vesicles Enhance Neuroregeneration in a Rat Model of Sciatic Nerve Crush Injury / S. V. Demyanenko, M. A. Pitinova, Y. N. Kalyuzhnaya, A. M. Khaitin, S. A. Batalshchikova, N. M. Dobaeva, Y. A. Shevtsova, K. V. Goryunov, E. Y. Plotnikov, S. G. Pashkevich, G. T. Sukhikh, D. N. Silachev // *International Journal Molecular Sciences*. 2022. N 23 (15). P. 8583. <https://doi.org/10.3390/ijms23158583>.
2. Xiao L., Nasu M. From regenerative dentistry to regenerative medicine: progress, challenges, and potential applications of oral stem cells // *Stem Cells and Cloning: Advances and Applications*. 2014. N 7. P. 89–99.
3. Potdar P. D., Jethmalani Y. D. Human dental pulp stem cells: Applications in future regenerative medicine // *World J. Stem Cells*. 2015. N 7 (5). P. 839–851.
4. Bakopoulou A., About I. Stem cells of dental origin: Current research trends and key milestones towards clinical application // *Stem Cells International*. 2016. N 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.1155/2016/4209891>.
5. Narang S., Sehgal N. Stem cells: A potential regenerative future in dentistry // *Indian J. Hum. Genet.* 2012. N 18 (2). P. 150–154.
6. Грудянов А. И., Сысоева В. Ю., Терновой Ю. В. Стволовые клетки и возможности их применения в пародонтологии // *Стоматология*. 2012. № 1 (1). С. 18–29.
7. Kim J.-Y., Kim M.-R., Kim S.-J. Modulation of osteoblastic/odontoblastic differentiation of adult mesenchymal stem cells through gene introduction: A brief review // *J. Korean Assoc. Oral Maxillofac. Surg.* 2013. N 39. P. 55–62.
8. Pérez-Silos V., Camacho-Morales A., Fuentes-Mera L. Mesenchymal stem cells subpopulations: Application for orthopedic regenerative medicine // *Stem Cells International*. 2016. N 2. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/3187491>.
9. Влияние импульсного низкоинтенсивного лазерного излучения красного (635 нм) и инфракрасного (904 нм) спектров на мезенхимальные стволовые клетки человека *in vitro* / С. В. Москвин, Д. Ю. Ключников, Е. В. Антипов, С. Е. Волчков, О. Н. Киселева // *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2014. № 91 (6). С. 40–47.
10. Li W. T., Chen C. W., Huang P. Y. Effects of low level light irradiation on the migration of mesenchymal stem cells derived from rat bone marrow // *Conference Proceedings IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2013. P. 4121–4124.
11. Blue laser irradiation generates intracellular reactive oxygen species in various types of cells / T. Kushibiki, T. Hirasawa, S. Okawa, M. Ishihara // *Photomed. Laser Surg.* 2013. N 31 (3). P. 95–104.
12. Казначеев В. П., Михайлова Л. П. Сверхслабые излучения в межклеточных взаимодействиях. Новосибирск: Наука, 1981. 275 с.

13. Бурлакова Е. Б., Конрадов А. А., Мальцева Е. Л. Действие сверхмалых доз биологически активных веществ и низкоинтенсивных физических факторов // Химическая физика. 2003. Т. 22, № 2. С. 21–40.
14. Background millimeter radiation influence in cardiology on patients with metabolic and pre-metabolic syndrome / F. A. Pyatakovich, S. Caramel, S. Stagnaro, T. I. Yakunchenko, K. F. Makkonen, O. N. Moryleva // Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2014. N 33 (1). P. 1–18.
15. Загускин С. Л. Методы и устройства хронодиагностики и биоуправляемой хронофизиотерапии // Современные вопросы биомедицины. 2018. Т. 2 (3). С. 71–79.
16. Персонафицированная сверхнизкоинтенсивная ДМВ-терапия у больных сахарным диабетом II типа / Ф. А. Пятакович, О. В. Мевша, Т. И. Якунченко, К. Ф. Макконен // Курортная медицина. 2018. № 3. С. 70–72.
17. Introducing a Polypyrrole (PPy)-Manganese Ferrite ( $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ) Nanocomposite Based Microwave Absorber for Studying the Effect of the Radiation on the Modification of the Patient's Functional State / F. A. Pyatakovich, O. V. Mevsha, T. I. Yakunchenko, K. F. Makkonen, V. M. Uvarov // J. Nanostruct. 2022. N 12 (2). P. 245–253. <https://doi.org/10.22052/JNS.2022.02.003>.
18. Петросян В. И. Радиофизика воды и жизни. Вода, парадоксы и величие малых величин. Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing Ru, 2017. 500 с.
19. Петросян В. И. Aqua-фазо-волновая природа канцерогенеза. Канцерогенные и терапевтические радиоволны биосферы. Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing Ru, 2018. 96 с.
20. Translational Research in the Development of a Gaming Bio-Controlled Module / F. A. Pyatakovich, T. I. Yakunchenko, K. F. Makkonen, O. V. Mevsha // Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems. 2018. Vol. 10. P. 1847–1852.

## References

1. Demyanenko S. V., Pitinova M. A., Kalyuzhnaya Y. N., Khaitin A. M., Batalshchikova S. A., Dobaeva N. M., Shevtsova Y. A., Goryunov K. V., Plotnikov E. Y., Pashkevich S. G., Sukhikh G. T., Silachev D. N. Human Multipotent Mesenchymal Stromal Cell-Derived Extracellular Vesicles Enhance Neuroregeneration in a Rat Model of Sciatic Nerve Crush Injury. *International Journal Molecular Sciences*, 2022, no. 23 (15), p. 8583. <https://doi.org/10.3390/ijms23158583>
2. Xiao L., Nasu M. From regenerative dentistry to regenerative medicine: progress, challenges, and potential applications of oral stem cells. *Stem Cells and Cloning: Advances and Applications*, 2014, no. 7, pp. 89–99.
3. Potdar P. D., Jethmalani Y. D. Human dental pulp stem cells: Applications in future regenerative medicine. *World J. Stem Cells*, 2015, no. 7 (5), pp. 839–851.
4. Bakopoulou A., About I. Stem cells of dental origin: Current research trends and key milestones towards clinical application. *Stem Cells International*, 2016, no. 1, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1155/2016/4209891>

5. Narang S., Sehgal N. Stem cells: A potential regenerative future in dentistry. *Indian J. Hum. Genet.*, 2012, no. 18 (2), pp. 150–154.
6. Grudyanov A. I., Sysoeva V. Yu., Ternovoi Yu. V. Stvolovye kletki i vozmozhnosti ikh primeneniya v parodontologii [Stem cells and the possibilities of their use in periodontology]. *Stomatologiya = Dentistry*, 2012, no. 1 (1), pp. 18–29.
7. Kim J.-Y., Kim M.-R., Kim S.-J. Modulation of osteoblastic/odontoblastic differentiation of adult mesenchymal stem cells through gene introduction: A brief review. *J. Korean Assoc. Oral Maxillofac. Surg.*, 2013, no. 39, pp. 55–62.
8. Pérez-Silos V., Camacho-Morales A., Fuentes-Mera L. Mesenchymal stem cells subpopulations: Application for orthopedic regenerative medicine. *Stem Cells International*, 2016, no. 2, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/3187491>
9. Moskvina S. V., Klyuchnikov D. Yu., Antipov E. V., Volchkov S. E., Kiseleva O. N. Vliyanie impul'snogo nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya krasnogo (635 nm) i infrakrasnogo (904 nm) spektrov na mezenkhimal'nye stvolovye kletki cheloveka in vitro [The effect of pulsed low-intensity laser radiation of red (635 nm) and infrared (904 nm) spectra on human mesenchymal stem cells in vitro]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury = Questions of Balneology, Physiotherapy and Therapeutic Physical Culture*, 2014, no. 91 (6), pp. 40–47.
10. Li W. T., Chen C. W., Huang P. Y. Effects of low level light irradiation on the migration of mesenchymal stem cells derived from rat bone marrow. *Conference Proceedings IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2013, pp. 4121–4124.
11. Kushibiki T., Hirasawa T., Okawa S., Ishihara M. Blue laser irradiation generates intracellular reactive oxygen species in various types of cells. *Photomed. Laser Surg.*, 2013, no. 31 (3), pp. 95–104.
12. Kaznacheev V. P., Mikhailova L. P. Sverkhslabye izlucheniya v mezhkлетochnykh vzaimodeystviyakh [Ultra-weak radiation in intercellular interactions]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 275 p.
13. Burlakova E. B., Konradov A. A., Mal'tseva E. L. Deistvie sverkhmal'nykh doz biologicheskii aktivnykh veshchestv i nizkointensivnykh fizicheskikh faktorov [The effect of ultra-low doses of biologically active substances and low-intensity physical factors]. *Khimicheskaya fizika = Chemical Physics*, 2003, vol. 22, no. 2, pp. 21–40.
14. Pyatakovich F. A., Caramel S., Stagnaro, S., Yakunchenko T. I., Makkonen K. F., Moryleva O. N. Background millimeter radiation influence in cardiology on patients with metabolic and pre-metabolic syndrome. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, no. 33 (1), pp. 1–18.
15. Zaguskin S. L. Metody i ustroystva khronodiagnostiki i bioupravlyaemoi khronofizioterapii [Methods and devices of chronodiagnosics and bio-controlled chronophysiotherapy]. *Sovremennye voprosy biomeditsiny = Modern Issues of Biomedicine*, 2018, vol. 2 (3), pp. 71–79.
16. Pyatakovich F. A., Mevsha O. V., Yakunchenko T. I., Makkonen K. F. Personalizirovannaya sverkh nizko intensivnaya DMV-terapiya u bol'nykh sakharnym diabetom II tipa [Personalized ultra-low intensive DMV therapy in patients with type II diabetes mellitus]. *Kurortnaya meditsina = Resort Medicine*, 2018, no. 3, pp. 70–72.

17. Pyatakovich F. A., Mevsha O. V., Yakunchenko T. I., Makkonen K. F., Uvarov V. M. Introducing a Polypyrrole (PPy)-Manganese Ferrite ( $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ) Nanocomposite Based Microwave Absorber for Studying the Effect of the Radiation on the Modification of the Patient's Functional State. *J. Nanostruct.*, 2022, no. 12 (2), pp. 245–253. <https://doi.org/10.22052/JNS.2022.02.003>
18. Petrosyan V. I. Radiofizika vody i zhizni. Voda, paradoksy i velichie malykh velichin [Radiophysics of water and life. Water, paradoxes and the greatness of small quantities]. Verlag, LAP LAMBERT Academic Publishing Ru, 2017. 500 p.
19. Petrosyan V. I. Aqua-fazo-volnovaya priroda kantserogeneza. Kantserogennye i terapevticheskie radiovolny biosfery [Aqua-phase-wave nature of carcinogenesis. Carcinogenic and therapeutic radio waves of the biosphere]. Verlag, LAP LAMBERT Academic Publishing Ru, 2018. 96 p.
20. Pyatakovich F. A., Yakunchenko T. I., Makkonen K. F., Mevsha O. V. Translational Research in the Development of a Gaming Bio-Controlled Module [Translational research in the development of a game bio-controlled module]. *Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems*, 2018, vol. 10, pp. 1847–1852.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Евтушенко Николай Дмитриевич**, радиоинженер, заместитель директора по учебной работе, Губкинский филиал Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова, г. Губкин, Российская Федерация, e-mail: [nickend@mail.ru](mailto:nickend@mail.ru), ORCID: 0000-0003-2708-0357

**Nikolay D. Yevtushenko**, Radio Engineer, Deputy Director for Academic Affairs, Gubkin Branch Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Gubkin, Russian Federation, e-mail: [nickend@mail.ru](mailto:nickend@mail.ru), ORCID: 0000-0003-2708-0357

**Пятакович Феликс Андреевич**, доктор медицинских наук, заслуженный работник Высшей школы Российской Федерации, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней и клинических информационных технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [piatakovich@gmail.com](mailto:piatakovich@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7603-1936

**Felix A. Pyatakovich**, Dr. of Sci. (Medical), Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Professor of the Department of Propaedeutics of Internal Diseases and Clinical Information Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [piatakovich@gmail.com](mailto:piatakovich@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7603-1936

**Якунченко Татьяна Игоревна**, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой пропедевтики внутренних болезней и клинических информационных технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация,  
e-mail: yakunchenko@bsu.edu.ru,  
ORCID: 0000-0002-4031-6267

**Артамонов Михаил Юрьевич**, кандидат медицинских наук, руководитель, Американское общество медицинских газов, г. Ист-Страудсбург, Соединенные Штаты Америки,  
e-mail: DrMike@mjahealthcare.com,  
ORCID: 0000-0002-8666-4398

**Tatiana I. Yakunchenko**, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Head of the Department of Propaedeutics of Internal Diseases and Clinical Information Technologies, Belgorod State National Research University, Belglrod, Russian Federation,  
e-mail: yakunchenko@bsu.edu.ru,  
ORCHID: 0000-0002-4031-6267

**Mikhail Y. Artamonov**, Cand. of Sci. (Medical), Head, American Society of Medical Gases, East Stroudsburg, United States of America,  
e-mail: DrMike@mjahealthcare.com,  
ORCID: 0000-0002-8666-4398



<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-41-63>

## Метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга источников радиоизлучения с квадратурной амплитудной модуляцией спутниковых систем связи

И. Г. Бабанин<sup>1</sup> ✉, И. Е. Мухин<sup>2</sup>, Е. Ю. Бабанина<sup>1</sup>, А. В. Хмелевская<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Акционерное общество «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова  
ул. Запольная 47, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: babanin\_ivan@bk.ru

### Резюме

**Цель исследования** – разработка метода параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга источников радиоизлучения с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности спутниковых систем связи.

**Методы.** При проведении исследований и разработке метода синтеза системы обеспечения электромагнитного доступа использовались методы теории вероятностей, математической статистики, статистической радиотехники и вычислительная математика. В качестве принятых допущений рассмотрены сигнальные созвездия с квадратурной амплитудной модуляцией позиционностью  $L$  не более 256 и неравномерностью  $X = 1$ . Данное решение обосновано их использованием в современных и перспективных спутниковых радиосистемах передачи информации. В работе все результаты вероятности достоверности принятых данных средствами радиомониторинга отражены для случая с жестким принятием решений.

**Результаты.** Разработаны математические модели зависимости эквивалентных энергетических потерь в структурно-функциональных узлах от дестабилизирующих факторов при заданной вероятности достоверности приёма на символ сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией; определена интегральная оценка качества ведения радиомониторинга фиксированных и подвижных спутниковых линий связи; произведена оценка стоимости создания на отечественной и иностранной базах таких радиотехнических трактов, как антенно-фидерный, приёмно-селектирующий, демодулирующий; разработана процедура параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга к ресурсам спутниковых линий связи, учитывающая показатели эффективности обеспечения электромагнитного доступа.

**Выводы.** Представлен метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга цифровых спутниковых линий связи со сложными видами модуляции, отличающийся от известных учетом энергетических потерь в структурно-функциональных узлах, ранее пренебрегаемых из-за их низкого влияния, связанного с малыми скоростями обмена данными.

**Ключевые слова:** параметрический синтез; система обеспечения электромагнитного доступа; радиомониторинг; квадратурная амплитудная модуляция; спутниковые системы связи; целевой эффект операции; совокупные затраты; эффективность создания новых элементов системы; вероятность достижения цели; энергетические потери; достоверность принятых данных.

© Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Бабанина Е. Ю., Хмелевская А. В., 2022

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

**Для цитирования:** Метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга источников радиоизлучения с квадратурной амплитудной модуляцией спутниковых систем связи / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин, Е. Ю. Бабанина, А. В. Хмелевская // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 41–63. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-41-63>.

Поступила в редакцию 11.09.2022

Подписана в печать 10.10.2022

Опубликована 22.12.2022

## Method of Parametric Synthesis of Systems for Providing Electromagnetic Access for Radio Monitoring Facilities of Radio Emission Sources with Quadrature Amplitude Modulation of Satellite Communication Systems

Ivan G. Babanin<sup>1</sup>✉, Ivan E. Mukhin<sup>2</sup>, Ekaterina Yu. Babanina<sup>1</sup>, Alena V. Khmelevskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Joint-stock company "Aviaavtomatika" named after V. V. Tarasova  
47 Zapolnaya Str., Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: babanin\_ivan@bk.ru

### Abstract

**The purpose of research** development of a method for parametric synthesis of systems for providing electromagnetic access by means of radio monitoring of radio emission sources with quadrature amplitude modulation of various positioning of satellite communication systems.

**Methods.** Probability theory, mathematical statistics, statistical radio engineering and computational mathematics were used in conducting research and developing a method for synthesizing an electromagnetic access system. Signal constellations with quadrature amplitude modulation with positivity  $L$  no more than 256 and nonuniformity  $X = 1$  are considered as accepted assumptions. This decision is justified by their use in modern and promising satellite radio systems for information transmission. In the paper, all the results of the probability of reliability of the received data by means of radio monitoring are reflected for the case of rigid decision-making.

**Results.** Mathematical models of the dependence of equivalent energy losses in structural and functional nodes on destabilizing factors have been developed for a given probability of reliability of receiving signals with quadrature amplitude modulation on the symbol; an integral assessment of the quality of radio monitoring of fixed and mobile satellite communication lines has been determined; the cost of creating such radio engineering paths as antenna-feeder on domestic and foreign bases has been estimated, receiving-selecting, demodulating; A procedure has been developed for parametric synthesis of systems for providing electromagnetic access of radio monitoring facilities to the resources of satellite communication lines, taking into account the efficiency indicators of providing electromagnetic access.

**Conclusion.** The scientific work presents a method of parametric synthesis of systems for providing electromagnetic access to radio monitoring means of digital satellite communication lines with complex types of modulation, which differs from the known ones by taking into account energy losses in structural and functional units previously neglected due to their low influence associated with low data exchange rates.

**Keywords:** parametric synthesis; electromagnetic access system; radio monitoring; quadrature amplitude modulation; satellite communication systems; target effect of the operation; total costs; efficiency of creating new system elements; probability of achieving the goal; energy losses; reliability of received data.

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

**For citation:** Babanin I. G., Mukhin I. E., Babanina E. Yu., Khmelevskaya A. V. Method of Parametric Synthesis of Systems for Providing Electromagnetic Access for Radio Monitoring Facilities of Radio Emission Sources with Quadrature Amplitude Modulation of Satellite Communication Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022; 12(4): 41–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-41-63>.

Received 11.09.2022

Accepted 10.10.2022

Published 22.12.2022

## Введение

Одной из важных задач государства в сфере телекоммуникаций является эффективное регулирование использования радиочастотного спектра. Решение этой задачи подразумевает ряд юридических, административных, научных и технических процедур, а также финансовых механизмов, которые способны обеспечить работу радиоэлектронных средств различного назначения без взаимных помех.

Юридической основой регулирования использования радиочастотного спектра является Федеральный закон «О связи» № 126-ФЗ от 2003 г., в соответствии с которым указанные функции в рамках Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации выполняет Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ).

Исполнение решений ГКРЧ, содержащее перечень организационных и технических мер по обеспечению надлежащего использования радиочастот и соответствующих РЭС, возложено на радиочастотную службу, которая специально уполномочена в области обеспечения регулирования использования радиочастот

и радиоэлектронных средств при федеральном органе исполнительной власти в области связи. Основной задачей радиочастотной службы является мониторинг электромагнитной обстановки, под которой следует понимать совокупность электромагнитных излучений, образованных вследствие совместной работы радиоэлектронных средств, а также иных источников непреднамеренных радиопомех, зафиксированных в точке расположения контролирующей радиоприёмной системы.

Непрерывное совершенствование цифровых линий связи (ЦЛС) в направлении расширения границ диапазона частот, усложнения видов модуляции путем использования многопозиционных сигналов с комбинированными видами модуляции, возрастания скоростей передачи информации привело к существенному снижению эффективности применения стоящих на оснащении типовых РЧС мониторинга вследствие сокращения количества электромагнитно доступных источников радиоизлучения [1].

Таким образом, актуальной научной проблемой является разработка процедуры параметрического синтеза современных систем обеспечения электромаг-

нитного доступа средствами радиомониторинга к источникам радиоизлучения современных и перспективных спутниковых систем связи.

### Материалы и методы

Синтез современных и перспективных систем обеспечения электромагнитного доступа (СОЭМД) средствами радиомониторинга (СРМ) осуществляется в два этапа. Первой итерацией выполняется структурный синтез СОЭМД, второй – параметрический. Результатом параметрического синтеза СОЭМД являются найденные оптимальные значения экономо-технических характеристик (ЭТХ) составных частей антенно-фидерного (АФУ), приёмно-селектирующего (ПСУ), демодулирующего (ДУ) устройств по критерию максимизации эффективности процессов синтеза структурно-функциональных узлов системы. В данном случае эффективность следует оценивать по соотношению целевого эффекта операции по обеспечению электромагнитного доступа (ЭМД) и совокупных затрат.

Для СОЭМД целевым эффектом «вскрытия» радиоэлектронных средств (РЭС) является доля обнаруженных и демодулированных сигналов с качеством, не хуже заданного, от источников радиоизлучения (ИРИ) спутниковых систем связи (ССС) относительно всех потенциально доступных ИРИ в зоне наблюдения [2]:

$$v_m = \frac{N_1}{N_{\Sigma}}, \frac{N_2}{N_{\Sigma}} \dots \frac{N_m}{N_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где  $N_m$  – обнаруженные источники  $m$ -го типа;  $N_{\Sigma m}$  – потенциально доступные источники  $m$ -го типа.

Целевой эффект обеспечения ЭМД зависит от возможности установления отношения сигнал-шум (ОСШ) на входе решающего устройства (РУ), осуществляющего прием сигналов при требуемых вероятностях ошибки.

Так, при синтезе СОЭМД, а именно достижении заданного целевого эффекта обеспечения электромагнитного доступа, следует принимать во внимание внешнесистемные факторы, возникающие в канале СРМ ИРИ ССС, который в общем случае не совпадает с каналом связи, и внутрисистемные – определяющие эквивалентные энергетические потери (ЭЭП) в самой СОЭМД.

Применительно к стационарным и мобильным позициям СРМ ИРИ ССС уравнение энергетического баланса учитывает неоптимальные условия размещения приемной системы и требования универсальности АФУ, ПСУ, ДУ [3; 4; 5]:

$$P_{\text{рдм}}^i = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} - L_0 - L_G - L_R - L_p - L_c + G_{\text{пр}}(\theta_a) - G_{\text{фид}} - \Delta_k^i - P_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{рдм}}^i$  – мощность  $i$ -го сигнала на входе РУ СОЭМД;  $P_{\text{пер}}$  – мощность передатчика;  $G_{\text{пер}}$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $L_0$  – энергетические потери в свободном пространстве;  $L_G$  – энергетические потери в атмосферных газах;  $L_R$  – затухание в гидрометеоро-рах;  $L_p$  – затухание из-за деполяризации

сигнала;  $L_c$  – потери из-за рефракции и погрешности наведения на искусственный спутник Земли;  $G_{\text{пр}}(\theta_a)$  – коэффициент усиления приёмной антенны со случайной ориентацией  $\theta_a$  по отношению к передающей антенне;  $G_{\text{фид}}$  – потери в фидере приёмной антенне;  $\Delta_k^i$  – шумовые / нешумовые энергетические потери в СОЭМД;  $P_{\text{пр}}$  – защитное отношение сигнал-шум на входе РУ СОЭМД.

Из выражения (2) внешнесистемными факторами непрерывного канала, определяющими ЭМД ИРИ, являются потери в свободном пространстве  $L_0$ , потери в атмосферных газах  $L_G$ , затухание в гидрометеорах (дождь, туман, облака)  $L_R$ , затухание из-за деполяризации сигнала при распространении  $L_p = 0,5$  дБ, потери из-за рефракции и погрешности наведения на искусственный спутник Земли (ИСЗ)  $L_c = 0,5$  дБ.

Из работ [1; 2; 6; 7] вышеприведенные энергетические потери определяются выражениями (3) – (9). Затухание сигнала в свободном пространстве (дБ) определяется

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

где  $f$  – несущая частота сигнала, ГГц;  $r$  – длина трассы радиомониторинга.

Протяженность трассы радиомониторинга (км) определяется

$$r = 42710 \sqrt{1 - 0,295 \cos(\theta_E - \theta_S) \cos(\psi_E)}, \quad (4)$$

где  $\psi_E, \theta_E$  – широта и долгота СОЭМД СРМ ИРИ ССС, град;  $\theta_S$  – долгота подспутниковой точки ИСЗ, град.

Затухание сигнала в атмосферных газах (дБ) определяется

$$L_G = (\gamma_O r_O + \gamma_W r_W) \operatorname{cosec}(\beta), \quad (5)$$

где  $r_O \approx 5,3$  км – эквивалентная длина зенитной радиотрассы в кислороде, км;  $r_W \approx 2,1$  км – эквивалентная длина зенитной радиотрассы в водяном паре, км;  $\beta$  – угол места СОЭМД СРМ, град;  $\gamma_O, \gamma_W$  – погонные затухания в кислороде и водяном паре, определяемые выражениями (при атмосферном давлении 1013 кПа), дБ/км:

$$\gamma_O = [1 - 0,01(t - 15)] 7,19 \cdot 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,5} f^2 \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

для  $f \leq 54$  ГГц;

$$\gamma_W = [1 - 0,06(t - 15)] \times \left[ 0,05 + 2,1 \cdot 10^{-3} \rho + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9} \right] \cdot \rho \cdot f^2 \cdot 10^{-4}, \quad (7)$$

для  $f \leq 180$  ГГц,

где  $t$  – температура воздуха, °С, типовое значение 15°С;  $\rho$  – концентрация водяных паров в атмосфере, г/м³, типовое значение  $\rho = 7,5$  г/м³.

Затухание сигнала в гидрометеорах (дБ) рассчитывается по формуле

$$L_R = [K_l(P_C + V_F r_F) + \gamma_J r_J] \operatorname{cosec}(\beta), \quad (8)$$

где  $K_l$  – коэффициент погонного затухания в тумане и облаках при температуре 0°С, дБ/км/г/м³;  $P_C$  – нормированный общий столбчатый объем жидкой воды, содержащийся в облаках, превышаемый

0,5% времени среднего года (для территории РФ  $P_C = 1 \text{ кг/м}^2$ ),  $\text{кг/м}^2$ ;  $V_F = 0,05 \text{ г/м}^3$  – водность среднего тумана ( $0,5 \text{ г/м}^3$  – густого тумана),  $\text{г/м}^3$ ;  $r_F = (0,3 \dots 0,5) \text{ км}$  – зенитная длина радиотрассы в тумане,  $\text{км}$ ;  $\gamma_J$  – погонное затухание в дожде,  $\text{дБ/км}$ ;  $r_J$  – зенитная длина радиотрассы в дожде (для территории РФ  $r_J = 3,36 \text{ км}$ ),  $\text{км}$ .

Затухание в дожде ( $\text{дБ/км}$ ) определяется из выражения

$$\gamma_J = b \cdot J_{0,005}^a, \quad (9)$$

где  $J_{0,005}$  – интенсивность осадков,  $\text{мм/ч}$ ;  $b, a$  – коэффициенты в соответствии с рекомендацией ITU-RP.838-3.

Помимо рассмотренных выше внешнесистемных факторов на достижение целевого эффекта обеспечения ЭМД влияют и внутрисистемные дестабилизирующие факторы, которые могут возникать (рис. 1):

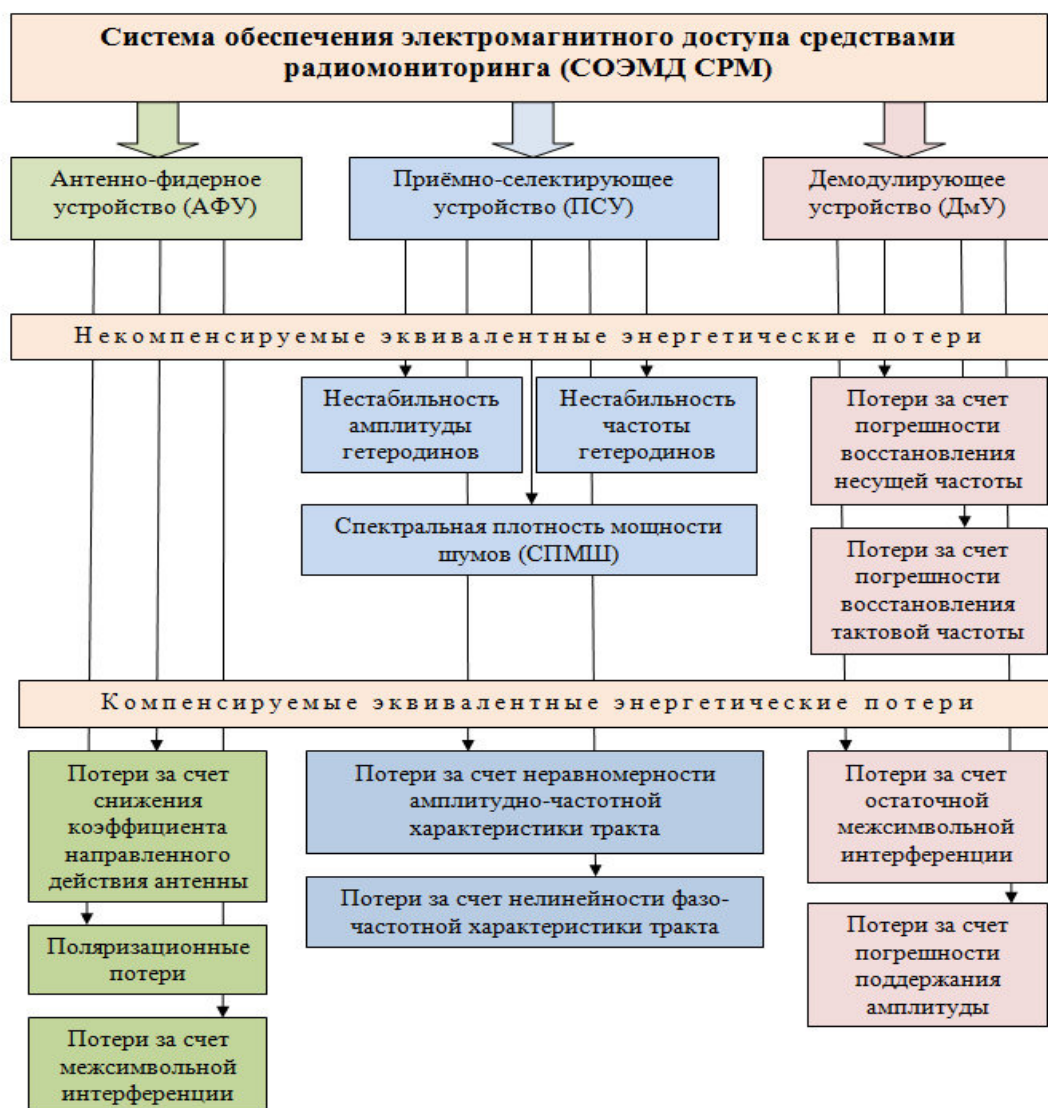


Рис. 1. Классификация видов энергетических потерь в СОЭМД СРМ ИРИ CCC [2; 4; 5; 8]

Fig. 1. Classification of the types of energy losses in ITS CPM IRI SS [2; 4; 5; 8]

– в АФУ из-за потерь за счет снижения коэффициента направленного действия (КНД), многолучевого распространения радиоволн, поляризационных потерь и других;

– в ПСУ из-за нестабильности частоты и амплитуды гетеродинов, неравномерности амплитудно-частотной ха-

рактеристики (АЧХ) и нелинейности фазочастотной характеристики (ФЧХ), тепловых шумов тракта и других;

– в ДУ вследствие погрешностей поддержания уровня входного сигнала и восстановления несущей и тактовой частот.

Потери внутри системы можно определить выражением:

$$\begin{aligned} \Delta = \Delta_{\text{АФУ}} + \Delta_{\text{ПСУ}} + \Delta_{\text{ДМУ}} + \Delta_{\text{ДУ}} = \sum_i \Delta_{\text{ак}}^i (K_{\text{ш}}^i(f)) + \sum_v \Delta_{\text{мшу}}^v (K_{\text{ш}}^v(f)) + \sum_u \Delta_{\text{см}}^u (K_{\text{ш}}^u(f)) + \\ + \Delta_{\text{фидер}} (K_{\text{ш}}(f)) + \Delta_{\text{антенна}} (K_{\text{ш}}(f)) + \sum_j \Delta_{\text{комм}}^j (K_{\text{ш}}^j(f)) + \sum_p \Delta_{\text{упч}}^p (K) + \\ + \sum_e \Delta_{\text{атт}}^e (K) + \sum_r \Delta_{\text{пф}}^r (\delta_{\text{ачх}}) + \sum_t \Delta_{\text{пф}}^t (\delta_{\text{фчх}}) + \sum_k \Delta_{\text{гет}}^k (G_v^k(M)) + \Delta_{\text{свн}} (\delta_f) + \\ + \Delta_{\text{свтч}} (\delta^0) + \Delta_{\text{увс}} (\delta_u) + \Delta_{\text{рас}} (\delta_{\text{ачх}}) + \Delta_{\text{омси}} (\delta_{\text{мси}}), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Delta_{\text{ак}}^i$  – потери на  $i$ -м антенном коммутаторе, вызванные шумами Джонсона;  $\Delta_{\text{мшу}}^v$  – потери в МШУ, которые обусловлены тепловыми шумами;  $\Delta_{\text{см}}^u$  – потери в смесителях, вызванные тепловыми шумами;  $\Delta_{\text{фидер}}$  – потери в фидерных линиях;  $\Delta_{\text{антенна}}$  – потери в антенном устройстве, обусловленные тепловыми шумами;  $\Delta_{\text{комм}}^j$  – потери в  $j$ -м коммутаторе, вызванные шумами Джонсона;  $\Delta_{\text{упч}}^p$  – потери в  $p$ -м усилителе промежуточной частоты;  $\Delta_{\text{атт}}^e$  – потери в  $d$ -м аттенюаторе;  $\Delta_{\text{пф}}^r (\delta_{\text{ачх}})$  – потери, обусловленные неравномерностью амплитудно-частотной характеристики  $r$ -го фильтра частотной селекции;  $\Delta_{\text{пф}}^t (\delta_{\text{фчх}})$  – потери, вызванные нелинейностью фазочастотной характеристики  $t$ -го фильтра частотной селекции;  $\Delta_{\text{гет}}^k (G_v^k)$  – потери в гетеродине вследствие неравномерности амплитудно-частотного спектра сигнала;

$\Delta_{\text{свн}} (\delta_f)$  – потери, обусловленные погрешностью СВНЧ;  $\Delta_{\text{свтч}} (\delta^0)$  – потери, обусловленные погрешностью СВТЧ ДУ;  $\Delta_{\text{увс}} (\delta_u)$  – потери, вызванные погрешностью поддержания уровня сигнала в ДУ;  $\Delta_{\text{рас}} (\delta_{\text{ачх}})$  – потери из-за расхождения форм амплитудно-частотной характеристики оптимального фильтра и амплитудного спектра сигнала;  $\Delta_{\text{омси}} (\delta_{\text{мси}})$  – потери из-за остаточной межсимвольной интерференцией.

Проведен анализ научных работ [1; 2], по результатам которого можно утверждать, что при применении криогенного оборудования неизменными остаются потери нешумового характера. Современный уровень развития средств радиомониторинга обуславливает актуальность исследования возникновения таких потерь, а также способов их компенсации в трактах.



Далее представлены математические зависимости между ЭЭП и дестабилизирующими параметрами в СОЭМД СРМ ИРИ с КАМ различной позиционности ССС:

1. *Некомпенсируемые эквивалентные энергетические потери* в ПСУ СОЭМД СРМ. Из результатов работы [2; 9; 10] получены математические выражения ЭЭП в зависимости от спектральной плотности мощности фазовых шумов (СПМФШ), абсолютной неустойчивости частоты гетеродинов, амплитудно-частотных, фазочастотных искажений трактов основной селекции.

На основе аппроксимации методом наименьших квадратов (МНК) результатов получены математические выражения зависимостей ЭЭП от СПМФШ гетеродина при различных позиционностях модуляции (рис. 2):

$$\Delta Q = 46 + 0,55 \cdot G_V -$$

для сигналов с КАМ-256; (11)

$$\Delta Q = 156,5 + 3,96 \cdot G_V + 0,025 \cdot G_V^2 -$$

для сигналов КАМ-128; (12)

$$\Delta Q = -12,85 - 1,39 \cdot G_V + 0,019 \cdot G_V^2 -$$

для сигналов с КАМ-64, (13)

где  $G_V$  – СПМФШ, дБ/Гц.

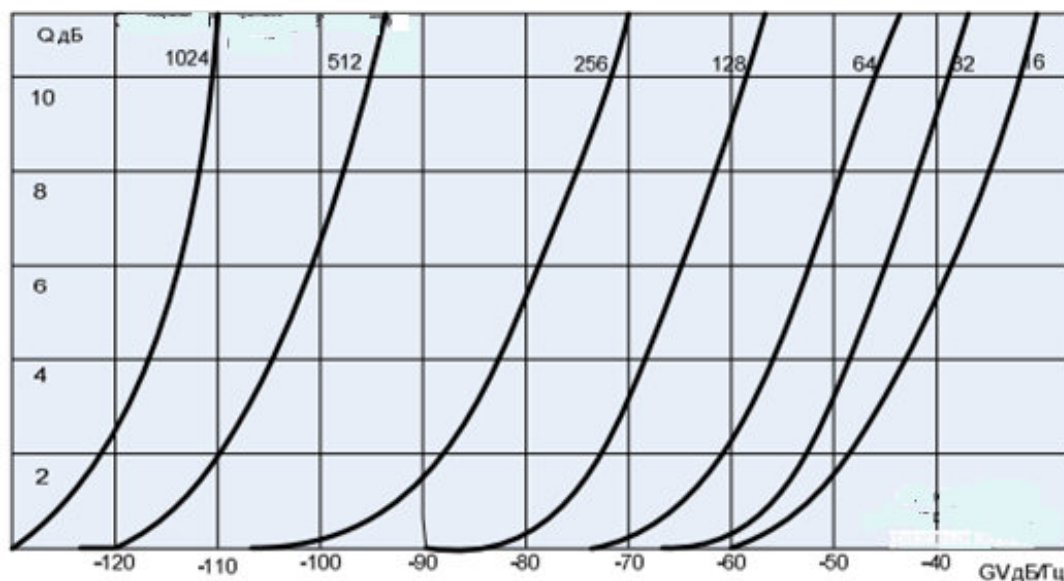


Рис. 2. Математические зависимости ЭЭП в ПСУ СОЭМД СРМ от СПМФШ

Fig. 2. Mathematical dependences of the EEP in the PSU COM CPM on the SPMFS

Аналогичным образом определены математические зависимости ЭЭП от

абсолютной неустойчивости частоты опорных генераторов (рис. 3):

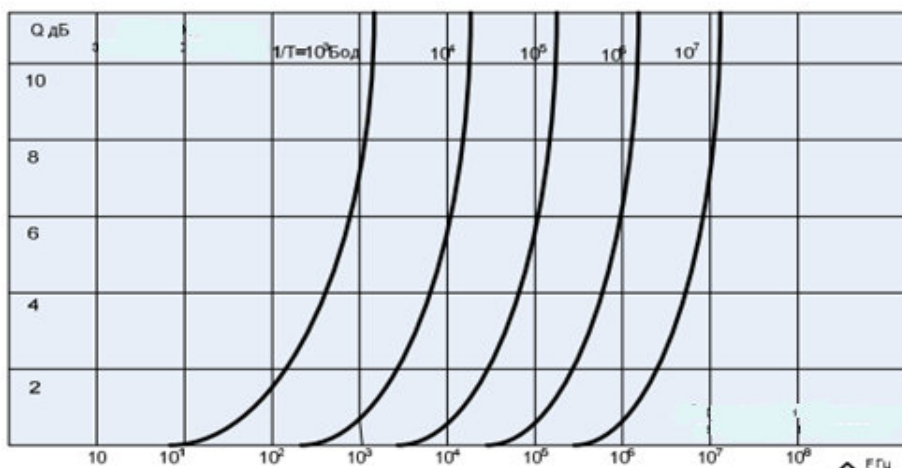
$$\Delta Q = 2,1 \cdot 10^{-1} + 2,79 \cdot 10^{-2} \Delta f^2 - 4,96 \cdot 10^{-1} \Delta f - \text{для сигналов с КАМ-256; (14)}$$

$$\Delta Q = 0,65 \cdot 10^{-2} + 2,07 \cdot 10^{-2} \Delta f + 5,06 \cdot 10^{-2} \Delta f^2 - \text{для сигналов КАМ-128; (15)}$$

$$\Delta Q = 0,35 \cdot 10^{-1} + 2,07 \cdot 10^{-2} \Delta f + 6,06 \cdot 10^{-2} \Delta f^2 - \text{для сигналов с КАМ-64, (16)}$$

где  $\Delta f$  – абсолютная неустойчивость частоты гетеродина, Гц.





**Рис. 3.** Математические зависимости ЭЭП в ПСУ СОЭМД СРМ от абсолютной нестабильности частоты опорных генераторов

**Fig. 3.** Mathematical dependences of the EEP in the COM CPM PSU on the absolute instability of the frequency of the reference generators

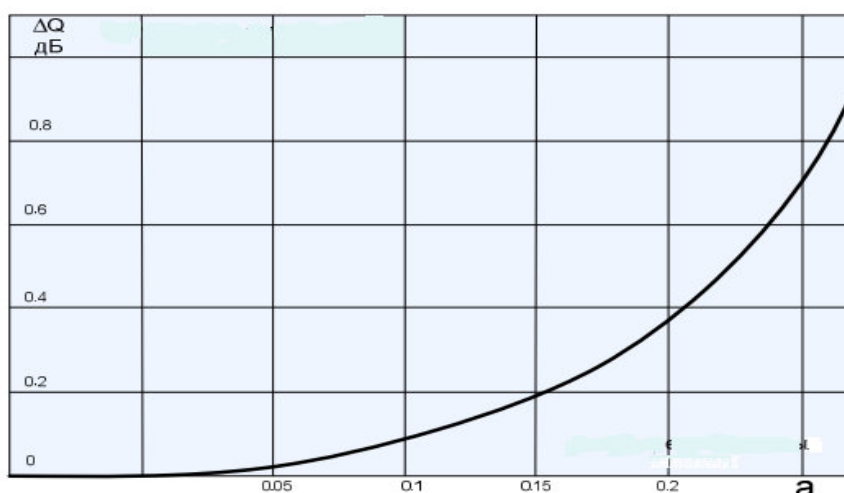
## 2. Компенсируемые эквивалентные энергетические потери в ПСУ СОЭМД СРМ.

Анализ работ [11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18] позволил определить эквивалентные энергетические потери, которые возникают за счет амплитудно-частотных изменений из-за несогласованности сигнала и фильтра:

$$\Delta Q = 10 \lg \left( 1 + \frac{\alpha_1^2}{2\alpha_0^2} \right), \quad (17)$$

где  $\alpha_0$  – значение частотной составляющей в пропускающей полосе фильтра частотной селекции;  $\alpha_1$  – амплитуда гармонических искажений.

Возрастание амплитуды частотных изменений приводит к увеличению проигрыша. Таким образом, зависимость потерь нешумового характера от относительной амплитуды частотных изменений принимает следующий вид (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость нешумовых потерь от амплитуды частотных изменений

**Fig. 4.** Dependence of non-noise losses on amplitude frequency changes

Влияние фазочастотных изменений фильтра отражается на величине ЭЭП выражением [11]:

$$\Delta Q = 10 \lg(J_0(b))^{-2}, \quad (18)$$

где  $J_0$  – функция Бесселя.

На рисунке 5 приведена зависимость ЭЭП от фазочастотных искажений, вносимых фильтром.

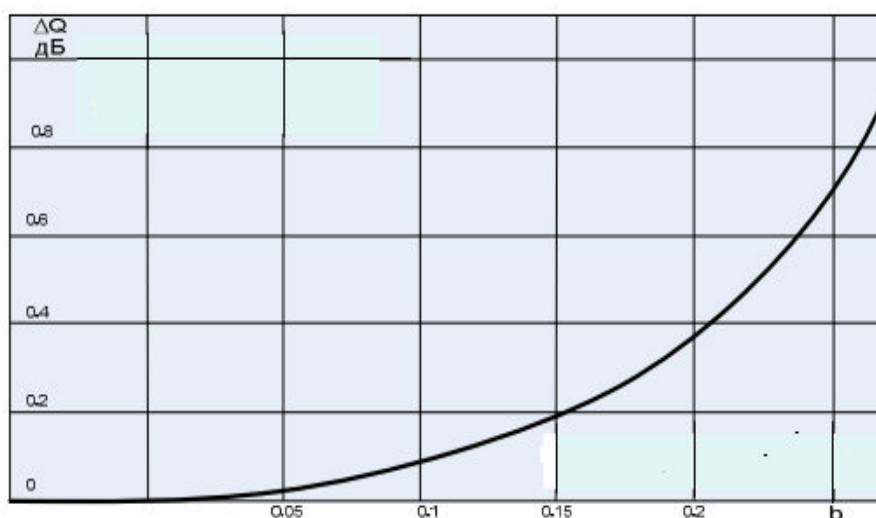


Рис. 5. Математическая зависимость ЭЭП от фазочастотных искажений

Fig. 5. Mathematical dependence of EEP on phase frequency distortions

3. *Некомпенсируемые эквивалентные энергетические потери в ДУ СОЭМД СРМ.* Из результатов работы [2; 19; 20] получены математические выражения ЭЭП, которые зависят от следующих параметров:

- установки уровня входного сигнала;
- величины погрешности восстановления несущей частоты (при вероят-

ности неправильного приема  $p = 10^{-6}$ ), которые представлены математическими зависимостями (19) – (22) (рис. 6);

– величины погрешности восстановления тактовой частоты при вероятности неправильного приема  $p = 10^{-6}$ , которые представлены математическими зависимостями (23) – (26) (рис. 7).

$$\Delta Q = 5,42 \cdot 10^{-2} - 3,91 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi + 2,67 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi^2 \text{ – для сигналов с ФМ-4; } \quad (19)$$

$$\Delta Q = 2,85 \cdot 10^{-2} - 1,38 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi + 5,35 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi^2 \text{ – для сигналов с КАМ-16; } \quad (20)$$

$$\Delta Q = 1,1 \cdot 10^{-2} - 1,97 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi + 6,78 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi^2 \text{ – для сигналов с КАМ-64; } \quad (21)$$

$$\Delta Q = 1,65 \cdot 10^{-2} + 1,07 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi + 3,06 \cdot 10^{-2} \Delta \varphi^2 \text{ – для сигналов с КАМ-256, } \quad (22)$$

где  $\Delta \varphi$  – фазовая расстройка, град.

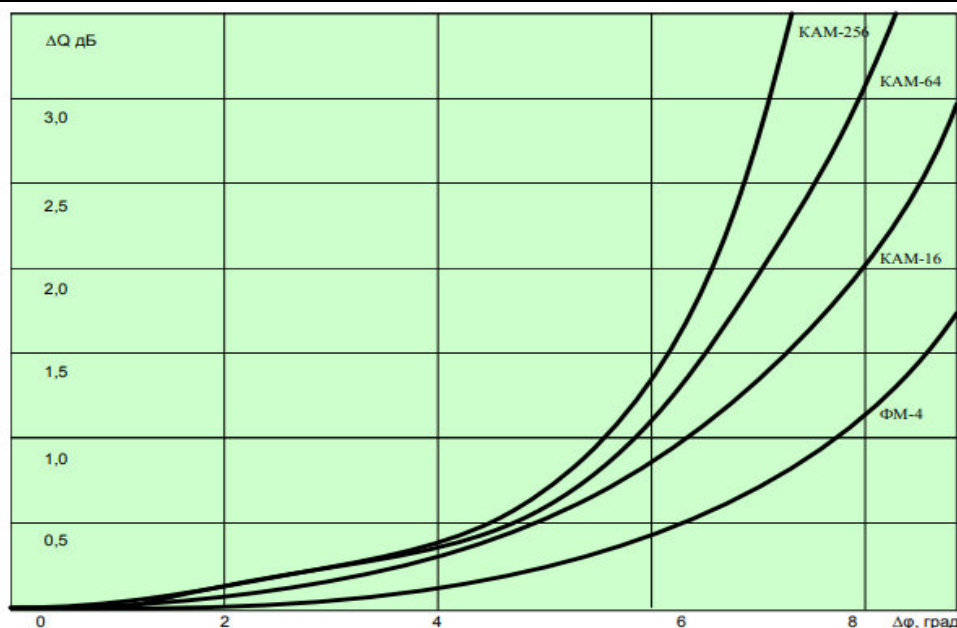
$$\Delta Q = -5 \cdot 10^{-2} + 3,25 \cdot 10^{-2} \Delta \tau + 2,67 \cdot 10^{-2} \Delta \tau^2 \text{ – для сигналов с ФМ-4; } \quad (23)$$

$$\Delta Q = 2,5 \cdot 10^{-2} + 7,5 \cdot 10^{-3} \Delta \tau + 4,3 \cdot 10^{-2} \Delta \tau^2 \text{ – для сигналов с КАМ-16; } \quad (24)$$

$$\Delta Q = -2,55 + 5,98 \cdot \Delta \tau + 0,2 \Delta \tau^2 \text{ – для сигналов с КАМ-64; } \quad (25)$$

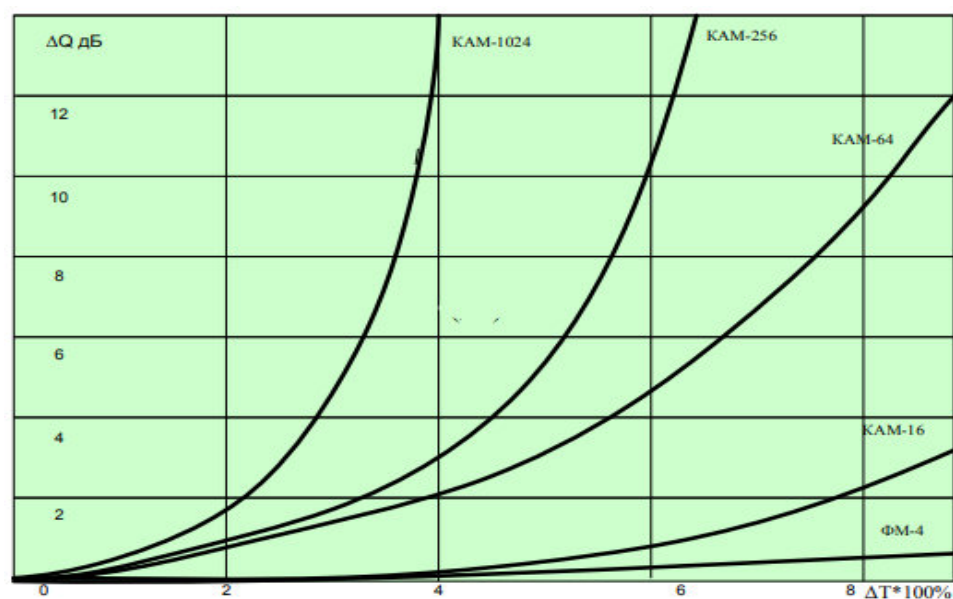
$$\Delta Q = -3,25 \cdot 10^{-1} + 2,67 \cdot 10^{-1} \Delta \tau + 2,68 \cdot 10^{-1} \Delta \tau^2 \text{ – для сигналов с КАМ-256, } \quad (26)$$

где  $\Delta \tau$  – доля длительности символа.



**Рис. 6.** Математические зависимости ЭЭП в ДУ СОЭМД СРМ от величины погрешности в СВНЧ

**Fig. 6.** Mathematical dependences of the CES in the DU SOED CPM on the magnitude of the error in the microwave

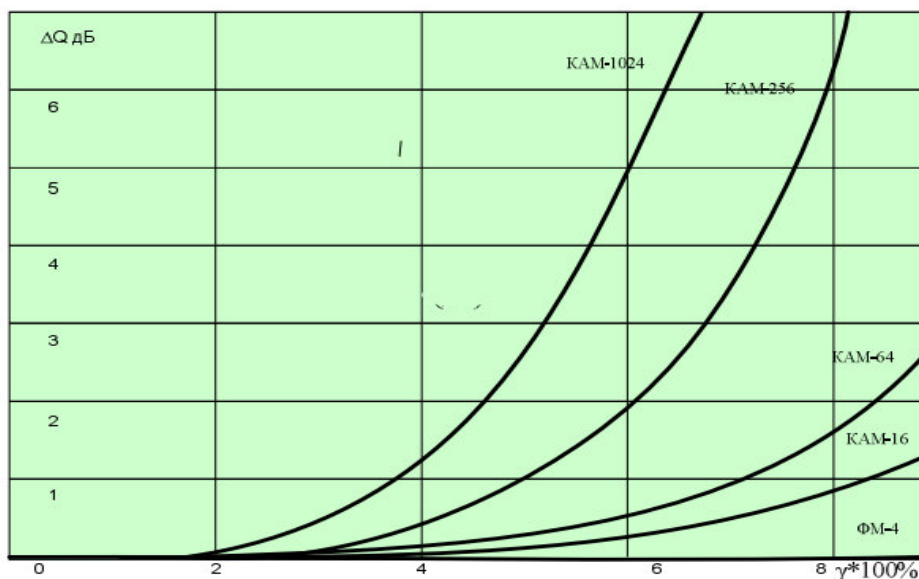


**Рис. 7.** Математические зависимости ЭЭП в ДУ СОЭМД СРМ от величины погрешности в СВТЧ

**Fig. 7.** Mathematical dependences of the SES in the DU SOED CPM on the magnitude of the error in the SVTCH

4. Компенсируемые эквивалентные энергетические потери в ДУ СОЭМД СРМ. Математические зависимости ЭЭП от величины погрешности установки

уровня входного сигнала при вероятности неправильного приёма  $p = 10^{-6}$  (рис. 8):



**Рис. 8.** Математические зависимости ЭЭП в ДУ СОЭМД СРМ от нестабильности поддержания уровня входного сигнала

**Fig. 8.** Mathematical dependences of the CES in the SRM DU on the instability of maintaining the input signal level

$$\Delta Q = 5,4 \cdot 10^{-2} - 3,9 \cdot 10^{-2}\chi + 2,7 \cdot 10^{-2}\chi^2 - \text{для сигналов с ФМ-4}; \quad (27)$$

$$\Delta Q = 2,9 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-2}\chi + 5,4 \cdot 10^{-2}\chi^2 - \text{для сигналов с КАМ-16}; \quad (28)$$

$$\Delta Q = 1,1 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^{-1}\chi + 6,8 \cdot 10^{-2}\chi^2 - \text{для сигналов с КАМ-64}; \quad (29)$$

$$\Delta Q = 1,7 \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot 10^{-2}\chi + 3,1 \cdot 10^{-2}\chi^2 - \text{для сигналов с КАМ-256}, \quad (30)$$

где  $\chi$  – относительная нестабильность поддержки уровня входного сигнала.

Необходимо заметить, что на целевой эффект достижения ЭМД влияет также стоимость на синтез АФУ, ПСУ, ДУ СОЭМД СРМ (рис. 9). Чем выше требования по потерям при заданных параметрах сигнально-кодовых конструкций (СКК), тем выше цена.

Стоимость узлов системы обеспечения электромагнитного доступа определяет затраты на создание структурно-функциональных элементов СОЭМД с заданными техническими характеристиками. Таким образом, при создании антенно-фидерных устройств затраты [2] определяются как:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{аф}} = & \sum_{i=1}^m \Pi_{\text{ак}} [K_{\text{ш}}(f)] + \\ & + \sum_{i=1}^m \Pi_{\text{пф}} (\delta_{\text{фчх}}, \delta_{\text{фчх}}) + \\ & + \sum_{v=1}^k \Pi_{\text{мшу}} [K_{\text{ш}}(f)] + \\ & + \sum_{j=1}^l \Pi_{\text{см}} [K_{\text{ш}}(f)] + \\ & + \sum_{j=1}^l \Pi_{\text{рет}} [G_V(M)] + \\ & + \Pi_{\text{фидер}} (K_{\text{ш}}) + \Pi^{\text{ЗА}} [K_{\text{ш}}(f)], \quad (31) \end{aligned}$$

где  $\sum_{i=1}^m \Pi_{\text{ак}} [K_{\text{ш}}(f)]$  – цена синтеза коммутаторов для антенн;

$\sum_{r=1}^m \Pi_{\text{пф}} (\delta_{\text{фчх}}, \delta_{\text{фчх}})$  – цена синтеза

фильтров частотной селекции в АФУ;

$\sum_{v=1}^k \Pi_{\text{мш}}[K_{\text{ш}}(f)]$  – цена синтеза малошумящих усилителей в АФУ;

$\sum_{j=1}^l \Pi_{\text{см}}[K_{\text{ш}}(f)]$  – цена синтеза радиотехнических смесителей;

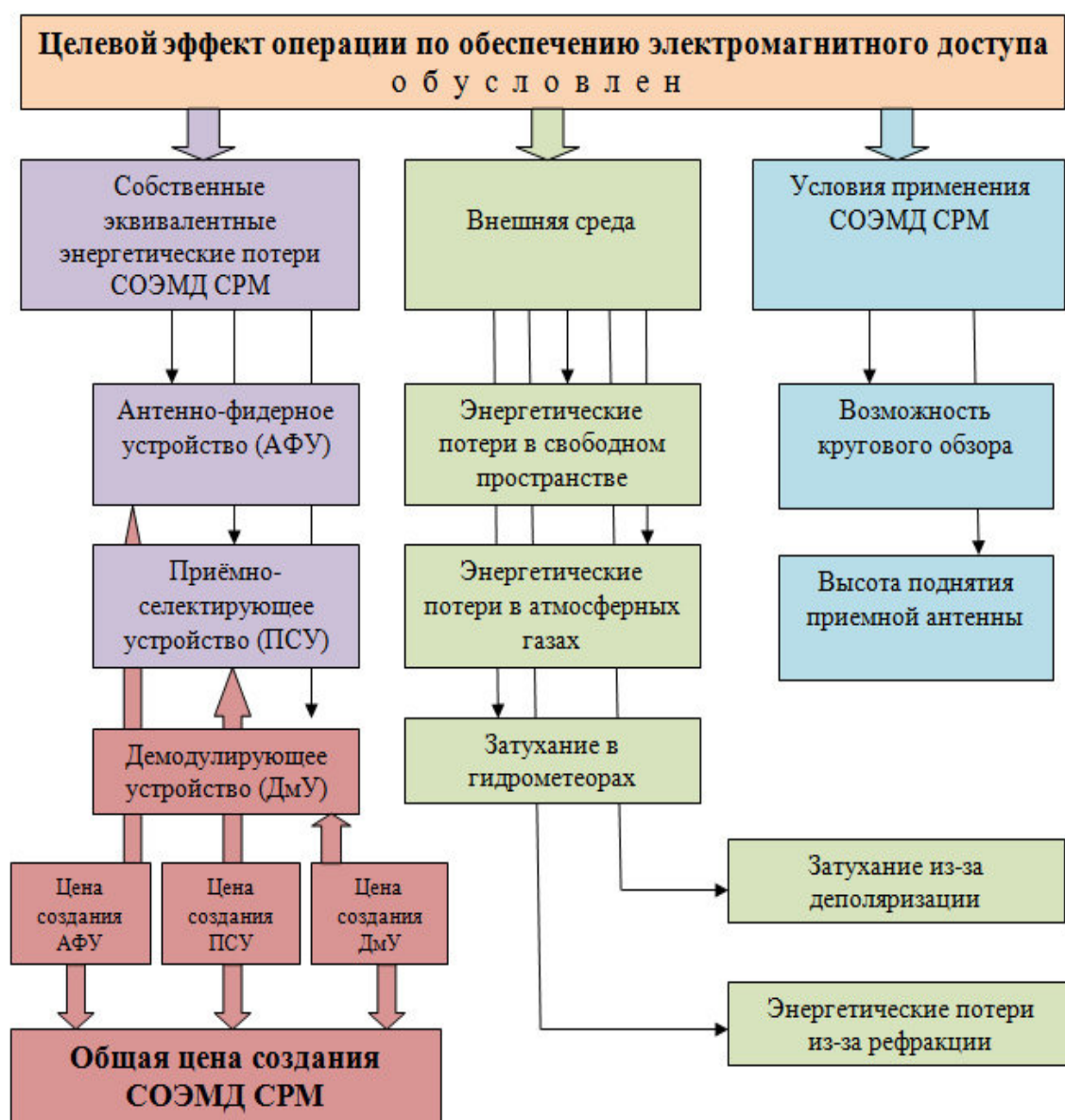
$\sum_{j=1}^l \Pi_{\text{ген}}[G_V(M)]$  – цена синтеза опорных генераторов для радиотехнических смесителей;

$\Pi_{\text{фидер}}(K_{\text{ш}})$  – цена синтеза фидера;

$\Pi^{\text{ЗА}}[K_{\text{ш}}(f)]$  – цена синтеза антенны.

Сравнительный анализ  $K_{\text{ш}}$  антенных коммутаторов и цен на них определяет зависимость цены от их коэффициента шума, которая выражается как

$$\Pi_1 = 8 \cdot e^{\frac{1}{K_{\text{ш}}}}. \quad (32)$$



**Рис. 9.** Структурная схема зависимости целевого эффекта обеспечения ЭМД от дестабилизирующих факторов в канале радиомониторинга, цены синтеза СОЭМД СРМ ИРИ СССР

**Fig. 9.** Block diagram of the dependence of the target effect of AMD provision on destabilizing factors in the radio monitoring channel, the price of synthesis of SOEMD CPM and the USSR Institute

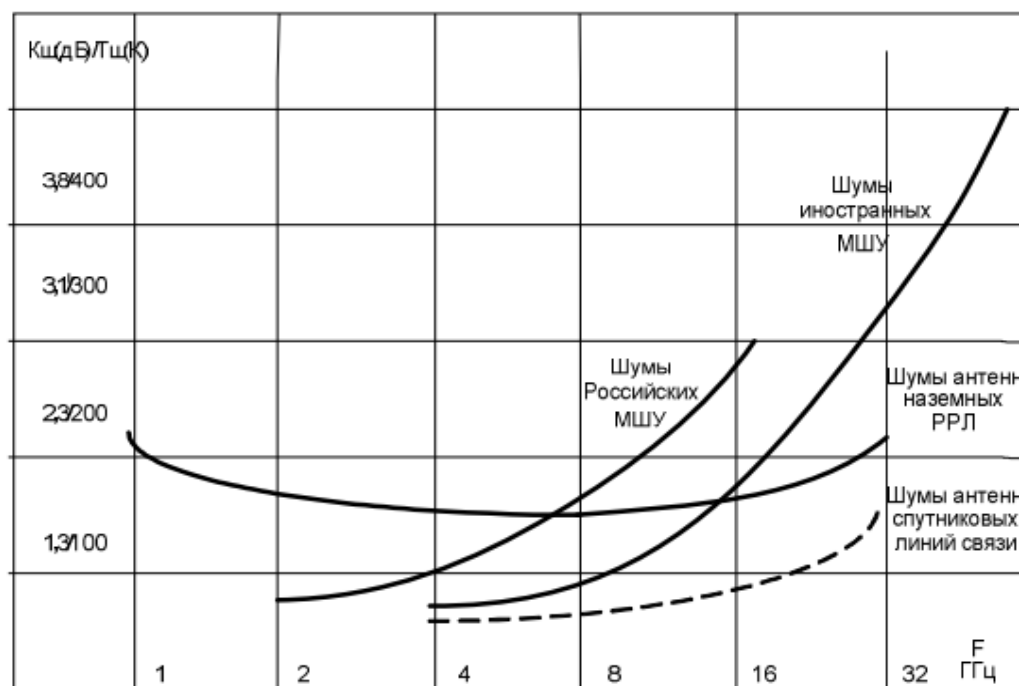
Сравнительный анализ  $K_{ш}$  фильтров частотной селекции и цен на них определяет зависимость цены от их коэффициента шума, которая выражается как

$$Ц_2 = 100,84 - 16,94 \cdot \delta_{ачх}. \quad (33)$$

Сравнительный анализ  $K_{ш}$  МШУ и цен на них определяет зависимость цены

от их коэффициента шума, которая определяется системой уравнений и графиками (рис. 10):

$$\begin{cases} Ц_3 = 689,8 + 155,1 \cdot f[\text{ГГц}], \\ К_{ш} = 1,86 + 0,065 \cdot f[\text{ГГц}]. \end{cases} \quad (34)$$



**Рис. 10.** Математические зависимости коэффициентов шума МШУ от частоты

**Fig. 10.** Mathematical dependences of the noise coefficients of the MSU on the frequency

Проведенный анализ зависимостей показывает разницу уровня шумов в МШУ и антеннах СЛС для диапазона 10–15 ГГц.

Зависимость цены радиотехнических смесителей от величины тепловых шумов

$$Ц_4 = 20 \cdot e^{\frac{1}{K_{ш}}}. \quad (35)$$

Зависимость цены создания опорных генераторов в радиотехнических смесителях от СПМФШ определяется

$$Ц_5 = 11800 + 140 \cdot |G_V|, \quad (36)$$

где  $G_V$  – СПМФШ опорных генераторов.

Для остальных структурно-функциональных элементов цена не зависит от требуемых параметров и практически неизменна:

$$Ц_6 = Ц_7 = \text{const}. \quad (37)$$

Параметрический синтез ПСУ выполняется аналогичным образом, как и в АФУ. Суммарные нешумовые потери,

вносимые ПСУ, определяются следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{рпу}} = & \sum_{k=1}^M \Delta_{\text{рпу}}^{\text{впф}^i}(\delta_{\text{ачх}}) + \sum_{i=1}^M \Delta_{\text{рпу}}^{\text{впф}^k}(\delta_{\text{фчх}}) + \\ & + \sum_{r=1}^l \Delta_{\text{рпу}}^{\text{см}^r}[K_{\text{ш}}(f)] + \sum_{s=1}^z \Delta_{\text{рпу}}^{\text{гет}^s}(G_{V_s}) + \\ & + \sum_{r=1}^n \Delta_{\text{рпу}}^{\text{пфпч}^r}(\delta_{\text{ачх}}) + \sum_{r=1}^n \Delta_{\text{рпу}}^{\text{пфпч}^r}(\delta_{\text{фчх}}) + \\ & + \sum_{j=1}^c \Delta_{\text{рпу}}^{\text{комм}^j}[K_{\text{ш}j}(f)] + \sum_{n=1}^f \Delta_{\text{рпу}}^{\text{упч}^n}(K_{\text{ш}}) + \\ & + \sum_{d=1}^p \Delta_{\text{рпу}}^{\text{атт}^d}[K_{\text{ш}}(f)] \end{aligned} \quad (38)$$

где  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{впф}^i}(\delta_{\text{ачх}})$  – нешумовые потери из-за неравномерности АЧХ  $k$ -го фильтра частотной селекции;  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{впф}^k}(\delta_{\text{фчх}})$  – нешумовые потери из-за нелинейности ФЧХ  $k$ -го фильтра частотной селекции;  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{см}^r}(K_{\text{ш}})$  – потери в  $r$ -м радиотехническом смесителе из-за шумов электронной природы;  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{гет}^s}[G_{V_s}(M)]$  – потери из-за неравномерности амплитудно-частотного спектра сигнала в  $s$ -м опорном генераторе;  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{пфпч}^r}(\delta_{\text{ачх}})$  – нешумовые потери из-за неравномерности АЧХ  $m$ -го фильтра частотной селекции первой ПЧ;  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{комм}^j}[K_{\text{ш}j}(f)]$  – потери в  $j$ -м коммутаторе, вызванные шумами Джонсона;  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{упч}^n}(K_{\text{ш}})$  – потери из-за тепловых шумов  $n$ -го усилителя промежуточной частоты;  $\Delta_{\text{рпу}}^{\text{атт}^d}[K_{\text{ш}}(f)]$  – потери в  $d$ -м аттенуаторе.

Уравнения связи для ПСУ определяются выражениями (32) – (37).

Основные затраты на создание ДУ с допустимым уровнем потерь:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{дм}} = & \Pi_{\text{свн}}(\delta_f) + \Pi_{\text{свт}}(\delta^0) + \\ & \Pi_{\text{увс}}(\delta_U) + \sum_{i=1}^m \Pi_{\text{рас}}(\delta_{\text{ачх}}) + \\ & + \Pi_{\text{омси}}(\delta_{\text{мси}}), \end{aligned} \quad (39)$$

где  $\Pi_{\text{свн}}(\delta_f)$  – цена синтеза СВНЧ;  $\Pi_{\text{свт}}(\delta^0)$  – цена синтеза СВТЧ;  $\Pi_{\text{увс}}(\delta_U)$  – цена синтеза подсистемы поддержания уровня сигнала на входе ДМУ;  $\sum_{i=1}^m \Pi_{\text{рас}}(\delta_{\text{ачх}})$  – цена синтеза фильтров ДМ;  $\Pi_{\text{омси}}(\delta_{\text{мси}})$  – цена синтеза подсистемы компенсации остаточной межсимвольной интерференцией.

Математическая зависимость цены перепрограммируемых логических интегральных схем (ППЛИС) от интегральной характеристики степени функциональной насыщенности ППЛИС и ее быстродействия  $\Xi = \text{MACS} \cdot N_i$  представлена в выражении

$$\Pi_i = 2545 + 0,16 \cdot \Xi + 6,3 \cdot 10^{-8} \cdot \Xi^2. \quad (40)$$

Математическая зависимость интегральной характеристики степени сложности ППЛИС от достигаемых потерь определяется следующим выражением:

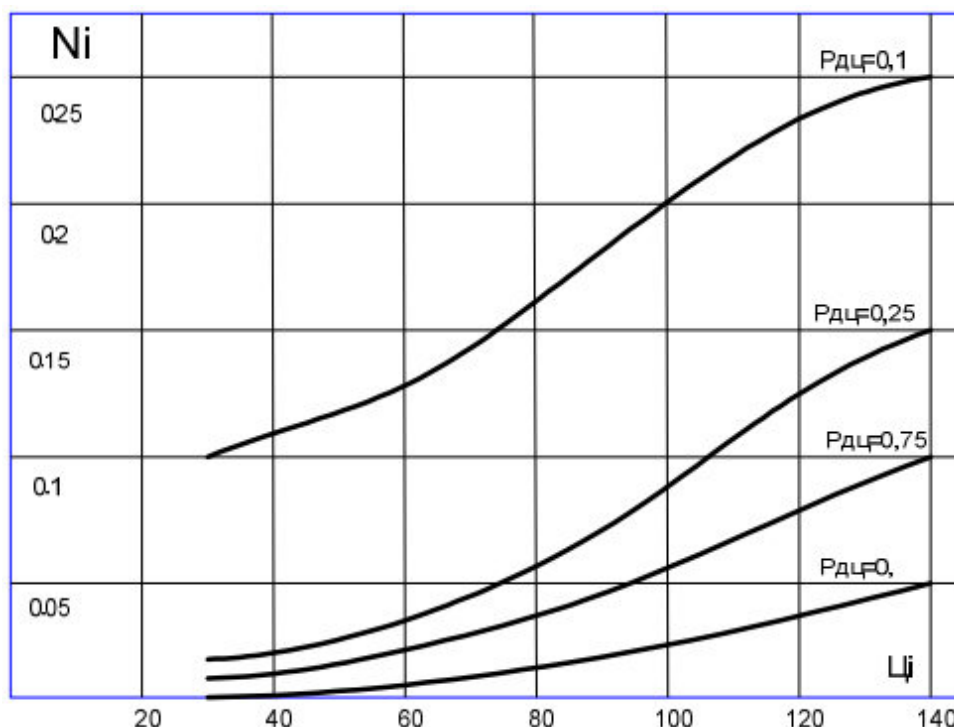
$$\Xi = \frac{1}{\Delta}. \quad (41)$$

Таким образом, проведен анализ типовых схем АФУ, ПСУ и ДУ, результаты которого позволяют декомпозировать суммарные вносимые энергетиче-



ские потери на наиболее значимые элементы. Такая декомпозиция делает возможным проведение параметрического

синтеза АФУ, РПУ и ДМ, опираясь на методы математического программирования (рис. 11).



**Рис. 11.** Зависимость показателя эффективности обеспечения ЭМД к ССС от стоимости синтеза СОЭМД СРМ

**Fig. 11.** The dependence of the indicator of the effectiveness of providing IM to the CCC on the cost of synthesis of SOED CPM

Процедура параметрического синтеза СОЭМД СРМ ИРИ ССС следующая:

1) установить зависимости между целевым эффектом обеспечения ЭМД и стоимостью синтеза СОЭМД СРМ ИРИ заданного типа ССС в заданной пространственной точке;

2) установить пределы на относительное количество обнаруженных ИРИ заданного типа и/или стоимость синтеза СОЭМД СРМ ССС;

3) по графическим зависимостям определить достижение цели по синтезу СОЭМД;

4) в случае положительного результата по достижению цели синтеза СОЭМД – скорректировать цену и дестабилизирующие параметры радиотехнических узлов СОЭМД СРМ ИРИ заданного типа ССС, в противном случае – изменить пределы на относительное количество обнаруженных ИРИ заданного типа и/или стоимость синтеза СОЭМД СРМ ССС и провести повторный анализ.

### Результаты и их обсуждение

Результаты в соответствии с поставленной целью следующие:



1) разработаны модели зависимости нешумовых потерь в структурно-функциональных узлах от дестабилизирующих факторов при заданной вероятности достоверности приёма на символ сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией;

2) показана интегральная оценка качества ведения радиомониторинга фиксированных и подвижных спутниковых линий связи;

3) разработана процедура параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа к ресурсам спутниковых линий связи.

## Выводы

В работе представлен метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга цифровых спутниковых линий связи со сложными видами модуляции, отличающийся от известных учетом энергетических потерь в структурно-функциональных узлах, ранее пренебрегаемых из-за их низкого влияния, связанного с малыми скоростями обмена данными в линиях.

## Список литературы

1. Довбня В. Г. Системы радиоприёма цифровых линий связи: монография. М.: Радиотехника, 2012. 184 с.
2. Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Бабанин И. Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2016. 316 с.
3. Исследование целесообразности применения средств компенсации дестабилизирующих факторов в спутниковом радиоканале при передаче сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности / И. Г. Бабанин, А. Н. Шевцов, А. Н. Щитов, А. А. Токарева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 4 (17). С. 30–34.
4. Оценка помехоустойчивости беспроводных цифровых систем связи при воздействии помех по побочным каналам приема / В. Г. Довбня, А. А. Гуламов, И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 3 (28). С. 35–40.
5. Томакова Р. А., Шаталова О. В., Томаков М. В. Теоретико-множественный подход и теория графов в обработке сложноструктурируемых изображений: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2012. 117 с.

6. Богомазов А. Ю., Бабанин И. Г., Мухин И. Е. Расчет эквивалентных энергетических потерь в ионосфере при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности // Т-Comm: телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8, № 3. С. 31–35.
7. Богомазов А. Ю., Коптев Д. С., Бабанин И. Г. Исследование влияния дестабилизирующих факторов в спутниковом радиоканале при приеме сигналов с ФМ-2 и ФМ-4 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2 (19). С. 24–34.
8. Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Анализ существующих методов и возможные пути повышения эффективности системы диагностирования двигателей летательных аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 41–57.
9. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Влияние качества функционирования гетеродинов на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 9 (17). С. 40–48.
10. Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 58–68.
11. Лезин Ю. С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М.: Советское радио, 1969. 447 с.
12. Бабанин И. Г. Процедура проектирования фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь в радиоприемных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2018. 166 с.
13. Мухин И. Е., Бабанин И. Г. Определение эквивалентных энергетических потерь полосовых фильтров, вызванных неравномерностью фазочастотной характеристики, при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 129–133.
14. Хотынюк С. С., Бабанин И. Г. Способ определения эквивалентных энергетических потерь симметричных фильтров частотной селекции с конечной импульсной характеристикой в высокоскоростных радиосистемах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 3 (48). С. 70–73.

15. Оценка влияния неравномерности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик спутникового радиоканала на когерентный приём фазомодулированных сигналов малой позиционности / И. Г. Бабанин, А. Н. Шевцов, А. Н. Щитов, Д. С. Коптев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12, № 6. С. 9–17.
16. Analytical evaluation of equivalent energy loss in causal frequency selection filters in the processing of quadrature amplitude modulation signals / V. G. Andronov, I. E. Mukhin, I. G. Babanin, A. E. Sevryukov, D. S. Koptev, A. A. Chuev // Journal of Physics: Conference Series. Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 32006.
17. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 49–55.
18. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 1. С. 14–19.
19. Процедура оценки влияния неидеальности параметров оптимального демодулирующего устройства системы приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности и коэффициента неравномерности сигнального созвездия на эквивалентные энергетические потери / И. Г. Бабанин, Н. Ю. Михайлова, А. И. Николаенко, Д. С. Коптев // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 10 (16). С. 60–69.
20. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние качества функционирования системы тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема КАМ-сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2015. № 4. С. 24–28.

## References

1. Dovbnya V. G. Sistemy radiopriema tsifrovyykh linii svyazi [Radio reception systems of digital communication lines]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 184 p.
2. Mukhin I. E., Khmelevskaya A. V., Babanin I. G. Metodologicheskie osnovy sinteza sistem obespecheniya elektromagnitnogo dostupa sredstvami radiomonitoringa sovremennykh sistem telekommunikatsii [Methodological foundations of the synthesis of electromagnetic access systems by means of radio monitoring of modern telecommunications systems]. Kursk, Southwest State University Publ., 2016. 316 p.
3. Babanin I. G., Shevtsov A. N., Shchitov A. N., Tokareva A. A. Issledovanie tselesoobraznosti primeneniya sredstv kompensatsii destabiliziruyushchikh faktorov v sputnikovom radiokanale pri peredache signalov s kvadrurnoi amplitudnoi modulyatsiei razlichnoi pozitsionnosti [Investigation of the feasibility of using means of compensation for destabilizing factors in a satellite radio channel when transmitting signals with quadrature amplitude modulation of various positionality]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universi-*

teta. *Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2015, no. 4 (17), pp. 30–34.

4. Dovbnya V. G., Gulamov A. A., Babanin I. G., Koptev D. S. Otsenka pomekhoustoichivosti besprovodnykh tsifrovyykh sistem svyazi pri vozdeistvii pomekh po pobochnym kanalam priema [Evaluation of the noise immunity of wireless digital communication systems under the influence of interference through secondary reception channels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2018, vol. 8, no. 3 (28), pp. 35–40.

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

6. Bogomazov A. Yu., Babanin I. G., Mukhin I. E. Raschet ekvivalentnykh energeticheskikh poter' v ionosfere pri prieme signalov s kvadraturnoi amplitudnoi modulyatsiei razlichnoi pozitsionnosti [Calculation of equivalent energy losses in the ionosphere when receiving signals with quadrature amplitude modulation of various positionality]. *T-Comm: telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2014, vol. 8, no. 3, pp. 31–35.

7. Bogomazov A. Yu., Koptev D. S., Babanin I. G. Issledovanie vliyaniya destabiliziruyushchikh faktorov v sputnikovom radiokanale pri prieme signalov s FM-2 i FM-4 [Investigation of the influence of destabilizing factors in the satellite radio channel when receiving signals from FM-2 and FM-4]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 2 (19), pp. 24–34.

8. Tyapkin S. A., Mukhin I. E., Koptev D. S. Analiz sushchestvuyushchikh metodov i vozmozhnye puti povysheniya effektivnosti sistemy diagnostirovaniya dvigatelei letatel'nykh apparatov [Analysis of existing methods and possible ways to improve the efficiency of the aircraft engine diagnostics system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 41–57.

9. Dovbnya V. G., Koptev D. S. Vliyanie kachestva funktsionirovaniya geterodinov na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi modulyatsiei [Influence of the quality of functioning of heterodynes on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*, 2020, vol. 84, no. 9 (17), pp. 40–48.

10. Tyapkin S. A., Mukhin I. E., Koptev D. S. Metod sovmestnogo primeneniya po-kazatelya struktury vibrosignala i izvestnykh rezul'tatov identifikatsionnykh izmerenii v zadachakh preventivnogo obnaruzheniya neispravnostei aviatsionnykh dvigatelei [Method of joint application of the vibration signal structure indicator and known results of identification measurements in the tasks of preventive fault detection of aircraft engines]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 58–68.

11. Lezin Yu. S. Optimal'nye fil'try i nakopiteli impul'snykh signalov [Optimal filters and pulse signal accumulators]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1969. 447 p.

12. Babanin I. G. Protsedura proektirovaniya fil'trov chastotnoi selektsii s uchetom ekvivalentnykh energeticheskikh poter' v radiopriemnykh ustroystvakh vysokoskorostnykh radiosistem peredachi informatsii. Diss. kand. tekhn. nauk [The procedure for designing frequency selection filters taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Cand. techn. sci. diss.]. Kursk, 2018. 166 p.

13. Mukhin I. E., Babanin I. G. Opredelenie ekvivalentnykh energeticheskikh poter' polosovykh fil'trov, vyzvannykh neravnomernost'yu fazochastotnoi kharakteristiki, pri prieme signalov s kvadraturnoi amplitudnoi modulyatsiei [Determination of equivalent energy losses of bandpass filters caused by uneven phase-frequency characteristics when receiving signals with quadrature amplitude modulation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, no. 2-3, pp. 129–133.

14. Khotynyuk S. S., Babanin I. G. Sposob opredeleniya ekvivalentnykh energeticheskikh poter' simmetrichnykh fil'trov chastotnoi selektsii s konechnoi impul'snoi kharakteristikoi v vysokoskorostnykh radiosistemakh [A method for determining equivalent energy losses of symmetric frequency selection filters with finite impulse response in high-speed radio systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 3 (48), pp. 70–73.

15. Babanin I. G., Shevtsov A. N., Shchitov A. N., Koptev D. S. Otsenka vliyaniya neravnomernosti amplitudno-chastotnoi i fazo-chastotnoi kharakteristik sputnikovogo radiokanala na kogerentnyi priem fazomodulirovannykh signalov maloi pozitsionnosti [Evaluation of the influence of the unevenness of the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of a satellite radio channel on the coherent reception of phase-modulated signals of low positivity]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 9–17.

16. Andronov V. G., Mukhin I. E., Babanin I. G., Sevryukov A. E., Koptev D. S., Chuev A. A. Analytical evaluation of equivalent energy loss in causal frequency selection filters in the processing of quadrature amplitude modulation signals. *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020, p. 32006.

17. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie nelineinykh iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi manipulyatsiei [Influence of nonlinear distortions on the noise stability of receiving signals with quadrature amplitude manipulation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2015, no. 3 (16), pp. 49–55.

18. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie nelineinykh iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi manipulyatsiei [Influence of nonlinear distortions on the noise stability of receiving signals with quadrature amplitude manipulation]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*, 2016, no. 1, pp. 14–19.

19. Babanin I. G., Mikhailova N. Yu., Nikolaenko A. I., Koptev D. S. Protsedura otsenki vliyaniya neideal'nosti parametrov optimal'nogo demoduliruyushchego ustroystva sistemy priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi modulyatsiei razlichnoi pozitsionnosti i koeffitsienta neravnomernosti signal'nogo sozvezdiya na ekvivalentnye energeticheskie poteri [The procedure for assessing the effect of the imperfection of the parameters of the optimal demodulating device of a signal reception system with quadrature amplitude modulation of various positionality and the coefficient of unevenness of the signal constellation on equivalent energy losses]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*, 2019, vol. 83, no. 10 (16), pp. 60–69.

20. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie kachestvafunktsionirovaniya sistemy taktovoi sinkhronizatsii na pomekhoustoichivost' priema KAM-signalov [Influence of the quality of clock synchronization system functioning on the noise immunity of receiving CAM signals]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*, 2015, no. 4, pp. 24–28.

---

### 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

**Мухин Иван Ефимович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, генеральный конструктор специальных проектов, АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: makskatol21@yandex.ru

**Бабанина Екатерина Юрьевна**, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanina@internet.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

**Ivan E. Mukhin**, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, General Designer of Special Projects, JSC Aviaavtomatika named after V. V. Tarasov, Kursk, Russian Federation, e-mail: makskatol21@yandex.ru

**Ekaterina Yu. Babanina**, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanina@internet.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

### Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов

С. А. Филист<sup>1</sup>, Р. А. Томакова<sup>1</sup> ✉, Н. Г. Нефедов<sup>1</sup>,  
Е. И. Пузырев<sup>1</sup>, И. Н. Горбачев<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

#### Резюме

**Цель исследований.** Своевременное обнаружение очага пожара на стадии его развития позволяет снизить как материальные, так и человеческие потери. Поэтому целью исследований явилась разработка моделей, методов и алгоритмов управления системой мониторинга пожарной и медико-экологической безопасности, обеспечивающих повышение ее эффективности за счет анализа видеоданных с беспилотных летательных аппаратов.

**Методы.** Способ классификации аэрофотоснимков видеоряда при мониторинге пожарной обстановки предполагает их декомпозицию на прямоугольные сегменты заданного размера и отнесение их к одному из трех классов: дым, пламя, индифферентный класс. Для классификации сегментов используются «сильные» и «слабые» классификаторы. Преобразование Уолша-Адамара использовалось для формирования дескрипторов для «слабых» классификаторов. Дескрипторы рассчитываются для трех «слабых» классификаторов. Сначала вычисляется преобразование Уолша-Адамара для окна всего сегмента, и его спектральные коэффициенты используются для первого «слабого» классификатора. Затем вычисляются дескрипторы для двух окон, размеры которых в два и четыре раза меньше размеров исходного окна.

**Результаты.** Классификатор состоит из трех независимо обученных нейронных сетей – «слабых» классификаторов. Простой блок усреднения по ансамблю используется для объединения выходных данных нейронных сетей. Разработано программное обеспечение для классификации аэрофотоснимков, которое позволяет формировать базу данных сегментов классов «дым» и «пламя», определять двумерный спектр Уолша-Адамара сегментов аэрофотоснимков, обучать полностью подключенные нейронные сети и проводить исследовательский анализ для изучения релевантности двумерные спектральные коэффициенты.

**Заключение.** Экспериментальные исследования по классификации видеоданных, содержащих пламя и дым, показали среднее значение точности обнаружения дыма в 86%, а пламени – 89,5%. Ошибки типа II составляли в среднем 13% при обнаружении дыма и 4,5% при обнаружении пламени. Для настройки и проверки классификаторов мы использовали реальные данные с камер видеонаблюдения на открытых пространствах.

---

© Филист С. А., Томакова Р. А., Нефедов Н. Г., Пузырев Е. И., Горбачев И. Н., 2022



**Ключевые слова:** аэрофотоснимок; пламя; дым; обнаружение пожара; сегментация моментальных снимков видеопоследовательности; алгоритм классификации моментальных снимков видеопоследовательности.

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

**Для цитирования:** Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Н. Г. Нефедов, Е. И. Пузырев, И. Н. Горбачев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>.

Поступила в редакцию 06.10.2022

Подписана в печать 02.11.2022

Опубликована 22.12.2022

## Intelligent Image Processing System Obtained from Unmanned Aerial Vehicles

Sergey A. Filist<sup>1</sup>, Rimma A. Tomakova<sup>1</sup> ✉, Nikita G. Nefedov<sup>1</sup>,  
Evgeny I. Puzyrev<sup>1</sup>, Igor N. Gorbachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

### Abstract

**The purpose of research.** Timely detection of the fire source at the stage of its development allows to reduce both material and human losses. Therefore, the purpose of the research was to develop models, methods and algorithms for controlling the fire and medical and environmental safety monitoring system, ensuring an increase in its effectiveness through the analysis of video data from unmanned aerial vehicles.

**Methods.** The method of classifying aerial photographs of a video sequence when monitoring a fire situation involves their decomposition into rectangular segments of a given size and assigning them to one of three classes: smoke, flame, indifferent class. "Strong" and "weak" classifiers are used to classify segments. The Walsh-Hadamard transform was used to generate descriptors for "weak" classifiers. Descriptors are calculated for three "weak" classifiers. First, the Walsh-Hadamard transform is calculated for the window of the entire segment and its spectral coefficients are used for the first "weak" classifier. Then descriptors are calculated for two windows whose sizes are two and four times smaller than the size of the original window.

**Results.** The classifier consists of three independently trained neural networks - "weak" classifiers. A simple ensemble averaging unit is used to combine the output data of neural networks. The software for classification of aerial photographs has been developed, which allows to form a database of segments of the "smoke" and "flame" classes, to determine the two-dimensional Walsh-Hadamard spectrum of aerial photograph segments, to train fully connected neural networks and to conduct research analysis to study the relevance of two-dimensional spectral coefficients.

**Conclusion.** Experimental studies on the classification of video data containing flame and smoke showed an average smoke detection accuracy of 86%, and flame detection of 89,5%. Type II errors averaged 13% for smoke detection and 4,5% for flame detection. To set up and check the classifiers, we used real data from surveillance cameras in open spaces.

**Keywords:** aerial photograph; flame; smoke; fire detection; segmentation of video sequence snapshots; algorithm for classifying video sequence snapshots.

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

**For citation:** Filist S. A., Tomakova R. A., Nefedov N. G., Puzyrev E. I., Gorbachev I. N. Intelligent Image Processing System Obtained from Unmanned Aerial Vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022; 12(4): 64–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>.

Received 06.10.2022

Accepted 02.11.2022

Published 22.12.2022

\*\*\*

## Введение

Проблема своевременного обнаружения пожаров позволяет предотвратить человеческие и экономические потери и является актуальной для многих стран мира. Использование беспилотных летательных аппаратов с установленными на борту видеокамерами позволяет анализировать изображения в реальном времени. Поступающий большой поток видеоданных требует значительных ресурсов для его обработки.

В связи с этим возникает необходимость в разработке интеллектуальной системы для обработки видеoinформации, поступающей с видеокамер. Поэтому разработка методов, алгоритмов и моделей анализа изображений из видеопотока для автоматизированной системы классификации изображений является актуальной задачей.

Выделение объекта интереса из видеопотока информационных данных является актуальной для многих областей (таких, как навигация, медицина, геоинформационные технологии и т. д.).

Своевременное обнаружение очага пожара представляет сложную задачу, решаемую с помощью методов выделе-

ния границ очага пожара на снимках видеоряда на основе интеллектуальных технологий. Эта задача связана с задачами отслеживания объекта, сравнения изображения с базой данных, поиска дубликатов изображений, соединения кадров [1].

В настоящее время разработаны разнообразные методы, модели и алгоритмы для решения проблемы выделения и классификации очага пожара на снимках видеоряда.

В статье [2] был предложен метод обнаружения дыма, основанный на вейвлет-анализе (преобразовании) и методе опорных векторов. При тестировании надежности данного подхода была проведена сегментация видеоконтента продвижения лесного пожара. С помощью сегментации отдельных блоков видеоизображения удалось сократить время для обнаружения дыма от пожара. Также система может взаимодействовать с камерами, которые обладают возможностями обнаружения движения. Получена ошибка классификации типа пожара, равная 8,53%.

S. Rakkammal и R. Surendar предложили свой метод компьютерного зрения для распознавания и обнаружения дыма

и огня, основанный на анализе неподвижных изображениях, поступающих с камер. Данный подход авторы раскрыли в статье [3], в которой провели обучение свёрточной нейронной сети на большом наборе данных. Представленная нейронная сеть может успешно работать на встраиваемом устройстве. Кроме того, использование Интернета позволяет блоку обнаружения предоставлять пользователю визуальную обратную связь в режиме реального времени и оповещать о пожаре в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

Zhang Li совместно с DiDi Wu в [4] использовали графовую нейронную сеть для решения поставленной проблемы. Нейросеть основана на сходстве изображений лесных пожаров, полученных с разных точек. Также был предложен метод динамического выделения признаков пожара. Deskрипторы могут быть отделены от исходного изображения, что значительно сокращает сложный процесс предварительной обработки. Данный метод отлично адаптируется к различным сценариям пожара и обладает сильной способностью к обобщению и помехозащищенности.

В [5] Pu Li, Wangda Zhao провели исследование, в котором предложили алгоритмы обнаружения пожаров на изображениях, основанные на усовершенствованных моделях CNN для обнаружения объектов. Они сравнили FasterRCNN, R-FCN, SSD и YOLO v3 с другими алгоритмами и пришли к выводу, что алгоритмы, основанные на CNNS,

показывают более высокую точность и могут автоматически извлекать сложные признаки пожара на изображении и успешно обнаруживать пожар в различных сценах. Авторы статьи провели эксперименты и установили, что среди предложенных алгоритмов YOLO v3 показывает лучшие результаты в скорости обнаружения огня, точности и надежности.

Khan Muhammad, Jamil Ahmad, Irfan Mehmood, Seungmin Rho, Sung Wook Baik разработали экономичную с точки зрения вычислительного времени и памяти архитектуру CNN для обнаружения пожара с камер видеонаблюдения. Данная работа представлена в исследовательской статье [6]. Модель основана на архитектуре GoogLeNet, она имеет разумную вычислительную сложность и пригодна для решения поставленной задачи. Эксперименты, проверяющие работоспособность и эффективность предлагаемой структуры, подтверждают ее пригодность и эффективность для обнаружения пожаров. Также разработчики утверждают, что существующие системы обнаружения пламени могут быть настроены для обнаружения как дыма, так и огня, это позволит системам видеонаблюдения справляться с более сложными ситуациями.

В [7] Chongyuan Tao, Jian Zhang, Pan Wang для решения проблемы обнаружения дыма предлагают использовать подход, основанный на глубоких CNN. Они могут быть обучены от исходных значений пикселей до выходных данных классификатора и автоматически извлекать

объекты из изображений. Эксперименты показывают, что этот метод обеспечивает 99,4% – точность обнаружения при 0,44% ложных срабатываний на большом наборе данных, что, очевидно, превосходит существующие традиционные методы.

Все предложенные методы могут применяться для обнаружения очага пожара в стадии его развития, что позволяет сократить материальные и людские потери. Эти технологии в зависимости от способа и места их в настоящее время применения находят широкое применение [8; 9; 10; 11; 12].

### **Материалы и методы**

На видеосъемке дым и пламя представляют собой структуру с изменяющимися пространственными и временными характеристиками (такими, как цвет и яркость пикселей, насыщенность, возникновение вихревых волн различного размера).

### **Алгоритм классификации видеоматериалов с беспилотного летательного аппарата**

Классификация видеоизображений, поступающих с камер, содержит процедуру анализа информации либо всего изображения, либо отдельных областей на изображении. На этом этапе выделяются два уровня: на первом – определяется только наличие интереса к данному

изображению или выделенной области (класс *ROI* или класс *HE ROI*); на втором – принимается окончательное решение о принадлежности изображения (сегмента) к одному из классов. Следует отметить, что каждый из выделенных таким образом уровней классификации характеризуется специфическими особенностями [10; 13, 14].

Классификатор предназначен для анализа RGB-изображений с целью выделения на этих изображениях областей, которые могут принадлежать одному из трех классов – «пламя», «дым», «норма». Классификатор построен по многоуровневому принципу [13; 15; 16], в основе которого лежит разбиение изображения (либо анализируемой области) на прямоугольные сегменты меньшего размера, в зависимости от уровня разделения.

На выходах классификатора представлена бинарная информация, которая характеризует принадлежность пикселей анализируемой области к трем, перечисленным выше классам.

Сначала вводимое для анализа изображение декомпозируется на прямоугольные области равных размеров. Каждому образовавшемуся сегменту изображения ставится в соответствие идентификатор (рис. 1). При этом идентификатор характеризует номер выделенного сегмента и номер соответствующего уровня разбиения декомпозиции.

1-1	1-2	2-1	2-2
1-3	1-4	2-3	2-4
3-1	3-2	4-1	4-2
3-3	3-4	4-3	4-4

**Рис. 1.** Схема декомпозиции снимка видеоряда

**Fig. 1.** Decomposition diagram of a video sequence snapshot

На рисунке 1 проиллюстрирована схема декомпозиции изображения, на которой цифрами обозначены подобласти анализируемого сегмента и уровни разбиения.

В качестве критерия отнесения сегмента к классу ROI было выбрано соотношение, характеризующее превышение фоновой яркости анализируемого сегмента над фоновой яркостью родительского сегмента. Если это условие выполняется, то дочерний сегмент переходит на следующий уровень, т. е. выполняется процесс декомпозиции этого сегмента на четыре равных сегмента.

Условие принадлежности сегмента к классу ROI записывается в виде

$$\frac{S_i}{S} \geq T_{tr}, \quad (1)$$

где  $S_i$  – значение яркости фона в дочернем сегменте;  $S$  – значение яркости фона в родительском сегменте;  $T_{tr}$  – пороговое значение.

При этом отметим, что в алгоритме предусмотрена возможность регулирования пороговым значением, а именно

адаптивный выбор пороговых значений, применительно к выделенной области.

Алгоритм формирования сегментов в снимке видеопоследовательности включает в себя следующие шаги: 1) вводится пороговое значение и исходное изображение; 2) определяется фон в исходном изображении; 3) снимок раскладывается на четыре дочерних сегмента; 4) цикл выполняет поиск дочерних сегментов, принадлежащий ROI; 5) проводится анализ: если среди этих потомков есть потомок ROI, то он переходит на второй уровень и также выполняется его разложение на четыре потомка; 6) координаты сегментов ROI образуют соответствующий набор; 7) возможна ситуация, когда для сегмента ROI из первого уровня невозможно выполнить декомпозицию на втором уровне, тогда координаты сегмента первого уровня записываются в набор ROI.

Пример декомпозиции изображения с фрагментом пламени показан на рисунке 2. Исходное изображение разделяется на четыре сегмента на основе геометрических размеров изображения.



**Рис. 2.** Пример сегментации изображения на первом уровне декомпозиции

**Fig. 2.** Example of image segmentation at the first level of decomposition

Анализ полученных в результате разделения областей исходного изображения свидетельствует о том, что не все сегменты переходят на второй уровень декомпозиции. На втором уровне декомпозиции реализуется только для сегментов, яркости пикселей которых удовлетворяет условию (1). В нашем случае – это пиксели области № 1, которая, в

свою очередь, разбивается на 4 подобласти, что продемонстрировано (рис. 3).

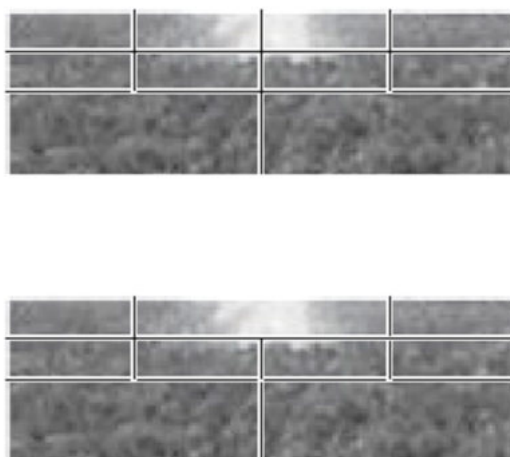
Далее организуется процесс анализа яркости пикселей второго уровня декомпозиции на возможность выполнения условия (1). На этом этапе формируются пиксели области интереса (ROI).

Процесс увеличения размера сегмента представлен в два этапа на (рис. 4).



**Рис. 3.** Декомпозиция сегмента № 1 на втором уровне

**Fig. 3.** Decomposition of segment No. 1 at the second level



**Рис. 4.** Иллюстрация двух этапов увеличения размера сегмента

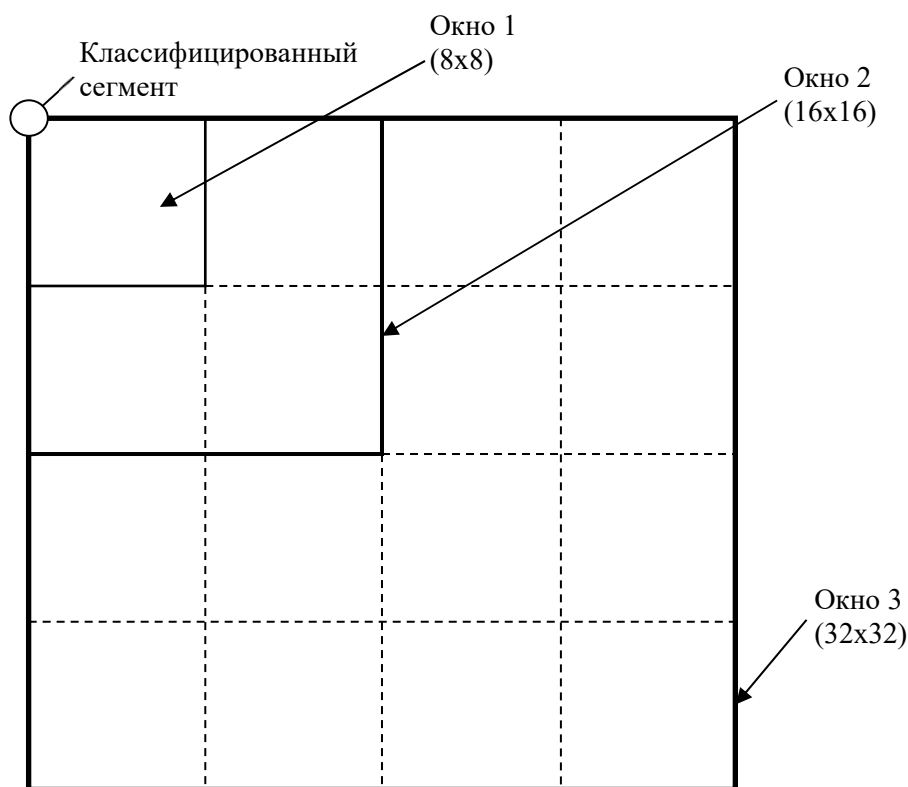
**Fig. 4.** Illustration of two stages of increasing the segment size

### Структурные и алгоритмические решения для классификаторов сегментов *ROI class*

После формирования набора *ROI class* сегменты делятся на классы по пожароопасности. Для решения задачи классификации сегментов *ROI class* применялись методы, основанные на «сильных» и «слабых» классификаторах [17; 18; 19]. В основу построения «слабых» классификаторов был положен способ формирования дескрипторов на основе спектрального преобразования Уолша-

Адамара [4; 5; 20; 21] в соответствующих сегментах.

Суть этой классификации демонстрирует рисунок 5. Первоначально рассматривается окно сегмента  $32 \times 32$  пикселя. Затем в цикле дескрипторы вычисляются в четырех окнах  $16 \times 16$  пикселей, а в следующем цикле – в 16 окнах  $8 \times 8$  пикселей. Следует заметить, что в каждом цикле получается одинаковое количество дескрипторов, что дает возможность создавать «слабые» классификаторы.



**Рис. 5.** Вложенные спектральные окна для классификации сегментов изображения

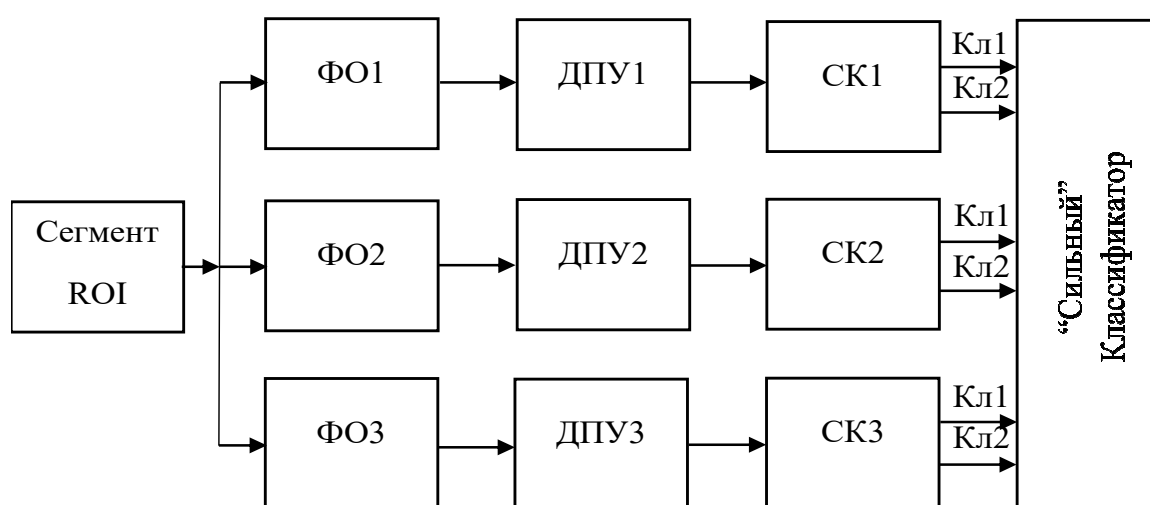
**Fig. 5.** Nested spectral windows for classifying image segments

На рисунке 6 представлена многоуровневая структура классификатора со «слабыми» классификаторами, предназначенная для сегментов *ROI class*. Предложенная структура содержит

«слабые» классификаторы, которые формируются на основе спектрального преобразования Уолша-Адамара в окнах трех типоразмеров.

Сегмент *ROI class* поступает на три формирователя окон (ФО) Уолша-Адамара, которые создают из сегмента одно окно  $32 \times 32$  пикселя, четыре окна  $16 \times 16$  пикселей и шестнадцать окон  $8 \times 8$  пикселей. В блоках двумерного преобразования Уолша (ДПУ) определяются двумерные спектры Уолша-Адамара в окнах этих типоразмеров. Спектральные коэффициенты, полученные в этих окнах, используются как дескрипторы для

соответствующих входов «слабых» классификаторов СК1...СК3, которые настраиваются автономно по соответствующим обучающим выборкам по двум классам – «дым» и «пламя» (Кл. 1 и Кл. 2). Их решения агрегирует «сильный» классификатор, реализованный по схеме многослойного персептрона [18; 21; 22; 23].



**Рис. 6.** Классификатор сегментов ROI с тремя типоразмерами окон Уолша-Адамара: ФО – формирователь окна; ДПУ – двумерное преобразование Уолша; СК – слабый классификатор

**Fig. 6.** Classifier of ROI segments with three standard sizes of Walsh-Hadamard windows: FO – window shaper; DPU – two-dimensional Walsh transform; SC - weak classifier

Спектральные коэффициенты Уолша-Адамара, поступающие с выходов блоков ДПУ классификатора сегментов ROI class, были разделены на две группы – «хранители» и «вершители». К «хранителям» были отнесены такие спектральные коэффициенты, частота появления которых наиболее высока в выборке определенного класса. Признаком того, что спектральный коэффициент является «хранителем», является то,

что при его исключении из вектора дескрипторов образец переходит в индифферентный класс. Таким образом, селекция «хранителя» может быть осуществлена только классификатором. Так как на этапе селекции классификатор еще не построен, то в качестве одного выступает лицо, принимающее решение (ЛПР), т. е. эксперт.

Рассмотрим схему алгоритма селекции «хранителей» (рис. 7).



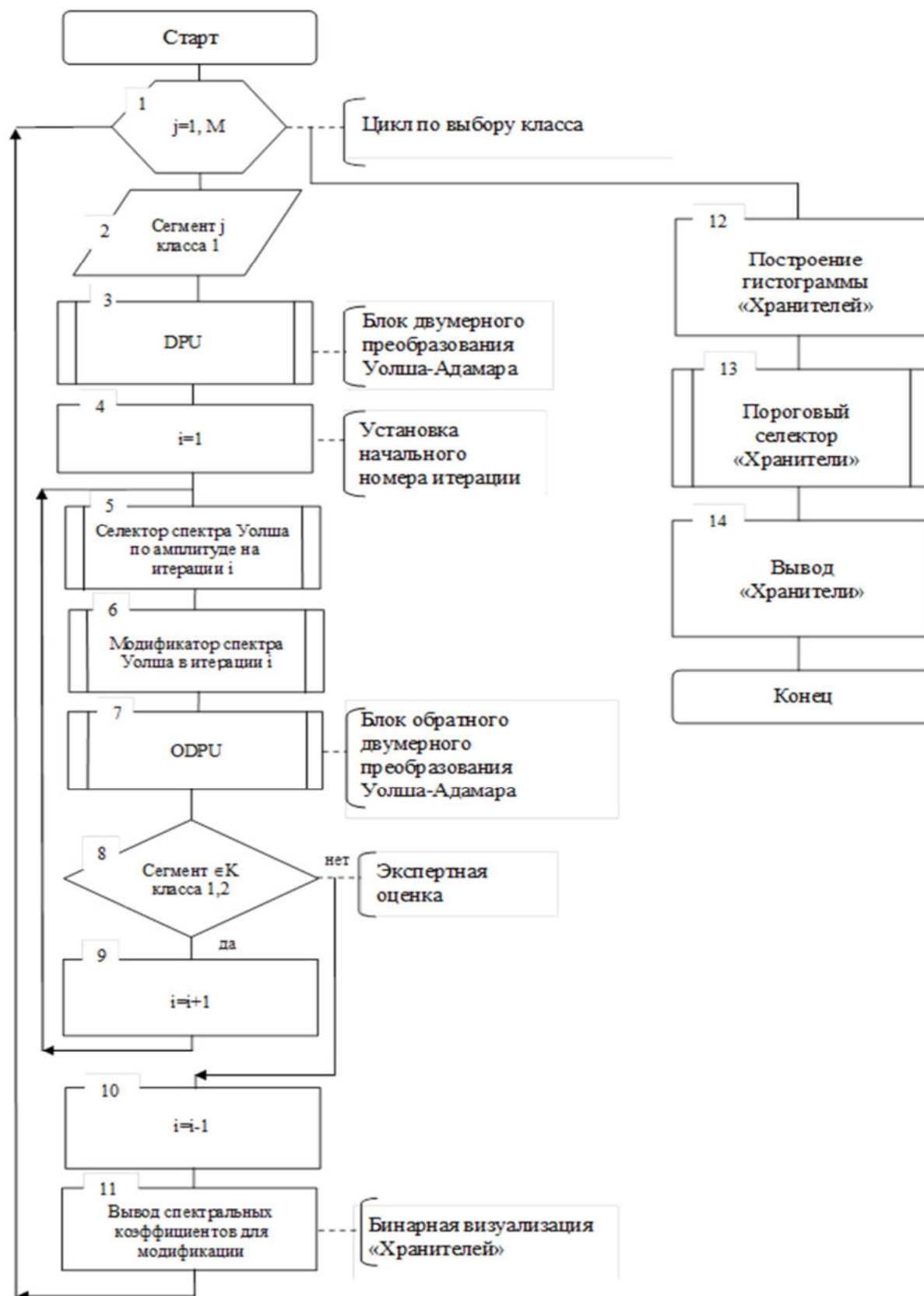


Рис. 7. Схема алгоритма селекции «хранителей»

Fig. 7. Diagram of the algorithm of selection of "keepers"

Для селекции «хранителей» необходимо в цикле просмотреть всю выборку сегментов заданного класса. В каждом сегменте  $j$  этого класса определяется ДПУ. ЛПР в цикле, реализованном в блоках 5...9, определяет релевантность соответствующего спектрального коэффициента в текущем сегменте в данном классе. Чтобы не просматривать все коэффициенты в сегменте, используется селектор коэффициентов по амплитуде (блок 5), который обнуляет коэффициенты, модуль которых ниже определенного порогового значения. После обнуления коэффициентов в блоке 7 определяется обратное двумерное преобразование Уолша (ОДПУ) модифицированного спектра, и ЛПР определяет, принадлежит ли модифицированное изображение к заданному классу или оно попало в индифферентный класс. Если изображение, по мнению ЛПР, сохранило признаки исходного класса, то осуществляется дальнейшая модификация спектра, в противном случае формируется бинарное изображение, в котором единицами отмечены спектральные коэффициенты, которые являются «хранителями» в этом сегменте.

После определения  $M$  бинарных изображений (блок 11) по ним строится гистограмма частоты выпадения «хранителя» в данной выборке (блок 12). Установив порог в процентах выпадения данного «хранителя» в выборке, полу-

чают окончательно множество «хранителей», которые являются дескрипторами для данного «слабого» классификатора.

Однако такой подход не позволяет судить о специфичности спектральных коэффициентов, так как одни и те же спектральные коэффициенты могут встречаться в выборках как того, так и другого класса.

Для определения «вершителей» необходимо взять две выборки, например «пламя» и «дым». По этим выборкам сформировать базу данных по спектральным коэффициентам. По каждой выборке определяем матрицу средних значений спектральных коэффициентов по сегменту. Итого имеем две матрицы средних для двух классов. Из двух матриц средних получаем матрицу «вершителей». Каждый элемент матрицы «вершителей» определяется как процент разности соответствующих элементов этих матриц. Разность элементов матриц средних по классам нормируется по элементам одной из этих матриц, например по элементам из матрицы норма, и умножается на 100. К «вершителям» отнесем те элементы, у которых процент разности превысит некоторое пороговое значение. Спектральные коэффициенты, отнесенные к «вершителям», и будут вектором информативных признаков нейронной сети.

Рассмотрим схему алгоритма селекции «вершителей» (рис. 8).

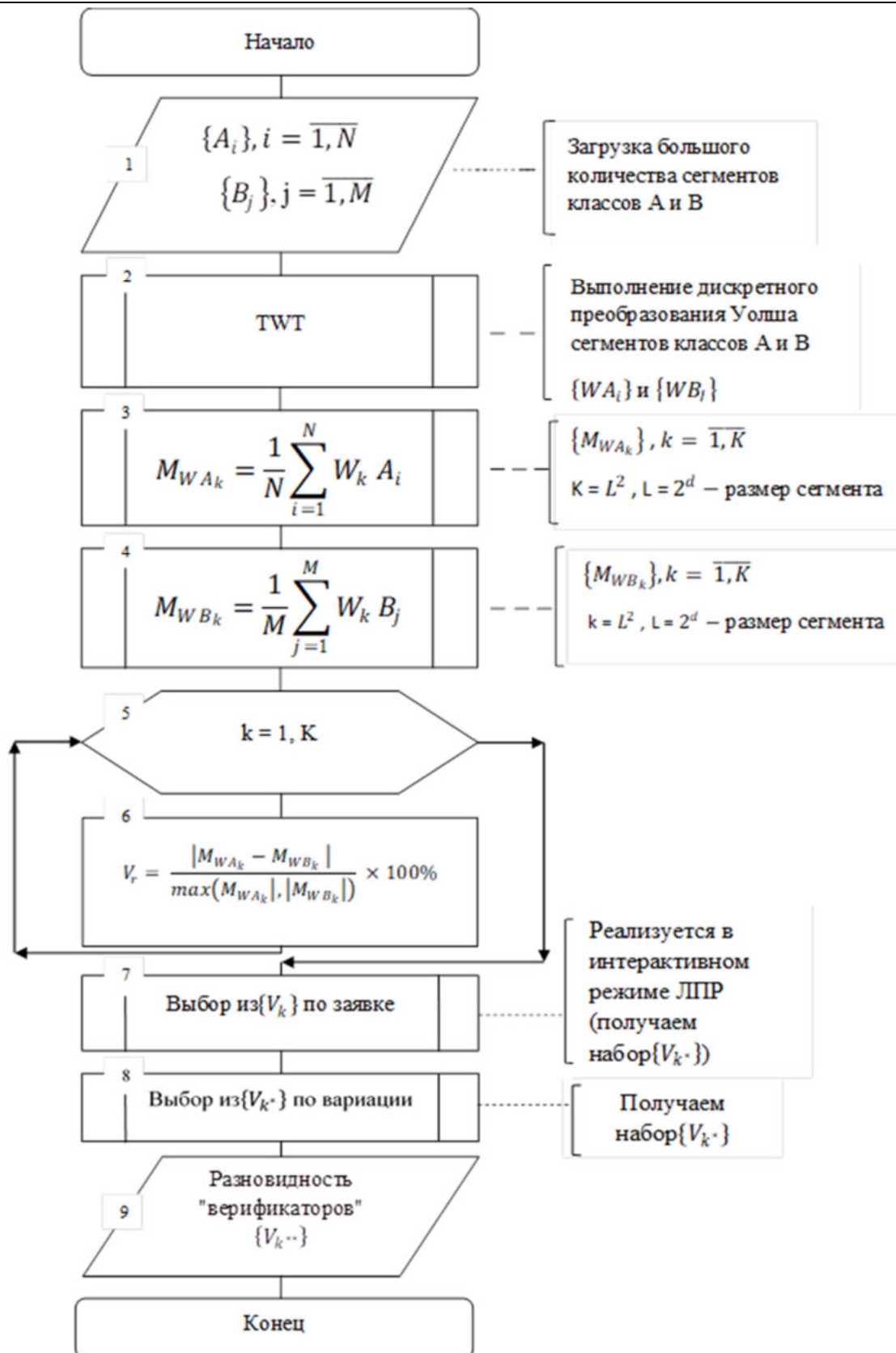


Рис. 8. Схема алгоритма селекции «вершителей»

Fig. 8. Scheme of the algorithm of selection of "vershitel"

Алгоритм работает с выборками двух классов размерами  $N$  и  $M$ . После определения их ДПУ (блок 2) получаем две выборки спектральных коэффициентов тех же размеров. Для коэффициентов в каждой выборке находим их математические ожидания (блоки 3 и 4).

$$M_{AWk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AWki, \quad (2)$$

$$M_{BWk} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M BWkj, \quad (3)$$

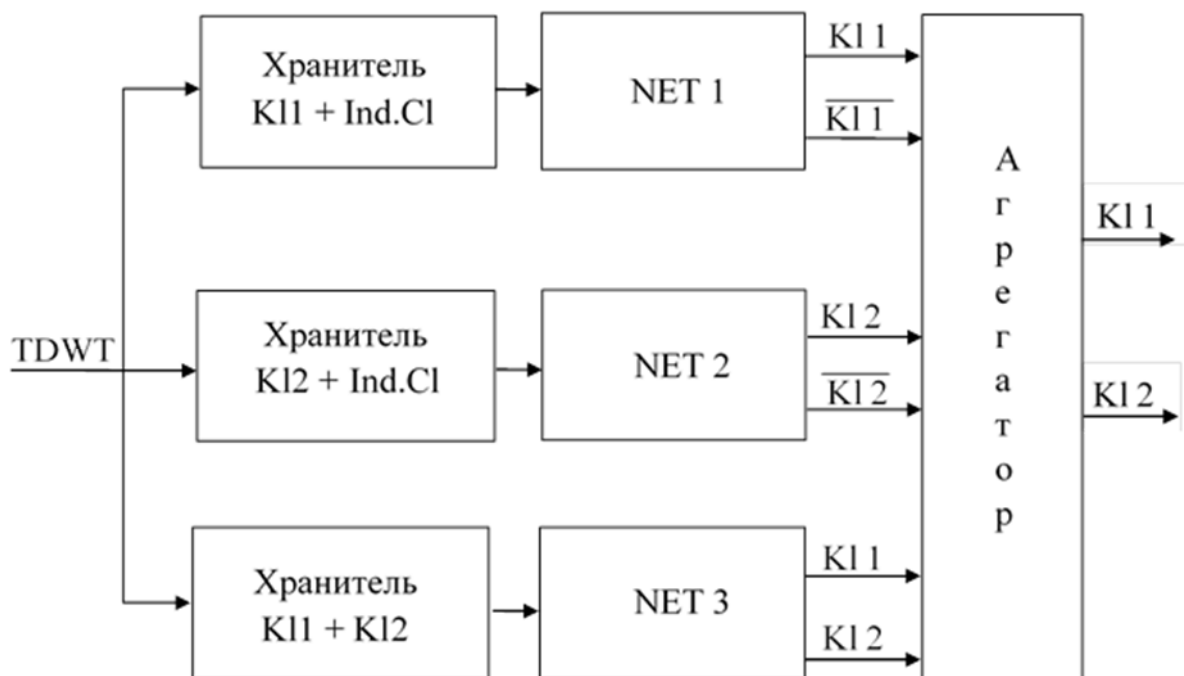
где  $AWki$  –  $k$ -й коэффициент Уолша  $i$ -го сегмента из выборки класса А;  $BWkj$  –  $k$ -й коэффициент Уолша  $j$ -го сегмента из выборки класса В.

Матрицу «вершителей» находим по формуле (блок 6)

$$V_k = \frac{|M_{AWk} - M_{BWk}|}{\max(|M_{AWk}|, |M_{BWk}|)} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Селекция «вершителей» по амплитуде (в процентах) осуществляется так же, как и «хранителей» (блок 7). Однако, чтобы выбрать окончательный пул «вершителей», необходимо исследовать их вариативность от сегмента к сегменту. Для этого у каждого «вершителя» определяются гистограмма по двум выборкам, и в зависимости от пересечения гистограмм ЛПР принимает окончательное решение о включении данного спектрального коэффициента в «вершители».

На рисунке 9 показана структурная схема «слабого» классификатора, в котором в качестве дескрипторов нейронных сетей используются «хранители» и «вершители».



**Рис. 9.** Блок-схема «слабого» классификатора: TDWT-двумерное преобразование Уолша; Int.Cl – индифферентный класс

**Fig. 9.** Block diagram of the "weak" classifier: TDWT-two-dimensional Walsh transform; Int.Cl – indifferent class

В связи с особенностями их формирования нейронные сети NET1 и NET2 разделяют сегмент на классы – *Класс1 – НЕ Класс1* и *Класс2 – НЕ Класс2* соответственно. Нейронная сеть NET3 разделяет классы 1 и 2. В качестве агрегатора решений этих трех нейронных сетей можно использовать полносвязную обучаемую нейронную сеть прямого

распространения или нечеткий модуль принятия решений.

### Результаты и их обсуждение

Для синтеза классификатора снимков видеопоследовательности было разработано программное обеспечение (ПО), интерфейсное окно которого показано ниже (рис. 10).

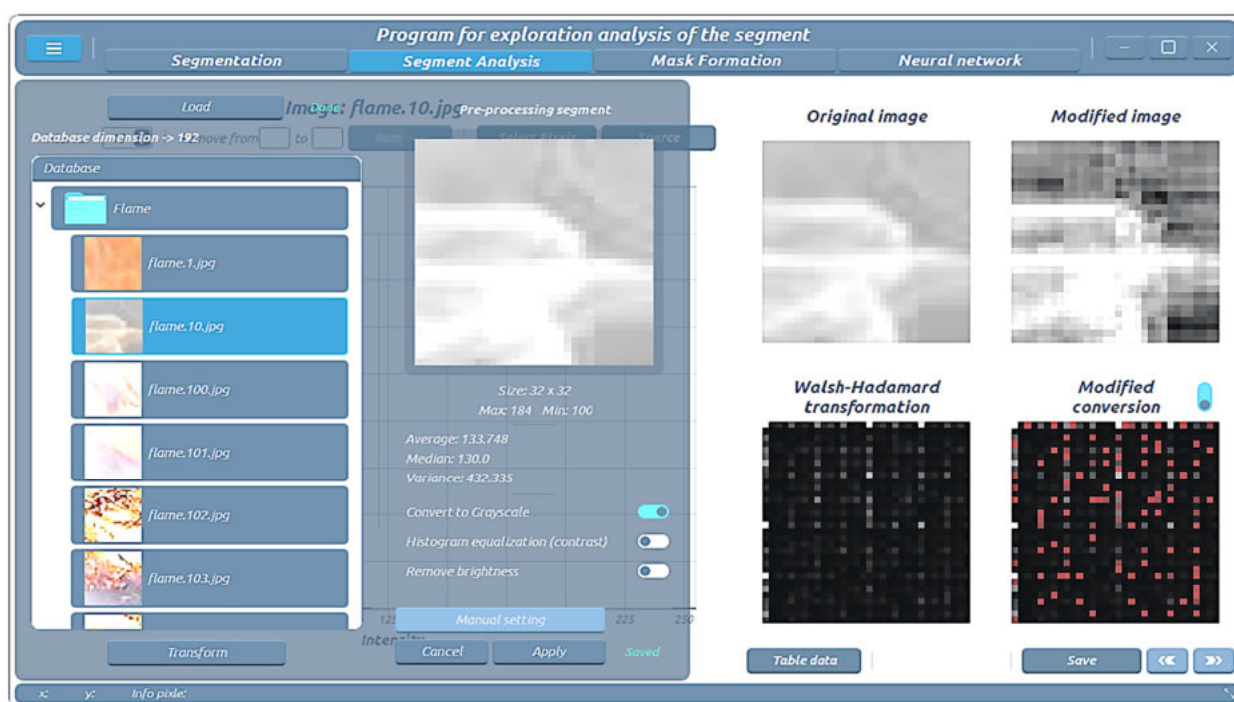


Рис. 10. Интерфейсное окно главного меню программного обеспечения

Fig. 10. Interface window of the main menu of the software

Главное меню ПО включает четыре программных модуля. Модуль Segmentation позволяет сегментировать снимок на прямоугольные сегменты заданного размера, например 32×32 пикселя. Модуль Segment Analysis осуществляет спектральный анализ сегментов. Модуль Mask Formation формирует дескрипторы для нейросетевого классификатора, а ПО модуля Neural network

позволяет синтезировать этот классификатор.

На рисунке 10 показан вид интерфейсного окна при работе модуля Segment Analysis с сегментом класса «Пламя». В левой части окна представлен фрагмент базы данных снимков этого класса. Пользователь может выбрать любой интересный ему сегмент и просмотреть его полутоновое изображе-

ние (представлено в верхней центральной части окна). В дальнейшем работаем только с полутоновыми изображениями. Кнопка Transform в левом нижнем углу окна позволяет вычислить преобразование Walsh – Hadamard выбранного сегмента (сегмента, изображение которого расположено в центральной части окна). В правой части окна представлены четыре изображения. Первое изображение, Original image, является копией изображения сегмента в центральной части окна. Изображение Modified image получено путем линейного расширения динамического диапазона исходного изображения по формуле

$$y_i = \frac{255}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot (x_i - x_{\min}), \quad (5)$$

где  $y_i$  – новая яркость  $i$ -го пикселя сегмента;  $x_i$  – исходная яркость  $i$ -го пикселя

сегмента;  $x_{\max}$  – максимальная яркость пикселей в сегменте;  $x_{\min}$  – минимальная яркость пикселей в сегменте.

Изображение Walsh – Hadamard transformation является полутоновым представлением спектра Walsh – Hadamard исходного сегмента, а изображение Modified conversion – полутоновым представлением спектра Walsh – Hadamard изображения Modified image. Так как спектральные коэффициенты могут принимать как отрицательные, так и положительные значения, то в кодах их полутонов отображаются их абсолютные величины.

На рисунке 11 показан вид интерфейсного окна при работе модуля Segment Analysis с сегментом класса «Дым». В левой части окна представлен фрагмент базы данных сегментов этого класса.

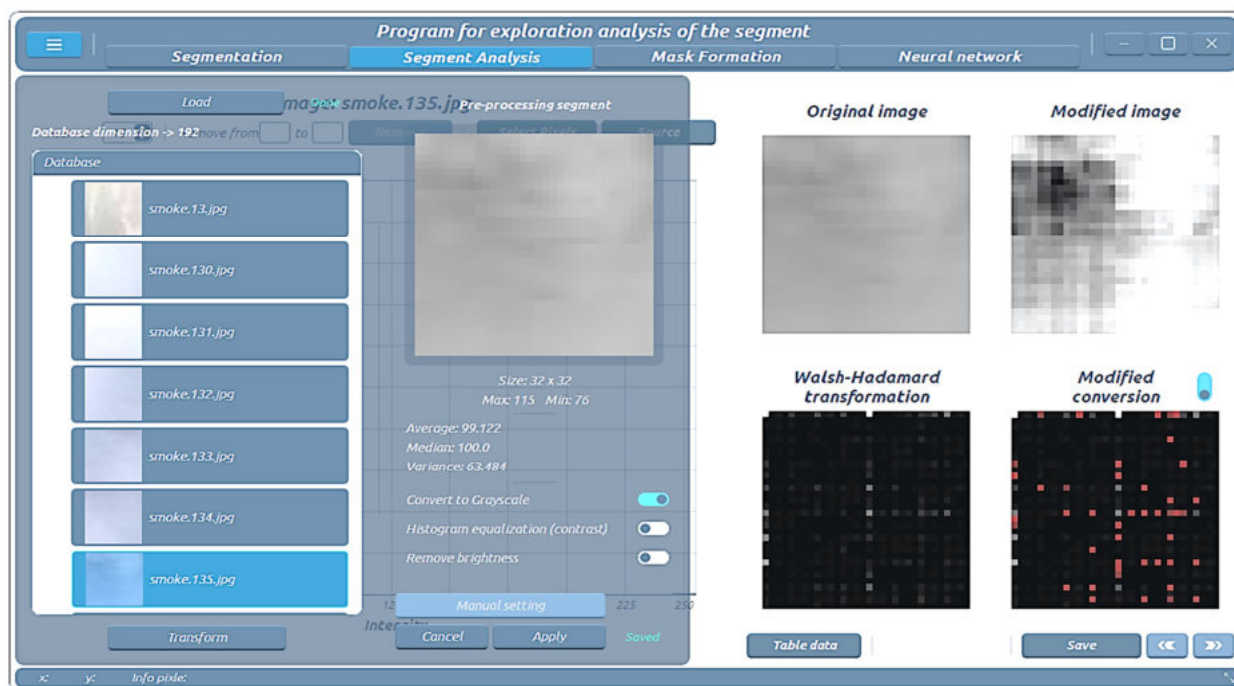


Рис. 11. Интерфейсное окно модуля Segment Analysis для сегмента класса «Дым»

Fig. 11. Interface window of the Segment Analysis module for the Smoke class segment



Используя ПО Segment Analysis, имеем возможность выбрать спектральные коэффициенты, которые относятся к «хранителям» признаков определенного класса. Если человеческий интеллект позволяет отнести данный сегмент к определенному классу, не прибегая к контенту, то исключение спектрального коэффициента-«хранителя» трансфор-

мирует исходное изображение таким образом, что оно переходит в индифферентный или альтернативный класс. Однако такая манипуляция с каждым сегментом требует неоправданно много времени и нуждается в автоматизации. С этой целью был сформирован модуль Mask Formation. Его окно представлено ниже (рис. 12).

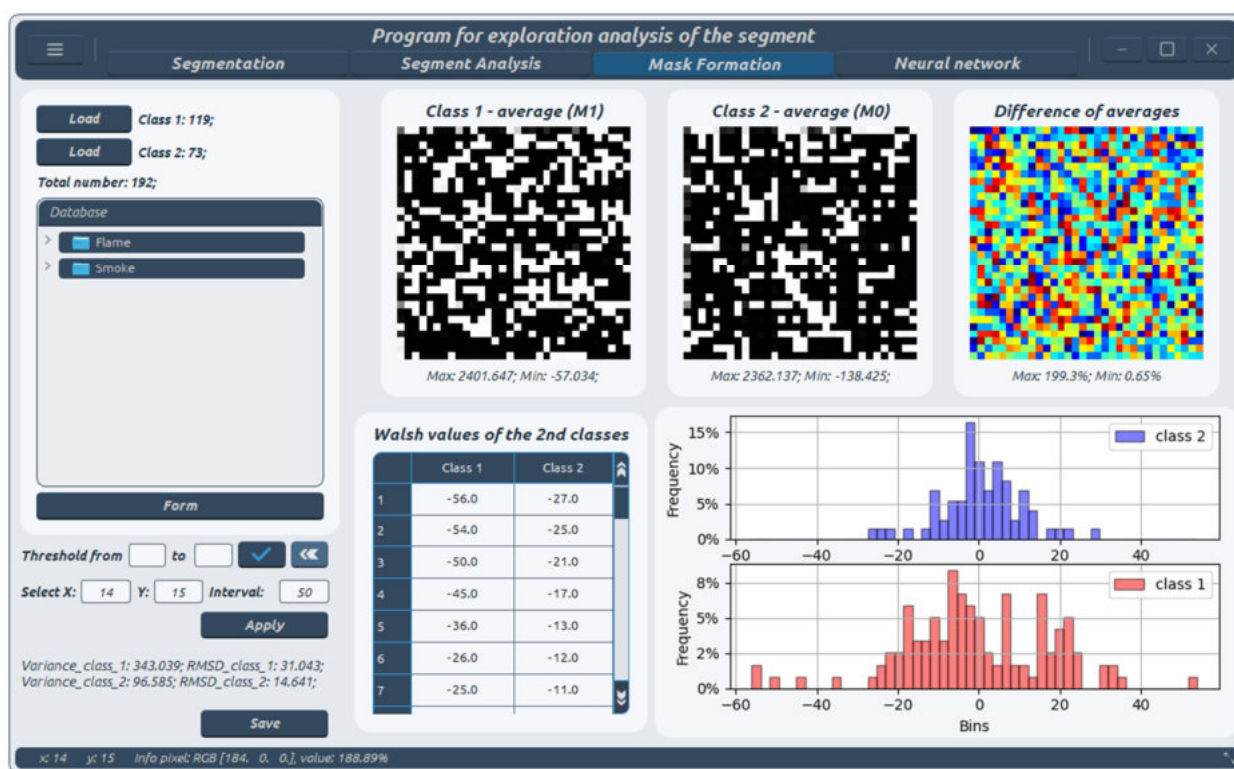


Рис. 12. Интерфейсное окно модуля Mask Formation

Fig. 12. Interface window of the Mask Formation module

В левой части этого окна находятся опции, предоставляющие доступ к базе данных сегментов. Эта база данных содержит спектральные представления изображений сегментов двух классов – Flame и Smoke. В базу данных были включены 119 изображений класса «Пламя» и 73 изображения класса «Дым». Для определения «хранителей»

в этом программном модуле используется подход, отличный от представленного выше.

На первом этапе поиска «хранителей» необходимо определить математические ожидания спектральных коэффициентов по выборкам первого и второго классов. Полутоновые изображения математических ожиданий спектральных

коэффициентов по выборкам первого и второго классов представлены в центре окна. В левом нижнем углу окна представлены гистограммы спектральных коэффициентов одного из пикселей, координаты которого заданы в левом нижнем углу окна (показаны координаты (14, 15)). С помощью движка прокрутки внизу в центре можно посмотреть числовые значения спектральных коэффициентов этого пикселя в выборках двух классов. Полагаем, что если математическое ожидание спектрального коэффициента близко к нулю, то он не может быть «хранителем». Поэтому на втором этапе поиска «хранителей» можем установить некоторый пороговый уровень, ниже которого все спектральные коэффициенты удаляются из претендентов на включение в вектор дескрипторов. В левом нижнем углу окна находятся транспаранты, в которые можно ввести диапазон, в котором осуществляется обнуление математических ожиданий спектральных коэффициентов. Обнулить математические ожидания можно щелчком «мыши» по соответствующему изображению. При этом, если математическое ожидание пикселя обнуляется, то спектральный коэффициент, имеющий координаты этого пикселя, не участвует в формировании дескрипторов.

Для определения «вершителей» получаем изображение, представленное в правом верхнем углу окна. Изображение полутоновое, но полутона кодируются цветом. Числовое значение  $i$ -го пикселя в изображении определяется по формуле

$$V_i = \frac{|M1_i - M2_i| \cdot 100\%}{\max(|M1_i|, |M2_i|)}, \quad (6)$$

где  $M1$  и  $M2$  – математические ожидания спектральных коэффициентов первого и второго класса в соответствующих пикселях.

Динамический диапазон переменной  $V_i$  составит от нуля до 200%. Вводя соответствующие пороги в соответствующие транспаранты, обнуляем элементы матрицы  $V$ , а ненулевые элементы матрицы определяют координаты спектральных коэффициентов, которые используются в качестве дескрипторов для обучаемых классификаторов, синтезируемых в окне Neural network.

## Выводы

Итак:

1. Разработан метод классификации очагов возгорания на изображениях, полученных с беспилотных летательных аппаратов в процессе мониторинга. Метод основан на формировании дескрипторов в анализируемых сегментах заданных размеров. В каждом сегменте формируются три окна стандартного размера, в которых определяются спектры Уолша-Адамара. Метод позволяет обучать классификаторы обнаружению заданных классов очагов возгорания на изображениях видеоданных, полученных с видеокамер БПЛА.

2. Установлены критерии качества для классификации очагов возгорания на изображениях видеоряда. На основе выбранных критериев качества сегментации классификаторы были протестированы.



### Список литературы

1. Chunyu Yu, Zhibin Mei, Xi Zhang. A Real-time Video Fire Flame and Smoke Detection Algorithm // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 62. P. 891–898.
2. Gubbi J., Marusic S., Palaniswami M. Smoke detection in video using wavelets and support vector machines // *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44. P. 1–6.
3. Rakkammal S., Surendar R. Forest Fire Detection and Protection Based on Convolutional Neural Network Using Deep learning Models. URL: [https://ijcrt.org/papers/IJCRT\\_195726.pdf](https://ijcrt.org/papers/IJCRT_195726.pdf) (дата обращения: 02.08.2022).
4. Zhang Li, DiDi Wu. Forest fire recognition based on dynamic feature similarity of multi-view images. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202104.0736/v2/download> (дата обращения: 11.08.2022).
5. Pu Li, Wangda Zhao. Image fire detection algorithms based on convolutional neural networks // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. N 19. P. 1–11.
6. Khan Muhammad, Jamil Ahmad, Irfan Mehmood, Seungmin Rho, Sung Wook Baik. Convolutional Neural Networks based Fire Detection in Surveillance Videos // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 18174–18183.
7. Chongyuan Tao, Jian Zhang, Pan Wang. Smoke Detection Based on Deep Convolutional Neural Networks // *International Conference on Industrial Informatics – Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration*. China, 2016.
8. Çeşmeci D., Güllü M. K. Phase-correlation-based hyperspectral image classification using multiple class representatives obtained with k-means clustering // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. N 30 (14). P. 3827–3834.
9. Borges J. S., Bioucas-Dias J. M., Marcal A. R. S. Bayesian Hyperspectral Image Segmentation With Discriminative Class Learning // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011. Vol. 49, N 6. P. 2151–2164. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2097268>.
10. Prabhpreet Kaur, Gurvinder Singh, Parminder Kaur. Intellectual detection and validation of automated mammogram breast cancer images by multi-class SVM using deep learning classification // *Informatics in Medicine Unlocked*. 2019. Vol. 16. P. 100151.
11. Разработка нейросетевой модели для прогнозирования состояния сердца и сердечно-сосудистой системы с использованием биоэлектрической обработки сигналов / С. Филист, Р. Т. Алкасасбе, О. Шаталова, А. Айкеева, Н. Корневский, А. Шакадан [и др.] // *Вычислительные методы Biomech Biomed Engin*. 2021. P. 1–14.
12. Применение нечеткой нейросетевой модели и анализа тока-напряжения биологически активных точек для прогнозирования послеоперационных рисков / О. Шаталова, С. Филист, Н. Корневская, Р. Т. Аль-касасбех, А. Шакадан, З. Протасова [и др.] // *Вычислительные методы Biomech Biomed Engin*. 2021. № 24 (13). P. 1504–1516.

13. Автоматизированная система классификации рентгенограмм молочной железы / А. Р. Дабагов, В. А. Горбунов, С. А. Филист, И. А. Малютина, Д. С. Кондрашов // Биомедицинская инженерия. 2020. Т. 53, № 6. С. 425–428. <https://doi.org/10.1007%2Fs10527-020-09957-7>.
14. Bilkent database. URL: <http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/FireClips/> (дата обращения: 10.08.2022).
15. Bakhshiev A. V., Gundelakh F. V. Application the Spiking Neuron Model with Structural Adaptation to Describe Neuromorphic Systems // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 103. P. 190–197.
16. Томакова Р. А., Филист С. А., Дураков И. В. Программное обеспечение для автоматической классификации рентгенограмм грудной клетки на основе гибридных классификаторов // *Экология человека*. 2018. № 6. С. 59–64.
17. Mici L., Parisi G. I., Wermter S. A self-organizing neural network architecture for learning human-object interactions // *Neurocomputing*. 2018. Vol. 307. P. 14–24.
18. Гибридные интеллектуальные модели для сегментации рентгеновских изображений грудной клетки / С. А. Филист, Р. А. Томакова, С. В. Дегтярев, А. Ф. Рыбочкин // *Биомедицинская инженерия*. 2018. Т. 51, № 5. С. 358–363. <https://doi.org/article/10.1007/s10527-018-9748-5>.
19. *Graphics Recognition Techniques Handbook of Document Image Processing and Recognition*, 2014, Josep Lladós, Marçal Rusiñol.
20. Deep learning for chest X-ray analysis: A survey / Erdi Çallı, Ecem Sogancioglu, Bram van Ginneken, Kicky G. van Leeuwen, Keelin Murphy // *Medical Image Analysis*. 2021. Vol. 72. P. 102125.
21. Формирование пространства признаков для задач классификации сложных структурированных изображений на основе спектральных окон и структур нейронных сетей / С. А. Филист, К. Д. Али Кассим, А. А. Кузьмин, О. В. Шаталова, Е. А. Алябьев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2016. № 4 (67). С. 56–68.
22. Comparing deep learning-based automatic segmentation of breast masses to expert interobserver variability in ultrasound imaging / Jeremy M. Webb, Shaheeda A. Adusei, Yining Wang, Naziya Samreen, Kalie Adler, Duane D. Meixner, Robert T. Fazzio, Mostafa Fatemi, Azra Alizad // *Computers in Biology and Medicine*. 2021. Vol. 139. P. 104966.
23. Моделирование морфологических образований на рентгенограммах грудной клетки в интеллектуальных диагностических системах медицинского назначения / П. С. Кудрявцев, А. А. Кузьмин, Д. Ю. Савинов, С. А. Филист, О. В. Шаталова // *Каспийский журнал: Менеджмент и высокие технологии*. 2017. № 3 (39). С. 109–120.

## References

1. Chunyu Yu, Zhibin Mei, Xi Zhang. A Real-time Video Fire Flame and Smoke Detection Algorithm. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 62, pp. 891–898.
2. Gubbi J., Marusic S., Palaniswami M. Smoke detection in video using wavelets and support vector machines. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, pp. 1–6.
3. Rakkammal S., Surendar R. Forest Fire Detection and Protection Based on Convolutional Neural Network Using Deep learning Models. Available at: [https://ijcrt.org/papers/IJCRT\\_195726.pdf](https://ijcrt.org/papers/IJCRT_195726.pdf). (accessed 02.08.2022)
4. Zhang Li, DiDi Wu. Forest fire recognition based on dynamic feature similarity of multi-view images. Available at: <https://www.preprints.org/manuscript/202104.0736/v2/download>. (accessed 11.08.2022)
5. Pu Li, Wangda Zhao. Image fire detection algorithms based on convolutional neural networks. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, no. 19, pp. 1–11.
6. Khan Muhammad, Jamil Ahmad, Irfan Mehmood, Seungmin Rho, Sung Wook Baik. Convolutional Neural Networks based Fire Detection in Surveillance Videos. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 18174–18183.
7. Chongyuan Tao, Jian Zhang, Pan Wang. Smoke Detection Based on Deep Convolutional Neural Networks. International Conference on Industrial Informatics – Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration. China, 2016.
8. Çeşmeci D., Güllü M. K. Phase-correlation-based hyperspectral image classification using multiple class representatives obtained with k-means clustering. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, no. 30 (14), pp. 3827–3834.
9. Borges J. S., Bioucas-Dias J. M., Marcal A. R. S. Bayesian Hyperspectral Image Segmentation With Discriminative Class Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, vol. 49, no. 6, pp. 2151–2164. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2097268>
10. Prabhpreet Kaur, Gurvinder Singh, Parminder Kaur. Intellectual detection and validation of automated mammogram breast cancer images by multi-class SVM using deep learning classification. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2019, vol. 16, p. 100151.
11. Filist S., Alkasasbe R. T., Shatalova O., Aikeeva A., Korenevskii N., Shakadan A., eds. Razrabotka neirosetevoi modeli dlya prognozirovaniya sostoyaniya serdtsa i serdechno-sosudistoi sistemy s ispol'zovaniem bioelektricheskoi obrabotki signalov [Development of a neural network model for predicting the state of the heart and cardiovascular system using bioelectric signal processing]. *Vychislitel'nye metody Biomech Biomed Engin = Computational Methods of Biomech Biomed Engine*, 2021, pp. 1–14.
12. Shatalova O., Filist S., Korenevskaya N., Al'kasasbekh R. T., Shakadan A., Protasova Z., eds. Primenenie nechetkoi neirosetevoi modeli i analiza toka-napryazheniya biologicheskii aktivnykh tochk dlya prognozirovaniya posleoperatsionnykh riskov [Application of

fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points to predict postoperative risks]. *Vychislitel'nye metody Biomech Biomed Engin = Computational Methods of Biomech Biomed Engine*, 2021, no. 24 (13), pp. 1504–1516.

13. Dabagov A. R., Gorbunov V. A., Filist S. A., Malyutina I. A., Kondrashov D. S. Avtomatizirovannaya sistema klassifikatsii rentgenogramm molochnoi zhelezy [Automated classification system of breast radiographs]. *Biomeditsinskaya inzheneriya = Biomedical Engineering*, 2020, vol. 53, no. 6, pp. 425–428. <https://doi.org/10.1007%2Fs10527-020-09957-7>

14. Bilkent database. Available at: <http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/FireClips>. (accessed 10.08.2022)

15. Bakhshiev A. V., Gundelakh F. V. Application the Spiking Neuron Model with Structural Adaptation to Describe Neuromorphic Systems. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 103, pp. 190–197.

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

17. Mici L., Parisi G. I., Wermter S. A self-organizing neural network architecture for learning human-object interactions. *Neurocomputing*, 2018, vol. 307, pp. 14–24.

18. Filist S. A., Tomakova R. A., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F. Gibridnye intellektual'nye modeli dlya segmentatsii rentgenovskikh izobrazhenii grudnoi kletki [Hybrid intelligent models for segmentation of chest X-ray images]. *Biomeditsinskaya inzheneriya = Biomedical Engineering*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 358–363. <https://doi.org/article/10.1007/s10527-018-9748-5>

19. Graphics Recognition Techniques Handbook of Document Image Processing and Recognition, 2014, Josep Lladós, Marçal Rusiñol.

20. Erdi Çallı, Ecem Sogancioglu, Bram van Ginneken, Kicky G. van Leeuwen, Keelin Murphy. Deep learning for chest X-ray analysis: A survey. *Medical Image Analysis*, 2021, vol. 72, p. 102125.

21. Filist S. A., Ali Kassim K. D., Kuz'min A. A., Shatalova O. V., Alyab'ev E. A. Formirovanie prostranstva priznakov dlya zadach klassifikatsii slozhnykh strukturirovannykh izobrazhenii na osnove spektral'nykh okon i struktur neironnykh setei [Formation of a feature space for classification problems of complex structured images based on spectral windows and neural network structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 4 (67), pp. 56–68.

22. Jeremy M. Webb, Shaheeda A. Adusei, Yinong Wang, Naziya Samreen, Kalie Adler, Duane D. Meixner, Robert T. Fazzio, Mostafa Fatemi, Azra Alizad. Comparing deep learning-based automatic segmentation of breast masses to expert interobserver variability in ultrasound imaging. *Computers in Biology and Medicine*, 2021, vol. 139, p. 104966.

23. Kudryavtsev P. S., Kuz'min A. A., Savinov D. Yu, Filist S. A., Shatalova O. V. Modelirovanie morfologicheskikh obrazovaniy na rentgenogramмах грудной клетки в интеллектуальных диагностических системах медицинского назначения [Modeling of morphological formations on radiographs of a breast cell in intelligent diagnostic systems for medical purposes]. *Kaspiiskii zhurnal: Menedzhment i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2017, no. 3 (39), pp. 109–120.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Филист Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: O-4610-2015, ORCID: 0000-0003-1358-671X

**Sergey A. Filist**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: O-4610-2015, ORCID: 0000-0003-1358-671X

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

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

**Нефедов Никита Геннадьевич**, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: niknefed@gmail.com

**Nikita G. Nefedov**, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: niknefed@gmail.ru

**Пузырев Евгений Игоревич**, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: puzyryov2000@mail.ru

**Evgeny I. Puzyrev**, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: puzyryov2000@mail.ru

**Горбачев Игорь Николаевич**, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Gorbachev.agps@yandex.ru

**Igor N. Gorbachev**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Gorbachev.agps@yandex.ru

### Нетрадиционное растительное сырье в пищевых системах функционального назначения

К. В. Завидовская<sup>1</sup>, Д. А. Алиева<sup>2</sup>, Л. П. Лазурина<sup>1</sup> ✉, Ю. М. Доценко<sup>1</sup>,  
Н. В. Джанчатова<sup>1</sup>, О. И. Басарева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Курский государственный медицинский университет Минздрава России  
ул. К. Маркса 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

<sup>2</sup> Северо-Кавказская государственная академия  
ул. Ставропольская 36, г. Черкесск 369001, Российская Федерация

✉ e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

#### Резюме

**Цель исследований** заключается в исследовании и обосновании целевого использования компонентов, как правило, продуктов естественного происхождения, которые при употреблении оказывали определенное лечебно-профилактическое действие на заданные системы или функции организма человека.

**Методы.** Объектами исследования являлись: растительное сырье травы зверобоя продырявленного (*Hyperici herba*), листья шалфея лекарственного (*Tinctura Salviae*), соцветия бархатцев распростертых (*Tagetes patula* L), мука плодов черемухи, безклеиковинное сырье – мука люпиновая «Люписан». Отбор и подготовку проб для лабораторных исследований проводили согласно единой методике изучения отечественных пищевых продуктов, готовых изделий – согласно ГОСТ 5904. Для извлечения биологически активных веществ из листьев шалфея лекарственного, зверобоя продырявленного и бархатцев распростертых применялись варианты экстракции: метод мацерации; метод перколяции; метод дробной мацерации.

**Результаты.** Установлено, что количество экстрактивных веществ в настояках зверобоя, полученных методом мацерации, при обеих концентрациях практически одинаково, а в случае настоек из шалфея и бархатцев количество экстрактивных веществ в настояках на 70%-ном спирте увеличивалось в 1,6 раза. Результаты проведенных исследований изучаемых вариантов экстракции показали, что наиболее эффективным методом экстрагирования является метод дробной мацерации, где количество экстрактивных веществ в настояках наибольшее, а концентрации этанола 40% и 70% не играют особой роли на их выход и могут быть взаимозаменяемы.

**Заключение.** Предложена схема производства настоек методом дробной мацерации, подобраны условия хроматографического определения рутина и спектрофотометрическое определение суммы флавоноидов. Обосновано применение обогащающих добавок, содержащих нетрадиционное растительное сырье (мука люпиновая, мука плодов черемухи, экстракт шалфея и экстракт бархатцев) с целью повышения пищевой и биологической ценности готовых изделий, обеспечивающих необходимую лечебно-профилактическую направленность.

Разработаны рецептурные составы и технология получения функциональных пищевых продуктов (хлеб и хлебобулочные изделия), содержащие обогащающие добавки.

**Ключевые слова:** биологически активные; лекарственное сырье; пищевые системы; экстракты; фитопрепараты; функциональные продукты.

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

**Для цитирования:** Нетрадиционное растительное сырье в пищевых системах функционального назначения / К. В. Завидовская, Д. А. Алиева, Л. П. Лазурина, Ю. М. Доценко, Н. В. Джанчатова, О. И. Басарева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 86–101. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2022-12-4-86-101](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-86-101).

Поступила в редакцию 19.09.2022

Подписана в печать 17.10.2022

Опубликована 22.12.2022

## On the Practical Application of Non-Traditional Plant Raw Materials in Food Systems

Ksenia V. Zavidovskaya<sup>1</sup>, Diana A. Alieva<sup>2</sup>, Lyudmila P. Lazurina<sup>1</sup> ✉,  
Yulia M. Dotsenko<sup>1</sup>, Natalia V. Dzhanchatova<sup>1</sup>, Olga I. Basareva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kursk State Medical University Ministry of Health of Russia  
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

<sup>2</sup> North Caucasian State Academy  
36 Stavropol Str., Cherkessk 369001, Russian Federation

✉ e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

### Abstract

**The purpose of research** is to study and substantiate the targeted use of components, usually products of natural origin, which, when used, had a certain therapeutic and preventive effect on given systems or functions of the human body.

**Methods.** The objects of the study were: vegetable raw materials of St. John's wort herb (*Hyperici herba*), medicinal sage leaves (*Tinctura Salviae*), inflorescences of marigolds prostrate (*Tagetes patula* L), cherry fruit flour, gluten-free raw materials - lupine flour "Lupisan". Sampling and preparation of samples for laboratory studies was carried out according to the unified methodology for studying domestic food products, finished products – according to GOST 5904. To extract biologically active substances from the leaves of medicinal sage, St. John's wort and marigolds prostrate, extraction options were used: maceration method; percolation method; fractional maceration method.

**Results.** It was found that the amount of extractives in St. John's wort tinctures obtained by maceration was almost the same at both concentrations, and in the case of sage and marigold tinctures, the amount of extractives in tinctures with 70% alcohol increased 1,6 times. The results of the studies of the extraction options under study showed that the most effective extraction method is the fractional maceration method, where the amount of extractive substances in tinctures is the largest, and ethanol concentrations of 40% and 70% do not play a special role in their yield and can be interchangeable.

**Conclusion.** A scheme for the production of tinctures by fractional maceration is proposed, conditions for chromatographic determination of rutin and spectrophotometric determination of the amount of flavonoids are selected. The use of enriching additives containing non-traditional vegetable raw materials (lupine flour, cherry fruit flour, sage extract and marigold extract) is justified in order to increase the nutritional and biological value of finished products that provide the necessary therapeutic and preventive orientation. Formulations and technology for the production of functional food products (bread and bakery products) containing enriching additives have been developed.

**Keywords:** biologically active; medicinal raw materials; food systems; extracts; phytopreparations; functional products.

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

**For citation:** Zavidovskaya K. V., Alieva D. A., Lazurina L. P., Dotsenko Y. M., Dzhanchatova N. V., Basareva O. I. On the Practical Application of Non-Traditional Plant Raw Materials in Food Systems. *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(4): 86–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-86-101>.

Received 19.09.2022

Accepted 17.10.2022

Published 22.12.2022

\*\*\*

## Введение

В настоящее время не только в России, но и во всем мире происходят негативные изменения в структуре питания людей на фоне неблагоприятной экологической ситуации. Эпидемиологические исследования показали весьма существенные недостатки несбалансированного питания россиян. Наиболее быстрым и экономически обоснованным является создание и применение биологически активных веществ при производстве продуктов питания, например, в пролонгировании сроков годности и общей хранимоспособности. Поэтому повысился интерес к биохимическому синтезу противомикробных средств с жизненно важными металлами. Согласно проведенным исследованиям, такие соединения обладают более высокой биологической активностью, широким спектром действия и меньшей токсичностью [1; 2; 3; 4; 5].

Необходимостью изучения основных причин, способствующих развитию различных заболеваний, является снижение продолжительности жизни россиян и связанные с этим социально-экономические потери. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики РФ, у 40% мужчин и 55%

женщин отмечены заболевания, связанные с нарушением питания: диабет, анемия, болезни желудочно-кишечного тракта и т. д. Одним из путей профилактики этих заболеваний является коррекция питания за счет наличия в продуктах питания функциональных ингредиентов. В связи с этим ежегодно мировой рынок функциональных продуктов увеличивается на 20%, что и определяет важнейшее научное направление – развитие производства функциональных продуктов на основе нетрадиционного растительного сырья, основанного на современных представлениях физиологии об адаптации, гомеостазе и теории функционального питания [6; 7; 8; 9].

В настоящее время ученые и предприятия-изготовители проявляют все большее внимание к лекарственным препаратам на основе природного растительного сырья. Истинный потенциал отечественных лекарственных растений, несмотря на длительный срок их применения в народной и официальной медицине, далеко не полностью раскрыт [10; 11].

Поэтому комплексные исследования по выяснению целесообразности и возможности использования нетрадиционного растительного сырья в производ-



стве пищевых изделий лечебно-профилактического назначения актуальны и перспективны.

Тенденция развития лекарственной терапии последних десятилетий также характеризуется значительным использованием в медицине фитопрепаратов [12; 13; 14]. Это объясняется прежде всего тем, что препараты растительного происхождения лучше переносятся больными, обычно не вызывают аллергических реакций и не оказывают побочного действия.

Экстракционные препараты могут обладать разносторонним физиологическим действием, поэтому они представляют собой особую группу ценных лекарственных средств. Значимость их возрастает в связи с производством таких уникальных препаратов, как препараты ферментов и гормонов, фитонцидов и биогенных стимуляторов, воспроизводство которых синтетическим путем невозможно или экономически невыгодно.

Настойки относятся к экстракционным препаратам из лекарственного растительного сырья. Номенклатура настоек в настоящее время чрезвычайно разнообразна. Применение настоек в современной медицинской практике для лечения и профилактики ряда заболеваний, увеличения неспецифической резистентности организма больного, а также проведенные в последние годы многочисленные научные исследования и клинические испытания значительно повысили интерес к этим малотоксичным и

эффективным препаратом. В этой связи в настоящее время возрастают требования к производству, оценке качества, эффективности и безопасности фитопрепаратов, содержащих нативные комплексы биологически активных веществ, выделяемые из растений в виде водно-спиртовых и других извлечений.

Анализ изученной литературы показал, что получившие практическое применение методы получения настоек не являются оптимальными. Основной задачей экстракционных производств следует считать дальнейшее усовершенствование и оптимизацию технологии экстрагирования лекарственного растительного сырья [13; 15; 16].

Эффективность фитопрепаратов в большинстве случаев зависит от условий их производства, т. е. применения того или иного метода экстрагирования лекарственного растительного сырья. Выбор оптимального способа получения извлечения при производстве фитопрепарата является определяющим и решающим моментом в технологическом процессе. Извлекаемый комплекс экстрактивных веществ будет в дальнейшем характеризовать качество и эффективность данного лекарственного препарата.

Учитывая несовершенство имеющейся нормативной документации на настойки, а также широкий спектр практической направленности изучаемых объектов, необходимость разработки методов контроля качества настоек по содержанию одной из основных групп

действующих соединений – флавоноидов следует считать актуальным [13; 16].

Однако привлечение дополнительных сырьевых растительных ресурсов, обладающих высокой пищевой и биологической ценностью, нельзя считать исчерпанным [6; 17].

Накопленный в литературе научно-исследовательский материал об использовании натуральных обогатителей показывает целесообразность их применения в производстве пищевых изделий функциональной направленности [18; 19; 20].

Таким образом, исследования, направленные на обоснование рационального использования нетрадиционного растительного сырья и продуктов их переработки с высоким содержанием биологически активных веществ, создания на их основе технологий производства пищевых продуктов функционального назначения, являются актуальными.

Целью настоящей работы являются комплексные исследования по выяснению целесообразности и возможности использования нетрадиционного растительного сырья в пищевых продуктах функционального назначения.

## Материалы и методы

Объектами исследования являлись: растительное сырье травы зверобоя продырявленного (*Hyperici herba*), листья шалфея лекарственного (*Tinctura Salviae*), соцветия бархатцев распростер-

тых (*Tagetes patula* L), мука плодов черемухи, безклейковинное сырье – мука люпиновая «Люписан».

Отбор и подготовку проб для лабораторных исследований проводили согласно единой методике изучения отечественных пищевых продуктов, готовых изделий – согласно ГОСТ 5904. Контрольные и опытные образцы готовились из одних партий сырья.

Применяемое сырьё по показателям качества и безопасности соответствовало требованиям нормативных и технических документов, в соответствии с которыми оно изготовлено, и техническому регламенту ТР ТС 021/2011.

В работе применялись общепринятые и специальные органолептические, физико-химические, микробиологические, структурно-механические методы исследования свойств исходного сырья и готовый продукции, хроматографическое определение рутина, спектрофотометрическое определение суммы флавоноидов и статические методы анализа.

Противомикробные исследования в работе были проведены в соответствии с рекомендациями Фармакопеи на штаммах микроорганизмов и грибов, полученных из коллекции ГИСК им. Л. А. Тарасевича (г. Москва): *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Staphylococcus aureus* 209-P, *Bacillus subtilis* ATCC 6633, *Bacillus cereus* ATC 10702, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Proteus vulgaris* ATCC 4636, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, *Candida albicans* NCTC 2625.

## Результаты и их обсуждение

Для извлечения биологически активных веществ из листьев шалфея лекарственного, зверобоя продырявленного и бархатцев распростертых применяли несколько вариантов экстракции: метод мацерации; метод перколяции; метод дробной мацерации.

Сырье высушивали при температуре 40°C, измельчали до размера частиц 1–3 мм. В качестве экстрагентов использовали водно-спиртовые растворы (40 и 70%). Дно лабораторного мацерационного бака (настойника) застилали фильтрующей тканью, укладывали растительное сырье и заливали рассчитанным количеством этанола. Плотнo закрывали крышкой и оставляли на 7 суток. Вытяжку сливали. Отработанное сырье подвергали прессованию с помощью ручного пресса, полученное извлечение присоединяли к первому. Извлечение переносили в отстойник и оставляли при температуре 10°C на двое суток, затем фильтровали через бумажный фильтр. Фасовали во флаконы темного стекла с пластмассовой пробкой и навинчивающимся колпачком.

Изучали влияние технологии и концентрации этанола на выход экстрактивных веществ (сухой остаток). Определение сухого остатка проводили по методике Государственной фармакопеи XI издания.

Установлено, что количество экстрактивных веществ в настойках зверобоя, полученных методом мацерации, при обеих концентрациях практически одинаково, а в случае настоек из шалфея и бархатцев количество экстрактивных веществ в настойках на 70% спирте увеличивалось в 1,6 раза.

Результаты проведенных исследований изучаемых вариантов экстракции показали, что наиболее эффективным методом экстрагирования является метод дробной мацерации, где количество экстрактивных веществ в настойках наибольшее, а концентрации этанола 40% и 70% не играют особой роли на их выход и могут быть взаимозаменяемы.

Технологическая схема производства настоек складывается из нескольких стадий: вспомогательные работы; экстрагирование; очистка извлечения; стандартизация; фасовка, упаковка, маркировка; рекуперация экстрагента из отработанного сырья.

Технологическая схема получения настоек методом дробной мацерации представлена ниже (рис.).

В работе предложена стандартизация настоек по содержанию этанола и подобраны условия хроматографического определения рутина и спектрофотометрического определения суммы флавоноидов в настойках.

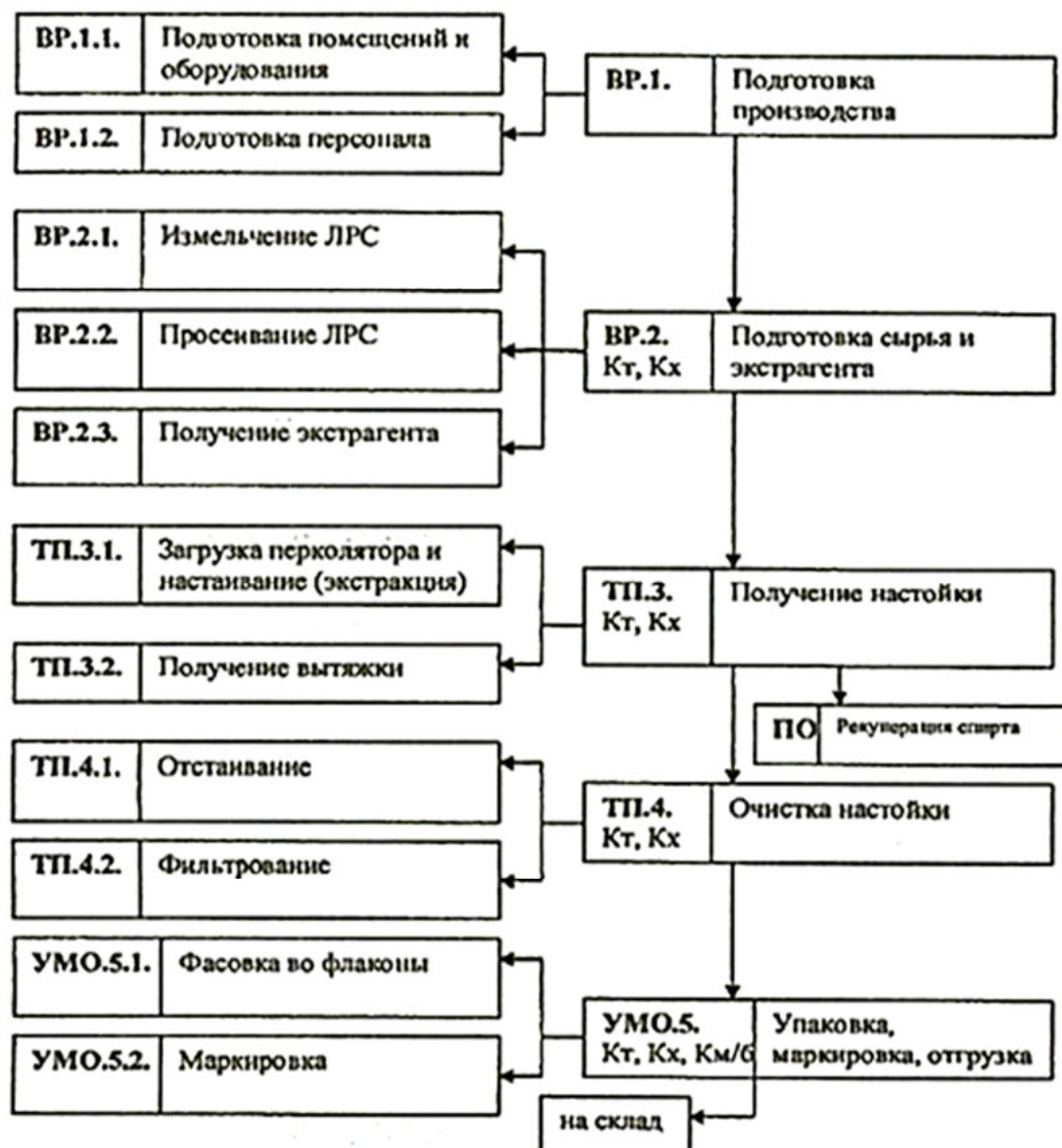


Рис. Технологическая схема получения настоек методом дробной мацерации

Fig. Technological scheme for obtaining tinctures by fractional maceration

Следующий этап заключался в изучении возможности практического применения нетрадиционного растительного сырья в пищевых продуктах.

Важным фактором, определяющим здоровье человека, является питание. Одно из приоритетных направлений государственной политики РФ заключается в создании пищевой продукции, способ-

ной удовлетворять физиологические потребности организма человека в пищевых веществах и энергии, а также пищевой продукции нового поколения с заданными качественными характеристиками, обеспечивающими питание и профилактику различных заболеваний в целях увеличения продолжительности и повышения качества жизни граждан РФ.

Создание новых видов хлеба и хлебобулочных изделий является актуальным, так как это продукты ежедневного спроса.

Качество хлеба может быть повышено разными способами, в частности, внедрением технологии переработки доступного нетрадиционного растительного сырья, что не приведет к существенному удорожанию готовых продуктов. При разработке рецептуры хлебобулочных изделий нами в качестве компонентов использовалось растительное сырье в виде муки люпиновой и экстракта шалфея.

Положительным качеством муки люпиновой является отсутствие глютена, высокое содержание белка, наличие пищевых волокон, обладающих влагоудерживающими свойствами. Антиоксидантные свойства муки обусловлены присутствием в ее составе токоферолов, каротиноидов и лецитина. Кроме того, она способствует улучшению структуры хлебобулочных изделий.

Большой интерес представляет мука плодов черемухи, содержащая биологически активные вещества (почти все витамины, большое количество макро- и микроэлементов и др.), оказывающие положительное влияние на деятельность всех систем организма.

В составе плодов черемухи обнаружены антиоксиданты и эндорфины, яблочная, аскорбиновая и лимонная кислота, бета-каротин, эфирные масла, пектин, флаваноиды, а также бензойный альдегид, который обеспечивает растению фитонцидные свойства, т. е. антибактериальный и противогрибковый эффект.

Таким образом, плоды черемухи проявляют противовоспалительный эффект, способствуют нормализации деятельности желудочно-кишечного тракта, укреплению сосудов, иммунитета, суставов, благотворно влияют на нервную систему, на деятельность мочевыделительной системы, улучшают состояние кожи.

Согласно маркетинговым исследованиям, значительно повысился спрос на мучные кондитерские изделия, в частности пряники, доля которых составляет около 70% от общего производства кондитерских изделий.

Предложенная нами рецептура пряничных изделий включала муку плодов черемухи и экстракты шалфея и бархатцев.

Рассмотрим результаты исследований органолептических и физико-химических показателей качества представлены (табл. 1, 2).

**Таблица 1.** Органолептические показатели качества пряников, содержащих муку плодов черемухи и экстракты шалфея и бархатцев**Table 1.** Organoleptic quality indicators of gingerbread containing cherry fruit flour and sage and marigold extracts

Показатели качества	Требования ГОСТ	Количество муки плодов черемухи, % к массе пшеничной муки		
		0	2,0	4,0
Форма	Правильная, соответствующая данному наименованию, без вмятин, края ровные			
Поверхность	Выпуклая, неподгорелая, без вкраплений крошек, нижняя сторона ровна			
Цвет	Свето-желтый		Золотистый	Коричневый
Вкус и аромат	Свойственные данному наименованию изделий		Приятный, выраженный шоколадный аромат	
Вид в изломе	Разрыхленное, пропеченное изделие, без следов непромеса, с равномерной пористостью			

**Таблица 2.** Физико-химические показатели качества пряников, содержащих муку плодов черемухи и изучаемые экстракты растительного сырья**Table 2.** Physico-chemical quality indicators of gingerbread containing cherry fruit flour and studied extracts of plant raw materials

Показатели качества	Требования ГОСТ	Количество муки плодов черемухи, % к массе пшеничной муки		
		0	2,0	4,0
Влажность, %	10,6±2	11,2	11,4	11,8
Намокаемость, %, не менее	220	239	238	240
Щелочность, град, не более	2,0	1,4	1,39	1,40
Плотность, г/см <sup>3</sup> , не более	0,58	0,35	0,54	0,63

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что добавление муки плодов черемухи и экстрактов растительного сырья не повлияло на изменение формы и поверхности пряника. Добавление 2,0–4,0% муки черемухи и экстрактов бархатцев и шалфея придало пряникам золотистый цвет и приятный шоколадный вкус и аромат. Внесённое количество муки черемухи (2,0–4,0%) не изменило вид на изломе и не уплотнило пряники, т. е. пряники

с добавкой муки плодов черемухи и изучаемых экстрактов отвечают требованиям ГОСТ.

Массовая доля влаги пряников, полученных с изучаемыми добавками, увеличилась, а щёлочностью уменьшилась, оставаясь в пределах требований ГОСТ.

Добавление муки черемухи 2,0–4,0% незначительно увеличило намокаемость пряника, а плотность соответствовала хорошей пористости изделия.

## Выводы

Показано влияние технологии получения и концентрации спирта на выход экстрактивных веществ в настойках зверобоя продырявленного, шалфея лекарственного и бархатцев распростертых. Установлено, что наиболее эффективным методом экстрагирования является метод дробной мацерации (сухой остаток наибольший), а концентрации этанола 40% и 70% не оказывают значимого влияния на выход экстрактивных веществ и могут быть взаимозаменяемы.

Предложена схема производства настоек методом дробной мацерации, подобраны условия хроматографического определения рутина и спектрофотометрическое определение суммы флавоноидов в пересчете на рутин в изучаемых настойках.

Обосновано применение обогащающих добавок, содержащих нетрадиционное растительное сырье (мука люпиновая, мука плодов черемухи, экстракт шалфея и экстракт бархатцев) с целью повышения пищевой и биологической

ценности готовых изделий, обеспечивающих необходимую лечебно-профилактическую направленность.

Разработаны рецептурные составы и технология получения функциональных пищевых продуктов (хлеб и хлебобулочные изделия), содержащие обогащающие добавки.

Таким образом, введение в рецептуру пряника 2,0–4,0% муки черемухи и изучаемых экстрактов к массе пшеничной муки улучшает органолептические и физико-химические показатели и является оптимальным. За счёт повышения массовой доли влаги установлено повышение выхода изделия. Необходимо отметить, что введение муки плодов черемухи и растительных экстрактов значительно повышает пищевую и биологическую ценность готовых изделий (аминокислоты, витамины, макро- и микроэлементы и т. д.). Пряники, полученные по этой технологии, обеспечивают необходимую лечебно-профилактическую направленность и могут быть отнесены к изделиям функционального назначения, что является приоритетным направлением научных исследований.

## Список литературы

1. Биологическая активность металлосодержащих соединений для использования в пищевых системах / Л. П. Лазурина, К. В. Завидовская, Я. В. Тихонова, Д. А. Алиева, О. И. Басарева, Н. В. Джанчатова // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2022. № 4 (75). С. 15–22.
2. Лазурина Л. П. Роль комплексных соединений металлов в становлении металлолигандного гомеостаза и донозологической диагностики: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Московская медицинская академия. М., 1995. 43 с.

3. Серкина И. С., Лукашов М. М. Разработка состава технологии получения многокомпонентной биокорректирующей композиции, иммобилизированной соединениями // Горизонты биофармацевтики: сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической молодежной конференции. Курск: Курский государственный медицинский университет, 2019. С. 37–38.

4. Получение и перспективы применения металлсодержащих биокорректоров в составе пленочных покрытий для поддержания здоровья человека // Л. П. Лазурина, Я. В. Тихонова, Д. А. Алиева, Л. В. Антипова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 2 (68). С. 189–192.

5. Изучение противомикробной активности полимерных форм, содержащих комплексные соединения меди и железа / А. Самофалов, Я. Тихонова, Е. Артюшкова, И. Серкина, К. Завидовская, Л. Лазурина // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. С. 352.

6. Доронин А. Ф., Шендеров Б. А. Функциональное питание. М.: Грантъ, 2002. 296 с.

7. Диетология / под ред. А. Ю. Барановского. 4-е изд. СПб.: Питер, 2013. 1024 с.

8. Спасов А. А., Ивахненко И. В., Гурова Н. А. Биологически активные добавки к пище как основа фармаконутрициологии // Новые лекарства и новости фармакотерапии. 2002. № 1. С. 27–40.

9. Поздняковский В. М., Австриевских А. Н., Вековцев А. А. Пищевые и биологически активные добавки. 2-е изд., испр. и доп. М.: Российские университеты, 2005. 275 с.

10. Орещенко А. В., Берестень А. Ф. О пищевых добавках и продуктах питания // Пищевая промышленность. 1996. № 6. С. 4.

11. Завидовская К. В., Лазурина Л. П. Изучение возможности обогащения хлебобулочных изделий комплексной добавкой // Университетская наука: взгляд в будущее: сборник научных трудов по материалам Международной научной конференции, посвященной 85-летию Курского государственного медицинского университета: в 2 т. Курск: Курский государственный медицинский университет, 2020. С. 703–704.

12. Харкевич Л. Л. Фармакология. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. 736 с.

13. Коренькин Д. Ю., Абилов Ж. А., Толстиков Г. А. Природные флавоноиды. Новосибирск: Наука, 2007. 296 с.

14. Фитоэкстракты и пробиотики для повышения микробиологической стойкости и антиоксидантной активности хлебобулочных изделий / Е. А. Кузнецова, А. В. Ковалева, Я. Бриндза, О. П. Довгер, К. М. Лопата, Л. П. Лазурина, Е. А. Кузнецова // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2019. № 2 (55). С. 87–92.



15. Шубина Г. Н., Лазурина Л. П. Совершенствование технологии и стандартизации настойки шалфея // Университетская наука: взгляд в будущее: сборник научных трудов по материалам Международной научной конференции, посвященной 83-летию Курского государственного медицинского университета: в 2 т. / под ред. В. А. Лазаренко. Курск: Курский государственный медицинский университет, 2018. С. 105–108.
16. Шубина Г. Н., Лазурина Л. П. Совершенствование стандартизации настоек, содержащих флавоноиды // Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 25-летию биотехнологического факультета и 20-летию кафедры биологической и химической технологии. Курск: Курский государственный медицинский университет, 2017. С. 44–47.
17. Антипова Л. В., Сторублевцев С. А., Успенская М. Е. Молекулярно-биологические основы питания / Воронежский государственный университет инженерных технологий. Воронеж, 2015. 542 с.
18. Воронина Л. П. Вопросы рационального питания у пожилых людей // Медицинские новости. 2007. № 6. С. 36–41.
19. Тутельян В. А. Медико-социальная значимость БАД, их роль в коррекции пищевого рациона, лечении и профилактике заболеваний: доклад РАМН. М., 2002.
20. Малков Ю. А., Иванова Н. В., Бабкин В. А. Кинетика процесса экстракции коры лиственницы этилацетатом // Химия растительного сырья. 2012. № 32. С. 63.

## References

1. Lazurina L. P., Zavidovskaya K. V., Tikhonova Ya. V., Alieva D. A., Basareva O. I., Dzhanchatova N. V. Biologicheskaya aktivnost' metallosoderzhashchikh soedinenii dlya ispol'zovaniya v pishchevykh sistemakh [Biological activity of metal-containing compounds for use in food systems]. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov = Technology and Commodity Science of Innovative Food Products*, 2022, no. 4 (75), pp. 15–22.
2. Lazurina L. P. Rol' kompleksnykh soedinenii metallov v stanovlenii metallo-ligandnogo gomeostaza i donozologicheskoi diagnostike. Avtoref. diss. dokt. biolog. nauk [The role of complex metal compounds in the formation of metal-ligand homeostasis and prenosological diagnostics. Dr. biolog. sci. abstract diss.]. Moscow, Moscow Medical Academy Publ., 1995. 43 p.
3. Serkina I. S., Lukashov M. M. [Development of the composition of the technology for obtaining a multicomponent biocorrecting composition immobilized by compounds].

*Gorizonty biofarmatsevtiki. Sbornik nauchnykh trudov po materialam V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi molodezhnoi konferentsii* [Horizons of biopharmaceuticals. Collection of scientific papers on the materials of the V International Scientific and Practical Youth Conference]. Kursk, Kursk State Medical University Publ., 2019, pp. 37–38. (In Russ.)

4. Lazurina L. P., Tikhonova Ya. V., Alieva D. A., Antipova L. V. Poluchenie i perspektivy primeneniya metallsoedyneniy biokorrektorov v sostave plenochnykh pokrytii dlya podderzhaniya zdorov'ya cheloveka [Obtaining and prospects for the use of metal-containing biocorrectors as part of film coatings to maintain human health]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2016, no. 2 (68), pp. 189–192.

5. Samofalov A., Tikhonova Ya., Artyushkova E., Sekerina I., Zavidovskaya K., Lazurina L. Izuchenie protivomikrobnogo aktivnosti polimernykh form, soedyneniy medi i zheleza [Study of antimicrobial activity of polymer forms containing complex compounds of copper and iron]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 1, p. 352.

6. Doronin A. F., Shenderov B. A. Funktsional'noe pitanie [Functional nutrition]. Moscow, Grant Publ., 2002. 296 p.

7. Dietologiya [Dietology]; ed. by A. Yu. Baranovsky. 4<sup>th</sup> ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2013. 1024 p.

8. Spasov A. A., Ivakhnenko I. V., Gurova N. A. Biologicheski aktivnye dobavki k pishche kak osnova farmakonutritsiologii [Biologically active food additives as the basis of pharmaconutritionology]. *Novye lekarstva i novosti farmakoterapii = New Medicines and Pharmacotherapy News*, 2002, no. 1, pp. 27–40.

9. Pozdnyakovskii V. M., Avstrieviskikh A. N., Vekovtsev A. A. Pishchevye i biologicheski aktivnye dobavki [Food and biologically active additives]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Rossiiskie universitety Publ., 2005. 275 p.

10. Oreshchenko A. V., Beresten' A. F. O pishchevykh dobavkakh i produktakh pitaniya [About food additives and food products]. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry*, 1996, no. 6, p. 4.

11. Zavidovskaya K. V., Lazurina L. P. [Studying the possibility of enriching bakery products with a complex additive]. *Universitetskaya nauka: vzglyad v budushchee. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu Kurskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* [University Science: a look into the future. A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific Conference dedicated to the 85<sup>th</sup> anniversary of the Kursk State Medical University]. Kursk, Kursk State Medical University Publ., 2020, pp. 703–704. (In Russ.)

12. Kharkevich L. L. *Farmakologiya* [Pharmacology]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2006. 736 p.
13. Korul'kin D. Yu., Abilov Zh. A., Tolstikov G. A. *Prirodnye flavonoidy* [Natural flavonoids]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 296 p.
14. Kuznetsova E. A., Kovaleva A. V., Brindza Ya., Dovger O. P., Lopata K. M., Lazurina L. P., Kuznetsova E. A. *Fitoekstrakty i probiotiki dlya povysheniya mikrobiologicheskoi stoikosti i antioksidantnoi aktivnosti khlebobulochnykh izdelii* [Phytoextracts and probiotics for increasing microbiological resistance and antioxidant activity of bakery products]. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov = Technology and Commodity Science of Innovative Food Products*, 2019, no. 2 (55), pp. 87–92.
15. Shubina G. N., Lazurina L. P. [Improving the technology and standardization of sage tincture]. *Universitetskaya nauka: vzglyad v budushchee. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 83-letiyu Kurskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* [University Science: a look into the future. A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific Conference dedicated to the 83<sup>rd</sup> anniversary of Kursk State Medical University]; ed. by V. A. Lazarenko. Kursk, Kursk State Medical University Publ., 2018, pp. 105–108. (In Russ.)
16. Shubina G. N., Lazurina L. P. [Improving the standardization of tinctures containing flavonoids]. *Biotehnologiya i biomeditsinskaya inzheneriya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam X Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 25-letiyu biotekhnologicheskogo fakul'teta i 20-letiyu kafedry biologicheskoi i khimicheskoi tekhnologii* [Biotechnology and biomedical engineering. A collection of scientific papers based on the materials of the X All-Russian Scientific and practical conference with international participation dedicated to the 25<sup>th</sup> anniversary of the biotechnological faculty and the 20<sup>th</sup> anniversary of the Department of Biological and Chemical Technology]. Kursk, Kursk State Medical University Publ., 2017, pp. 44–47. (In Russ.)
17. Antipova L. V., Storublevtsev S. A., Uspenskaya M. E. *Molekulyarno-biologicheskie osnovy pitaniya* [Molecular biological bases of nutrition]. Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technologies Publ., 2015. 542 p.
18. Voronina L. P. *Voprosy ratsional'nogo pitaniya u pozhilykh lyudei* [Issues of rational nutrition in the elderly]. *Meditsinskie Novosti = Medical News*, 2007, no. 6, pp. 36–41.
19. Tutel'yan V. A. *Mediko-sotsial'naya znachimost' BAD, ikh rol' v korrektsii pishchevogo ratsiona, lechenii i profilaktike zabolevaniil. Doklad RAMN* [Medico-social significance of dietary supplements, their role in the correction of dietary intake, treatment and prevention of diseases. Report of the Russian Academy of Medical Sciences]. Moscow, 2002.

20. Malkov Yu. A., Ivanova N. V., Babkin V. A. Kinetika protsessa ekstraktsii kory listvennitsy etilatsetatom [Kinetics of the extraction process of larch bark with ethyl acetate]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2012, no. 32, p. 63.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Завидовская Ксения Викторовна**, ассистент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knvz@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0786-4533

**Ksenia V. Zavidovskaya**, Assistant of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: knvz@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0786-4533

**Алиева Диана Арасуловна**, старший преподаватель кафедры биологии, Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Российская Федерация, e-mail: diana.aliyeva.1983@inbox.ru, ORCID: 0000-0003-1140-3166

**Diana A. Aliyeva**, Senior Lecturer of the Department of Biology, North Caucasian State Academy, Cherkessk, Russian Federation, e-mail: diana.aliyeva.1983@inbox.ru, ORCID: 0000-0003-1140-3166

**Лазурина Людмила Петровна**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lazurinalp@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-1937-1453, Scopus ID: 55924214100

**Lyudmila P. Lazurina**, Dr. of Sci. (Biological), Professor, Head of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: lazurinalp@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-1937-1453, Scopus ID: 55924214100

**Доценко Юлия Михайловна**, ассистент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yuliadoczenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8458-9083

**Yulia M. Dotsenko**, Assistant of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University of Russia Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: yuliadoczenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8458-9083

**Джанчатова Наталья Валерьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dzhanchatovanv@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-4053-9329

**Басарева Ольга Ильинична**, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: basarevaoui@kursksmu.net, ORCID: 0000-0002-9437-1157

**Natalia V. Dzhanchatova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: dzhanchatovanv@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-4053-9329

**Olga I. Basareva**, Cand. of Sci. (Biological), Associate Professor of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: basarevaoui@kursksmu.net, ORCID: 0000-0002-9437-1157

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-102-121>

## Концепция создания и разработки комплексного метода оценки опасности лесных пожаров на населенные пункты

С. А. Назаров<sup>1</sup>, А. А. Волошенко<sup>1</sup>, С. А. Шипицын<sup>2</sup>, М. В. Шевцов<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Академия государственной противопожарной службы МЧС России  
ул. Бориса Галушкина 4, г. Москва 129366, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «СтройЭкспертБюро»  
пер. Базарный 12, г. Томск 634029, Российская Федерация

✉ e-mail: shevtsovmv@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Проведенный анализ пожарной опасности лесных пожаров, а также анализ требований пожарной безопасности, направленных на ограничение последствий распространения пожара между лесными насаждениями и различными зданиями и сооружениями, показали, что для оценки значения противопожарного расстояния необходимо учитывать методику воспламеняемости пожароопасного облучаемого материала от воздействия излучающего теплового потока от лесного пожара (верховой, низовой).

Для повышения эффективности применения современных методик для проведения прогнозирования пожароопасной обстановки и выработки основных рекомендаций по совершенствованию комплекса мероприятий, направленных на предупреждение лесных пожаров и смягчение их последствий, необходимо разработать метод и алгоритм для его практической реализации.

**Методы.** Для определения минимального допустимого значения противопожарного расстояния от лесных насаждений до различных зданий, сооружений (объектов защиты) разработан метод, позволяющий оценить угрозу риска причинения вреда объектам защиты при горении лесных насаждений (низовой и верховой пожары) на основе применения различных методик установления пожарной опасности от лесного пожара. А для его практического применения предложен алгоритм оценки противопожарного расстояния от лесных насаждений (верховой, низовой) до различных зданий и сооружений.

**Результаты.** Применение метода и алгоритма позволит обеспечить проведение моделирования сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений пожара в лесных массивах, расположенных вблизи городских населенных пунктов, и установить безопасное расстояние между ними.

**Заключение.** Предлагаемая информационно-аналитическая оценка опасности лесных пожаров направлена на повышение уровня защищенности населенных пунктов от лесных пожаров при осуществлении полномочий органов государственной власти Российской Федерации в области лесных отношений и полномочий надзорных органов МЧС России.

**Ключевые слова:** риск; угроза; лесное насаждение; пожар; противопожарное расстояние; здание.

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

**Для цитирования:** Концепция создания и разработки комплексного метода оценки опасности лесных пожаров на населенные пункты / С. А. Назаров, А. А. Волошенко, С. А. Шипицын, М. В. Шевцов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 102–121. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-102-121>.

Поступила в редакцию 17.10.2022

Подписана в печать 15.11.2022

Опубликована 22.12.2022

© Назаров С. А., Волошенко А. А., Шипицын С. А., Шевцов М. В., 2022

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022; 12(4): 102–121

## The Concept of Creating and Developing an Integrated Method for Assessing the Risk of Forest Fires on Human Settlements

Sergey A. Nazarov<sup>1</sup>, Alexey A. Voloshenko<sup>1</sup>, Sergey A. Shipitsyn<sup>2</sup>,  
Maxim V. Shevtsov<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia  
4 Borisa Galushkina Str., Moscow 129366, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC "StroyExpertByuro"  
12 Bazarny side-street, Tomsk 634029, Russian Federation

✉ e-mail: shevtsovmv@mail.ru

### Abstract

**The purpose of research.** The analysis of the fire hazard of forest fires, the analysis of fire safety requirements aimed at limiting the consequences of the spread of fire between forest stands and various buildings, structures showed that to assess the value of the fire-fighting distance, it is necessary to take into account the method of flammability of fire-hazardous irradiated material from the effects of radiating heat flow from a forest fire (riding, grassroots).

In order to increase the effectiveness of the use of modern methods for predicting a fire-hazardous situation and to develop basic recommendations for improving the set of measures aimed at preventing forest fires and mitigating their consequences, it is necessary to develop a method and algorithm for its practical implementation.

**Methods.** To determine the minimum permissible value of the fire-fighting distance from forest stands to various buildings, structures (objects of protection), a method has been developed that allows assessing the threat of the risk of harm to objects of protection during the burning of forest stands (grassroots and riding fires) based on the use of various methods for establishing fire danger from forest fire. Gorenje And for its practical application, an algorithm for estimating the fire-fighting distance from forest stands (riding, grassroots) to various buildings and structures is proposed.

**Results.** The application of the method and algorithm will allow for modeling scenarios of the occurrence of dangerous natural processes and fire phenomena in forests located near urban settlements and establish a safe distance between them.

**Conclusion.** The proposed information and analytical assessment of the danger of forest fires is aimed at increasing the level of protection of settlements from forest fires in the exercise of the powers of state authorities of the Russian Federation in the field of forest relations and the powers of supervisory authorities of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

**Keywords:** risk; threat; forest plantation; fire; fire-fighting distance; building.

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

**For citation:** Nazarov S. A., Voloshenko A. A., Shipitsyn S. A., Shevtsov M. V. The Concept of Creating and Developing an Integrated Method for Assessing the Risk of Forest Fires on Human Settlements. *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(4): 102–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-102-121>.

Received 17.10.2022

Accepted 15.11.2022

Published 22.12.2022

\*\*\*

### Введение

Элементы системы противопожарной защиты направлены на нераспространение пожара от лесных массивов на

различные объекты защиты с учетом воздействия опасных факторов пожара и (или) ограничения его последствий [1, с. 134; 2, с. 57].

Проведенный анализ опасности от лесного пожара, а также требований пожарной безопасности, указанных в нормативных документах по установлению нераспространения пожара от лесных массивов до зданий и сооружений [3, с. 32; 4, с. 43; 5, с. 27; 6, с. 763; 7, с. 1547], выявил следующие проблемы:

1. Для оценки безопасного расстояния от лесных массивов до различных объектов необходимо:

а) классифицировать природную пожарную опасность лесов и определить класс пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды на основе применения различных расчетных методик;

б) установить вид низового и верхового лесного пожара;

в) провести оценку возможного воспламенения различного облучаемого материала от воздействия тепла пламени при лесном пожаре.

2. Установление значения противопожарного расстояния от лесных насаждений зависит от пожароопасных характеристик облучаемого материала.

Хочется отметить, что практическое применение различных расчетных методик для оценки распространения пожара от лесных насаждений и определение требуемого противопожарного расстояния (разрыва) при принятии решения являются очень сложными процессами, поскольку требуют долгого поиска исходных данных и проведение

многочисленных вычислений. Для оперативной реализации различных методик был разработан метод оценки опасности лесных пожаров (низовой и верховой) и алгоритм для его практического применения.

Предлагаемый метод позволяет установить вероятность возникновения и провести расчетную оценку воспламенения облучаемого материала объектов защиты, расположенных на территории населенных пунктов, и воздействия излучающего теплового потока от пламени лесных насаждений.

## Материалы и методы

В последние годы пожары лесных насаждений приводят к гибели людей и животных, значительным экономическим последствиям в виде разрушения экосистемы, ухудшения экологической обстановки и уничтожения чужого имущества. Одной из основных опасностей причинения вреда чужому имуществу (здания, сооружения) является воздействие излучающих тепловых потоков от пламени лесных массивов [8, с. 18; 9, с. 78; 10, с. 77; 11, с. 1618].

Лесные пожары разделяются на 3 вида: верховой – 4%, низовой – 95% и подземный (торфяной) – около 1%.

Самым распространённым видом пожара является низовой. Он может иметь устойчивый и беглый характер развития. Высота низового пожара приравнивается к высоте пламени и составляет порядка 0,5–2,5 метра [11, с. 6].



Зачастую низовой пожар переходит в верховой. Высота факела пламени верхового пожара равна 1,5 высоты пламени.

Подземный (торфяной) пожар представляет собой пожар, при котором горит торфяной слой заболоченных и болотных почв с накоплением большого количества тепла.

Анализ пожарной опасности лесных пожаров выявил главные показатели, качественно влияющие на оценку его

распространения на различные здания и сооружения, а именно:

1. Вид лесного пожара:

а) верховой;

б) низовой;

2. Высота пламени, влияющая на уровень теплового воздействия при пожаре лесных насаждений.

Согласно Лесному кодексу РФ, рассмотрим меры пожарной безопасности в лесах (рис. 1).



**Рис. 1.** Меры пожарной безопасности в лесах

**Fig. 1.** Fire safety measures in forests

Меры по предупреждению пожаров лесных массивов осуществляются в целях:

- нераспространения лесных пожаров;
- направления и сосредоточения сил и средств для его ликвидации.

Одна из основных мер по предупреждению вреда от лесного пожара предусматривает установление значений противопожарных расстояний. Значения противопожарных расстояний направлены на нераспространение пожара от лесных массивов до зданий и сооружений, расположенных как вне, так и на территории лесничеств.

Согласно требованиям, указанным в Федеральном законе от 30.12.2009 г. № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», для обеспечения пожарной безопасности здания или сооружения необходимо проводить оценку опасности по расчетным методикам, позволяющим обосновать значения противопожарных расстояний. Следовательно, при установлении значения противопожарного расстояния необходимо учитывать воздействие опасных факторов пожара, позволяющих установить угрозу риска причинения вреда.

Согласно нормативным документам, для обеспечения пожарной безопасности необходимо провести классификацию природной пожарной опасности лесов и классификацию пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды, влияющих на пожарную опасность лесов (температуры воздуха, точки росы), и типа лесного насаждения

(лиственное, смешанное), которые позволяют установить вид лесного пожара [12, с. 41; 13, с. 230; 14, с. 2].

Расчет класса природной пожарной опасности (КП) в лесах в зависимости от условий погоды определяется по формуле

$$\text{КП} = \sum_n^1 [t^\circ \cdot (t^\circ - \text{эта})], \quad (1)$$

где  $t^\circ$  – температура воздуха в лесу, °C; эта – точка росы, °C;  $n$  – количество дней без осадков.

Наиболее подходящей для оценки рисков причинения вреда чужому имуществу является методика воспламенения различного облучаемого материала от воздействия тепла пламени [15, с. 40; 16, с. 37], представленная в учебниках [17, с. 328; 18, с. 226] и позволяющая провести расчеты влияния интенсивности теплового потока в случае горения твердых горючих материалов (ТГМ).

Расчётная оценка излучающего теплового потока от лесного пожара до рядом расположенных объектов защиты проводится по формуле

$$q_{\text{кр}} = E_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ф}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{доп}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{\text{ф}-1}, \quad (2)$$

где  $q_{\text{кр}}$  – значение критической плотности теплового потока;  $E_{\text{пр}}$  – значение степени черноты;  $C_0$  – коэффициент облучения абсолютно черного тела, равен 5,7 Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\text{ф}}$  – температура пламени лесного пожара, К;  $T_{\text{доп}}$  – температура воспламенения облучаемого материала, К;  $\varphi_{\text{ф}-1}$  – коэффициент облучённости между излучающей и облучаемой поверхностями.

Приведённая степень черноты системы определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{и}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{обл}}} - 1}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{и}}$  – степень черноты, излучающей поверхности;  $\varepsilon_{\text{обл}}$  – степень черноты облучаемой поверхности.

Коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями рассчитывается по формуле

$$\varphi_{\phi-1} = 4 \cdot \varphi_{21}, \quad (4)$$

где  $\varphi_{1-2}$  – расчетное значение коэффициента облученности между излучающей и облучаемой поверхностями.

Анализ методологии выбора значений противопожарных расстояний от лесных насаждений до зданий и сооружений показал, что для оценки их соответствия риску причинения вреда необходимо учитывать воздействие опасных факторов пожара.

Следовательно, целью исследования является проведение оценки пожарной опасности от лесных насаждений до зданий, сооружений, расположенных как на территории, так и вне территории лесничества по апробированным методикам. Применение в совокупности методик позволит оценить степень риска причинения вреда и установить соразмерное мероприятие, предотвращающее распространение пожара в виде противопожарного расстояния с учетом пожароопасных характеристик лесных насаждений (хвойные, смешанные или лиственные породы), а также вида лесного пожара (верховой и низовой).

Оценку пожарной опасности от лесных насаждений также возможно осуществлять с помощью multifunctional мониторинговых систем раннего обнаружения и оценки пожарной опасности, представляющих собой мобильные приборные платформы [19, с. 11].

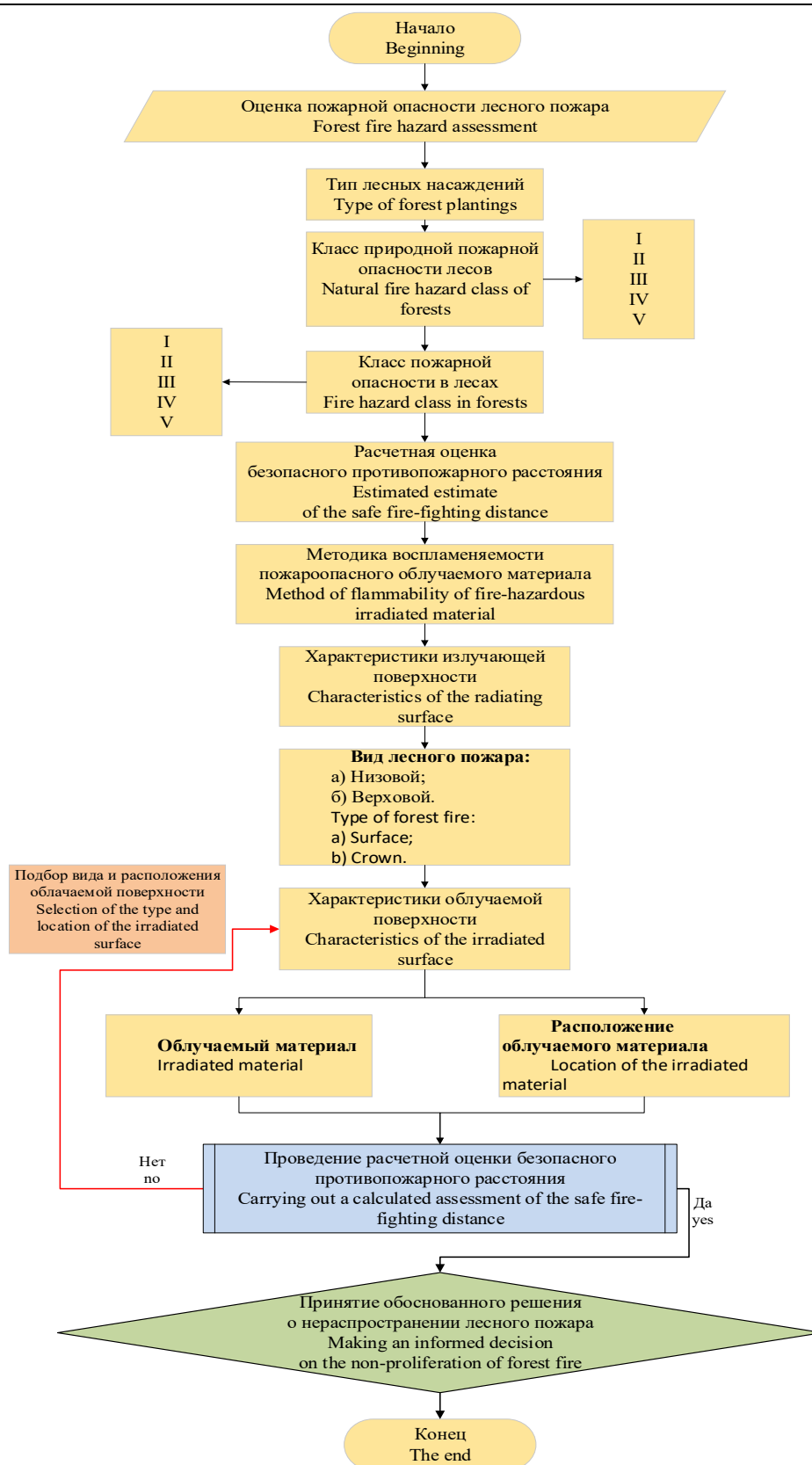
## Результаты и их обсуждение

Проведенный анализ пожарной опасности лесного пожара и анализ требований пожарной безопасности, обеспечивающих нераспространение пожара лесных насаждений на здания, сооружения, показал необходимость применения оценки по установлению вероятности (возможности) возникновения и оценки угрозы риска распространения пожара.

В этой связи для оценки угрозы распространения лесного пожара на рядом расположенные объекты защиты был разработан метод оценки опасности лесных пожаров (низовой и верховой) для населенных пунктов.

В целях повышения эффективности сбора данных, прогнозирования расчетных сценариев возникновения опасных природных процессов распространения лесного пожара на рядом расположенные объекты защиты в конкретных ситуациях, а также для принятия необходимого решения был разработан алгоритм оценки безопасного противопожарного расстояния от низового и верхового пожара (рис. 2).

Условие для определения безопасного противопожарного расстояния устанавливается границей, в которой значение расчетной не превышает критической плотности теплового потока  $q_{\text{расч}} < q_{\text{кр}}$ .



**Рис. 2.** Алгоритм оценки безопасного противопожарного расстояния от лесных насаждений (верховой, низовой пожар)

**Fig. 2.** Algorithm for assessing the safe fire-fighting distance from forest stands (crown, surface fire)

Проведем оценку по установлению противопожарного расстояния от лесных насаждений до различных зданий, сооружений по предлагаемому методу и алгоритму для его оперативной реализации [20, с. 13; 21, с. 14; 22, с. 12].

Установление значения противопожарного расстояния будет проводиться от границ лесных насаждений (лиственные породы) до деревянного здания V степени огнестойкости, расположенного на территории городского населенного пункта. В соответствии с п. 4.14 СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям» противопожарное расстояние от здания на территории

городского населенного пункта до границ лесных насаждений в лесах лиственных пород должно составлять не менее 30 м. Класс природной пожарной опасности в лесах лиственных пород – III (природная пожарная опасность – средняя), следовательно, вероятен как низовой, так и верховой пожар.

Рассмотрим, расчетные показатели для установления класса природной пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды (табл. 1).

Расчет КП по показателям:

$$КП = 29,5 \cdot (29,5 - 11,3) = 536,9.$$

В соответствии с расчетным значением КП и значениям в таблице 2 было установлено значение класса пожарной опасности в лесах – II, степень пожарной опасности – малая.

**Таблица 1.** Показатели для расчета КП

**Table 1.** Indicators for calculating KP

№ п/п n/a	Температура воздуха, $t^{\circ}$ , $^{\circ}\text{C}$ Air temperature, $t^{\circ}$ , $^{\circ}\text{C}$	Разность температур воздуха ( $t^{\circ}$ ) и точки росы (эта) Air temperature difference ( $t^{\circ}$ ) and dew point (eta)
1	29,5	11,3

**Таблица 2.** Классы пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды

**Table 2.** Fire hazard classes in forests depending on weather conditions

Класс пожарной опасности в лесах Fire hazard class in forests	Величина комплексного показателя The value of the complex indicator	Степень пожарной опасности Degree of fire danger
I	0...300	Отсутствует Absent
II	301...1000	Малая Small
III	1001...4000	Средняя Average
IV	4001...10000	Высокая High
V	Более 10000 More than 10,000	Чрезвычайная Emergency

Далее проводится расчетная оценка значения излучающего теплового потока на облучаемом материале от лесного пожара для дальнейшего подбора безопасного противопожарного расстояния от лесных насаждений (низовой и верховой пожар) до здания V степени огнестойкости с учетом облучаемых пожароопасных материалов.

Исходными данными по установлению расчётного значения теплового потока различных материалов для излучающей поверхности «Лес (низовой пожар)» являются:

- 1) данные излучающей поверхности:
  - горящий материал – ТГМ;
  - температура излучающей поверхности – 1273 К;
  - степень черноты – 0,7;
  - высота факела пламени – 1,5 м;
  - ширина лесного пожара – 5,0 м.
- 2) данные облучаемой поверхности:
  - облучаемый материал – древесина (сосна);

- критическая плотность теплового потока облучаемой поверхности – 13,9 кВт/м<sup>2</sup>;

- значение степени черноты – 0,9;

- температура воспламенения облучаемой поверхности составляет 663 К [23, с. 538];

- облучаемая поверхность расположена по центру относительно излучающей поверхности.

Фактическое расстояние от здания до излучающей поверхности составляет 25,0 м.

Значение излучающего теплового потока (низовой лесной пожар) на расстоянии 25,0 м составляет 0,682 кВт/м<sup>2</sup>.

Условие нераспространения пожара на конструкции здания V степени огнестойкости выполняется:  $q_{\text{расч}} = 0,682 \text{ кВт/м}^2 < q_{\text{кр}} = 13,9 \text{ кВт/м}^2$ .

Следовательно, фактическое расстояние 25,0 м является безопасным (табл. 2).

**Таблица 3.** Сравнительный анализ методов оценки опасности лесных пожаров

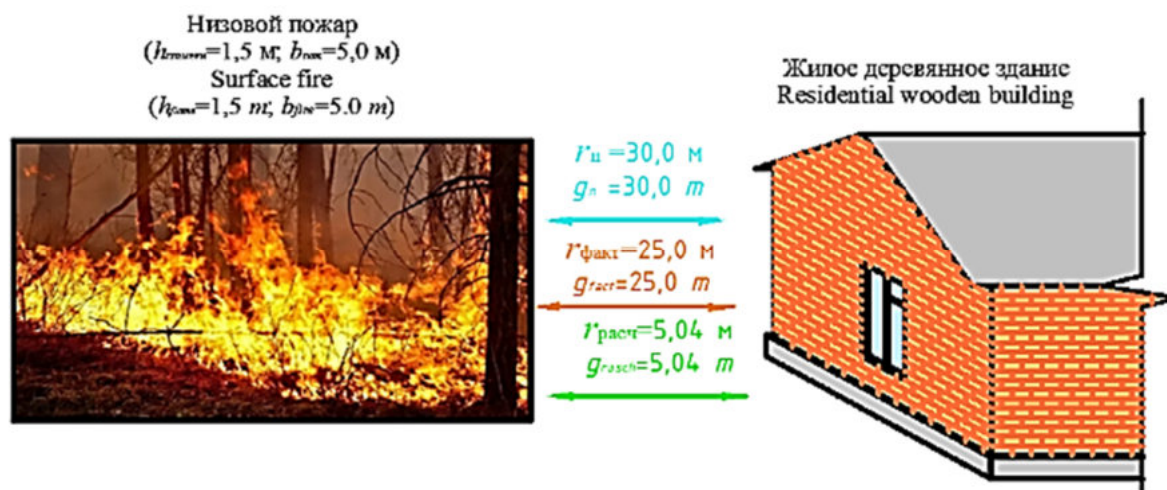
**Table 3.** Comparative analysis of forest fire hazard assessment methods

Метод оценки Evaluation method	Значение противопожарного расстояния между объектами защиты, м The value of the fire-fighting distance between the objects of protection, m	Фактическое значение расстояния между объектами защиты, м The actual value of the distance between the objects of protection, m	Результат Result
Нормативный Regulatory	30,0	25,0	Не соответствует Does not match
Расчетный Calculated	5,04	25,0	Соответствует Respond

Для определения значения безопасного противопожарного расстояния необходимо провести дальнейшие расчеты путем последовательного подбора расстояния, минимально удовлетворяющего условию безопасности.

В результате серии расчетов было установлено минимальное противопожарное расстояние от излучающей поверхности «Лес (низовой пожар)» до жилого здания V степени огнестойкости

$r_{\text{расч}} = 5,040$  м (рис. 3), не угрожающее распространению пожара от лесного пожара на жилое здание V степени огнестойкости, расположенное на фактическом расстоянии  $r_{\text{факт}} = 25,0$  м. При этом нормативное противопожарное расстояние  $r_{\text{н}} = 30,0$  м, указанное в нормативном документе (СП 4.13130.2013), является избыточным, поскольку не соответствует риску причинения вреда от низового пожара лесного насаждения.



**Рис. 3.** Расчетное обоснование противопожарное расстояние от лесного пожара (низовой) до жилого деревянного здания V степени огнестойкости

**Fig. 3.** Calculation justification of the fire-fighting distance from a forest fire (surface) to a residential wooden building of the V degree of fire resistance

Таким образом, предлагаемый метод оценки опасности лесных пожаров (низовой и верховой) показал соответствие фактического расстояния расчетному, являющемуся безопасным (соответствующим размеру риску причинения вреда от низового лесного пожара пожароопасным конструкциям жилого здания), и избыточность нормативного метода выбора противопожарного расстояния [24, с. 169; 25, с. 19; 26, с. 284; 27, с. 146; 28, с. 238].

Исходными данными по установлению расчетного значения теплового потока различных материалов для излучающей поверхности «Лес (верховой пожар)» являются:

- 1) данные излучающей поверхности:
  - горящий материал – ТГМ;
  - температура излучающей поверхности – 1273 К;
  - степень черноты – 0,7;
  - высота факела пламени – 25,0 м;
  - ширина факела пламени – 20,0 м;

2) данные облучаемой поверхности:

- облучаемый материал древесина (сосна);
- критическая плотность теплового потока облучаемой поверхности –  $13,9 \text{ кВт/м}^2$ ;
- значение степени черноты –  $0,9$ ;
- температура воспламенения облучаемой поверхности составляет  $663 \text{ К}$  [23, с. 538];
- облучаемая поверхность расположена по центру относительно излучающей поверхности.

Значение излучающего теплового потока (верховой лесной пожар) на расстоянии  $25,0 \text{ м}$  –  $23,61 \text{ кВт/м}^2$ .

Условие нераспространения пожара на конструкции здания V степени огнестойкости не выполняется:  $q_{\text{расч}} = 23,61 \text{ кВт/м}^2 > q_{\text{кр}} = 13,9 \text{ кВт/м}^2$ .

Следовательно, фактическое расстояние  $25,0 \text{ м}$  является небезопасным (табл. 4).

**Таблица 4.** Сравнительный анализ методов оценки опасности лесных пожаров

**Table 4.** Comparative analysis of forest fire hazard assessment methods

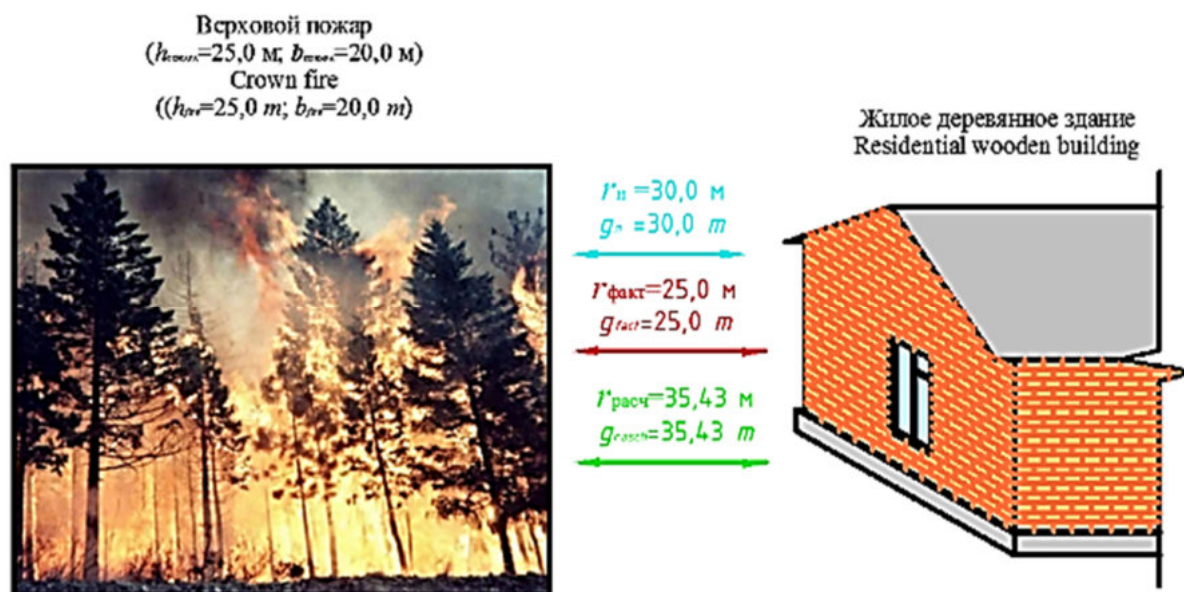
Метод оценки Evaluation method	Значение противопожарного расстояния между объектами защиты, м The value of the fire-fighting distance between the objects of protection, m	Фактическое значение расстояния между объектами защиты, м The actual value of the distance between the objects of protection, m	Результат Result
Нормативный Regulatory	30,0	25,0	Не соответствует Does not match
Расчетный Calculated	35,43	25,0	Не соответствует Does not match

Для оценки значения безопасного противопожарного расстояния необходимо провести дальнейшие расчеты путем последовательного подбора расстояния, минимально удовлетворяющего условию безопасности.

В результате серии расчетов было установлено, что минимальное противопожарное расстояние от излучающей поверхности «Лес (верховой пожар)» до жилого здания V степени огнестойкости

$r_{\text{расч}} = 35,43 \text{ м}$  (рис. 4) угрожает распространению пожара от лесного пожара на жилое здание, поскольку не соответствует фактическому расположению  $r_{\text{факт}} = 25,0 \text{ м}$ . При этом нормативное противопожарное расстояние  $r_{\text{н}} = 30,0$  также не соответствует риску причинения вреда от верхового пожара лесного насаждения и, следовательно, не обеспечивает нераспространение пожара на жилое здание.





**Рис. 4.** Расчетное обоснование безопасного противопожарного расстояния от лесного пожара (верховой) до жилого деревянного здания V степени огнестойкости

**Fig. 4.** Calculation justification of the safe fire-fighting distance from a forest fire (crown) to a residential wooden building of the V degree of fire resistance

Таким образом, предлагаемый метод оценки опасности лесных пожаров (низовой и верховой) показал несоответствие фактического расстояния расчетному (несоразмерному риску причинения вреда от верхового лесного пожара пожароопасным конструкциям жилого здания) и несоответствие значения противопожарного расстояния, установленного по нормативному методу.

## Выводы

Предлагаемый метод по установлению возможности возникновения и оценки распространения лесного пожара на объекты защиты, расположенные на территориях населенных пунктов, позволяет обосновать минимально безопасное противопожарное расстояние с учетом характеристик излучающей поверхности

лесного пожара (низовой, верховой) и характеристик облучаемых материалов в конструкциях зданий и сооружений.

Данная информационная поддержка принятия решения по оценке опасности низового и (или) верхового лесного пожара позволит:

- 1) осуществлять полномочия:
  - органов государственной власти Российской Федерации в области лесных отношений;
  - сотрудников МЧС России;
- 2) впоследствии использовать полученные результаты при оценке:
  - пожарной обстановки и прогнозировании состояния людей, находящихся в зоне пожара;
  - деятельности пожарно-спасательных подразделений и руководства тушением пожара.

Защищенность зданий и сооружений от пожаров лесных насаждений, осуществляемая при проведении профилактических плановых (рейдовых) осмотров территорий населенных пунктов, дачных, огороднических и садоводческих некоммерческих объединений

граждан, согласуется с п.п. 10 и 16 Указа Президента Российской Федерации от 01.01.2018 г. № 2 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года».

### Список литературы

1. Волошенко А. А., Абдракипов Б. Р. Разработка информационно-аналитической системы для оценки риска причинения вреда от воздействия теплового потока при пожаре лесных насаждений // Моя законотворческая инициатива: сборник тезисов работ участников XVI Всероссийского конкурса молодежи образовательных и научных организаций на лучшую работу / под ред. А. А. Румянцев, Е. А. Румянцевой. М.: ИНТЕГРАЦИЯ, 2021. Т. 2. С. 133–134.
2. Совершенствование мероприятий по обеспечению безопасности при угрозе возникновения лесных пожаров / А. Г. Нестеренко, С. И. Шепелюк, В. А. Зокоев, Б. Бабич // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27, № 10. С. 56–65. <https://doi.org/10.18322/PVB.2018.27.10.56-65>.
3. Лощилова Н. А., Беляев И. В. Эффективность тушения лесного пожара при комбинировании естественной и искусственной преград // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2015. № 12-3. С. 31–32.
4. Ерицов А. М., Гусев В. Г. Совершенствование технологий создания заградительных и опорных полос при тушении лесных пожаров в зонах лесоавиационных работ // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 1 (29). С. 42–56.
5. California Fire Code. Chapter 49: requirements for wildland urban interface fire areas. State of California, 2016. 401 p.
6. Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A. Spatio-temporal smoke clustering in outdoor scenes based on boosted random forests // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 96. P. 762–771.
7. Foggia P., Saggese A., Vento M. Real-time fire detection for video-surveillance applications using a combination of experts based on color, shape, and motion // IEEE TRANSACTIONS on circuits and systems for video technology. 2015. Vol. 25, no. 9. P. 1545–1556.
8. FireSmart Guidebook for community protection. A guidebook for wildland / Urban Interface Communities. Edmonton, 2013. 100 p.

9. Summary of workshop large outdoor fires and the built environment / S. L. Manzello, R. Blanchi, M. J. Gollner, D. Gorham, S. McAllister, E. Pastor, G. Rein, S. Suzuki // *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 100. P. 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.07.002>.

10. Cohen J. D. Relating flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34. P. 1616–1626.

11. Залесов С. В., Залесова Е. С., Оплетаев А. С. Охрана лесов от пожаров: пособие для лесного пожарного. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2013. 63 с.

12. Колпаков В. Ф. Параметрическая идентификация модели лесных пожаров // *Безопасность жизнедеятельности*. 2012. № 5. С. 39–44.

13. Нестеренко А. Г., Нестеренко С. Г., Шепелюк С. И. Проблема совершенствования комплекса мероприятий по предупреждению природных пожаров // *Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение комплексной безопасности жизнедеятельности населения: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции (27 сентября 2017 г., г. Санкт-Петербург)*. СПб.: Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, 2017. С. 229–233.

14. Emerging methods for early detection of forest fires using unmanned aerial vehicles and lorawan sensor networks / G. Hristov [et al.] // *28<sup>th</sup> EAEEIE Annual Conference (EAEEIE) (26–28 Sept. 2018 y.)*. Hafnarfjordur: IEEE, 2018. P. 1–4.

15. Козлачков В. И., Ягодка Е. А., Волошенко А. А. Оценка пожарных разрывов с учетом воздействия теплового потока на имущество // *Технологии техносферной безопасности*. 2016. № 3 (67). С. 40–44.

16. Натурный огневой эксперимент по оценке воспламеняемости материалов при воздействии теплового потока / И. А. Лобаев, М. М. Казиев, А. А. Волошенко, В. И. Безбородов // *Технологии техносферной безопасности*. 2019. № 4 (86). С. 37–44.

17. Кошмаров Ю. А., Башкирцев М. П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. 444 с.

18. Ройтман М. Я. Противопожарное нормирование в строительстве. М.: Стройиздат, 1985. 590 с.

19. Метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара / Н. А. Корневский, М. В. Шевцов, Л. В. Стародубцева, Г. В. Сипливый // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11, № 3. С. 142–159.

20. Экспериментально-численное моделирование процесса горения и распространения огня в условиях лесного низового пожара / П. Н. Гоман, В. Р. Соболев, Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук // *Технологии техносферной безопасности*. 2011. № 3 (67). С. 1–14.

21. Актуализация требований пожарной безопасности на основе риск-ориентированного подхода / В. Б. Коробко, Ю. М. Глуховенко, А. С. Овчинский, И. В. Гурлев // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27, № 6. С. 7–17. <https://doi.org/10.18322/PVB.2018.27.06.7-17>.
22. Еремина Т. Ю., Назаров А. А. Предпосылки создания информационно-аналитической модели управления пожарной безопасностью на региональном уровне (на примере Республики Тува) // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26, № 4. С. 6–14. <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.04.6-14>.
23. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник: в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Пожнаука, 2004. Ч. 1. 713 с.
24. Кванина В. В., Макарова Т. И. Системные проблемы в правовом обеспечении экологического страхования на федеральном и региональном уровнях // Вестник Томского государственного университета. Право. 2021. № 39. С. 159–171. <https://doi.org/10.17223/22253513/39/13>.
25. Волошенко А. А., Абдракипов Б. Р. Информационно-аналитическая система оценки противопожарного расстояния от лесных насаждений // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции молодых ученых: в 2 т. Минск: Университет гражданской защиты, 2022. Т. 1. 246 с.
26. Wu S., Zhang L. Using popular object detection methods for real time forest fire detection // 11<sup>th</sup> International symposium on computational intelligence and design (ISCID). Hangzhou: IEEE, 2019. P. 280–284.
27. Мобильная система мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности / М. В. Шевцов, В. В. Аксёнов, Р. И. Сафронов, Л. В. Шульга, С. В. Дегтярев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 8–25.
28. Шевцов М. В., Денисов А. Н., Горбачёв И. Н. Интегральная оценка руководства тушением пожара с использованием экспертной информации // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: материалы VIII Международной научно-практической конференции (17–18 марта 2022 г.). М.: Академия государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. С. 237–242.

## References

1. Voloshenko A. A., Abdrakipov B. R. [Development of an information and analytical system for assessing the risk of harm from the effects of heat flow during a forest plantation fire]. *Moya zakonotvorcheskaya initsiativa. Sbornik tezisev rabot uchastnikov XVI Vserossiiskogo konkursa molodezhi obrazovatel'nykh i nauchnykh organizatsii na luchshuyu rabotu*

[My legislative initiative. Collection of abstracts of works by participants of the XVI All-Russian youth competition of educational and scientific organizations for the best work]; ed. by A. A. Rumyantsev, E. A. Rumyantseva. Moscow, INTEGRATSIYA Publ., 2021, vol. 2, pp. 133–134. (In Russ.)

2. Nesterenko A. G., Shepelyuk S. I., Zokoev V. A., Babich B. Sovershenstvovanie meropriyatii po obespecheniyu bezopasnosti pri ugroze vozniknoveniya lesnykh pozharov [Improvement of measures to ensure safety in the event of a threat of forest fires]. *Pozhary i vzbystozheniya = Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 10, pp. 56–65. <https://doi.org/10.18322/PVB.2018.27.10.56-65>

3. Loshchilova N. A., Belyaev I. V. Effektivnost' tusheniya lesnogo pozhara pri kombinirovanii estestvennoi i iskusstvennoi pregrad [Effectiveness of forest fire extinguishing when combining natural and artificial barriers]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sovremennom mire = Fundamental and Applied Research in the Modern World*, 2015, no. 12-3, pp. 31–32.

4. Eritsov A. M., Gusev V. G. Sovershenstvovanie tekhnologii sozdaniya zagraditel'nykh i opornykh polos pri tushenii lesnykh pozharov v zonakh lesoaviatsionnykh rabot [Improvement of technologies for creating barrier and support strips when extinguishing forest fires in areas of forest aviation works] *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2016, no. 1 (29), pp. 42–56.

5. California Fire Code. Chapter 49: requirements for wildland urban interface fire areas. State of California, 2016. 401 p.

6. Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A. Spatio-temporal smoke clustering in out-door scenes based on boosted random forests. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 96, pp. 762–771.

7. Foggia P., Saggese A., Vento M. Real-time fire detection for video-surveillance applications using a combination of experts based on color, shape, and motion. *IEEE TRANSACTIONS on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, vol. 25, no. 9, pp. 1545–1556.

8. FireSmart Guidebook for community protection. A guidebook for wildland. Urban Interface Communities. Edmonton, 2013. 100 p.

9. Manzello S. L., Blanchi R., Gollner M. J., Gorham D., McAllister S., Pastor E., Rein G., Suzuki S. Summary of workshop large outdoor fires and the built environment. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 100, pp. 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.07.002>

10. Cohen J. D. Relating flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, pp. 1616–1626.

11. Zalesov S. V., Zalesova E. S., Opletaev A. S. *Okhrana lesov ot pozharov: posobie dlya lesnogo pozhnogo* [Protection of forests from fires: a guide for a forest firefighter]. Ekaterinburg, Ural State Forestry Technical University Publ., 2013. 63 p.
12. Kolpakov V. F. Parametricheskaya identifikatsiya modeli lesnykh pozharov [Parametric identification of a forest fire model]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life safety*, 2012, no. 5, pp. 39–44.
13. Nesterenko A. G., Nesterenko S. G., Shepelyuk S. I. [The problem of the implementation of a set of measures for the prevention of natural fires]. *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Obespechenie kompleksnoi bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti naseleniya. Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (27 sentyabrya 2017 g., g. Sankt-Peterburg)* [Security Service in Russia: experience, problems, prospects. Ensuring comprehensive life safety of the population. Materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference (September 27, 2017, St. Petersburg)]. St. Petersburg, Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2017, pp. 229–233. (In Russ.)
14. Hristov G., eds. Emerging methods for early detection of forest fires using unmanned aerial vehicles and lorawan sensor networks. 28<sup>th</sup> EAEEIE Annual Conference (EAEEIE) (26–28 Sept. 2018 y.). Hafnarfjordur, IEEE Publ., 2018, pp. 1–4.
15. Kozlachkov V. I., Yagodka E. A., Voloshenko A. A. Otsenka pozharnykh razryvov s uchetom vozdviizviya teplovogo potoka na imushchestvo [Assessment of fire breaks taking into account the impact of heat flow on property]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Security Technologies*, 2016, no. 3 (67), pp. 40–44.
16. Lobaev I. A., Kaziev M. M., Voloshenko A. A., Bezborodov V. I. Naturnyi ognevoi eksperiment po otsenke vosplameniyaemosti materialov pri vozdviizvii teplovogo potoka [Full-scale fire experiment to assess the flammability of materials under the influence of heat flow]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Safety Technologies*, 2019, no. 4 (86), pp. 37–44.
17. Koshmarov Yu. A., Bashkirtsev M. P. *Termodinamika i teploperedacha v pozharom dele* [Thermodynamics and heat transfer in the heat business]. Moscow, VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR Publ., 1987. 444 p.
18. Roitman M. Ya. *Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve* [Fire-prevention rationing in construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 590 p.
19. Korenevskii N. A., Shevtsov M. V., Starodubtseva L. V., Siplivyi G. V. Metod sinteza matematicheskikh modelei otsenki pozharnoi obstanovki i sostoyaniya lyudei, nakhodyashchikhsya v zone pozhara [Method of synthesis of mathematical models for assessing the fire situation and the condition of people in the fire zone]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroeniye*. 2022; 12(4): 102–121

*tsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 142–159.

20. Goman P. N., Sobol' V. R., Barovik, D. V. Taranchuk V. B. Eksperimental'no-chislennoe modelirovanie protsessa gorenija i rasprostraneniya ognja v usloviyakh lesnogo nizovogo pozhara [Experimental and numerical modeling of the gorenje process and the spread of fire in the conditions of a forest low-level fire]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Safety Technologies*, 2011, no. 3 (67), pp. 1–14.

21. Korobko V. B., Glukhovenko Yu. M., Ovchinskii A. S., Gurlev I. V. Aktualizatsiya trebovanii pozharnoi bezopasnosti na osnove risk-orientirovannogo podkhoda [Actualization of fire safety requirements based on a risk-based approach]. *Pozharovzryvbezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 6, pp. 7–17. <https://doi.org/10.18322/PVB.2018.27.06.7-17>

22. Eremina T. Yu., Nazarov A. A. Predposylki sozdaniya informatsionno-analiticheskoi modeli upravleniya pozharnoi bezopasnost'yu na regional'nom urovne (na primere respubliki Tuva) [Prerequisites for creating an information and analytical model of fire safety management at the regional level (on the example of the Republic of Tuva)]. *Pozharovzryvbezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 6–14. <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.04.6-14>

23. Korol'chenko A. Ya., Korol'chenko D. A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004, pt 1. 713 p.

24. Kvanina V. V., Makarova T. I. Sistemnye problemy v pravovom obespechenii ekologicheskogo strakhovaniya na federal'nom i regional'nom urovnyakh [Systemic problems in the legal provision of environmental insurance at the federal and regional levels]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Pravo = Bulletin of Tomsk State University. Right*, 2021, no. 39. pp. 159–171. <https://doi.org/10.17223/22253513/39/13>

25. Voloshenko A. A., Abdrakipov B. R. [Information and analytical system for assessing the fire distance from forest plantations]. *Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy. Sbornik materialov XVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh*. [Ensuring the safety of life: problems and prospects. Collection of materials of the XVI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists]. Minsk, University of Civil Protection Publ., 2022, vol. 1. 246 p. (In Russ.)

26. Wu S., Zhang L. Using popular object detection methods for real time forest fire detection. 11th International symposium on computational intelligence and design (ISCID). Hangzhou, IEEE Publ., 2019, pp. 280–284.

27. Shevtsov M. V., Aksenov V. V., Safronov R. I., Shul'ga L. V., Degtyarev S. V. Mobil'naya sistema monitoringa, rannego obnaruzheniya i otsenki pozharnoi opasnosti [Mobile monitoring system, early detection and fire hazard assessment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 8–25.

28. Shevtsov M. V., Denisov A. N., Gorbachev I. N. [Integral assessment of fire extinguishing management using expert information]. *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii. Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (17–18 marta 2022 g.)* [Firefighting: problems, technologies, innovations. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference (March 17–18, 2022)]. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2022, pp. 237–242. (In Russ).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Назаров Сергей Анатольевич**, кандидат юридических наук, профессор кафедры надзорной деятельности (в составе учебно-научного комплекса организации надзорной деятельности), Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: 89166564336@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8125-3485

**Sergey A. Nazarov**, Cand. of Sci. (Juridical), Professor of the Department of Supervisory Activities (Consisting of Educational and Scientific Complex of Oversight Organizations), Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: 89166564336@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8125-3485

**Волошенко Алексей Анатольевич**, старший преподаватель кафедры надзорной деятельности (в составе учебно-научного комплекса организации надзорной деятельности), Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: volax84@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9468-6995

**Alexey A. Voloshenko**, Senior Lecturer of the Department of Supervisory Activities (Consisting of Educational and Scientific Complex of Oversight Organizations), Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: volax84@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9468-6995



**Шипицын Сергей Александрович**, эксперт в области экспертизы проектной документации по направлению пожарной безопасности, ООО «СтройЭкспертБюро», г. Томск, Российская Федерация, e-mail: shsa69@inbox.ru, ORCID: 0000-0002-2486-0609

**Sergey A. Shipitsyn**, Expert in the Field of Expertise of Project Documentation in the Field of Fire Safety, LLC "StroyExpertByuro", Tomsk, Russian Federation, e-mail: shsa69@inbox.ru, ORCID: 0000-0002-2486-0609

**Шевцов Максим Викторович**, кандидат технических наук, начальник учебно-методического центра, Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shevtsovmv@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5537-2392

**Maxim V. Shevtsov**, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Educational and Methodological Center, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: shevtsovmv@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5537-2392

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-122-141>

## Способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными БПЛА

А. В. Хмелевская<sup>1</sup>, А. А. Севрюков<sup>2</sup>, А. Е. Севрюков<sup>1</sup>,  
И. Г. Бабанин<sup>1</sup> ✉, Е. Ю. Бабанина<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Областное казенное учреждение «Центр электронного взаимодействия»  
ул. Радищева 5, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: babanin\_ivan@bk.ru

### Резюме

**Цель исследования** – разработка предложений по реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными беспилотными летательными аппаратами.

**Методы.** При проведении исследований и разработки способа реализации защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными беспилотными летательными аппаратами использовались методы многокритериального анализа. Первоначальная проверка встроенного ПО выполняется при загрузке/инициализации автопилота. В этом случае используются методы проверки содержимого памяти автопилота, такие как использование цепочки хеширования со случайным запросом, для чего может потребоваться статический хеш для сравнения. Для противодействия угрозам функционального модуля контроля полёта рекомендуется использовать IDS (системы обнаружения вторжений). IDS обычно представляет собой программно-аппаратное обеспечение, которое проверяет систему на наличие аномалий и отклонений.

**Результаты.** Предложен способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными беспилотными летательными аппаратами, основанный на алгоритме шифрования ChaCha20. Проведён анализ и синтез методов обеспечения безопасности каналов управления и передачи данных между НПУ и автономными беспилотными летательными аппаратами. Выполнен анализ протоколов шифрования AES-CTR, AES-CBC, ChaCha20 и RC4, результаты которого позволили установить ChaCha20 в качестве самого подходящего метода криптографической защиты БПЛА под управлением MAVLink. Проведённые результаты экспериментов по испытанию алгоритма шифрования ChaCha20 показали, что применение указанного алгоритма не влияет на производительность протокола MAVLink, так как использует одинаковое процессорное время.

**Заключение.** Проведен анализ методов криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными беспилотными летательными аппаратами, на основании которого предложен способ реализации защиты каналов по протоколу MAVLink при управлении БПЛА, основанный на алгоритме шифрования ChaCha20.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; криптографическая защита информации; протокол MAVLink; алгоритм шифрования ChaCha20.

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

**Для цитирования:** Способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными БПЛА / А. В. Хмелевская, А. А. Севрюков, А. Е. Севрюков, И. Г. Бабанин, Е. Ю. Бабанина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 122–141. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-122-141>.

Поступила в редакцию 16.10.2022

Подписана в печать 12.11.2022

Опубликована 22.12.2022

## Method for Implementing Cryptographic Protection of Channels to Organize Communication via MAVLink Protocol when Control of Autonomous UAVS

Alena V. Khmelevskaya<sup>1</sup>, Anton A. Sevryukov<sup>2</sup>, Aleksandr E. Sevryukov<sup>1</sup>,  
Ivan G. Babanin<sup>1</sup> ✉, Ekaterina Yu. Babanina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Center for Electronic Interaction  
5 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: babanin\_ivan@bk.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Development of proposals for the implementation of cryptographic protection of channels for organizing communication using the MAVLink protocol when controlling autonomous unmanned aerial vehicles.

**Methods.** When conducting research and developing a method for implementing channel protection for the organization of communication via the MAVLink protocol when controlling autonomous unmanned aerial vehicles, multicriteria analysis methods were used. The initial firmware check is performed when the autopilot is loaded/initialized. In this case, methods are used to check the contents of the autopilot memory, such as using a hashing chain with a random request, which may require a static hash for comparison. To counteract the threats of the functional flight control module, it is recommended to use IDS (Intrusion detection systems). IDS is usually software and hardware that checks the system for anomalies and deviations.

**Results.** A method for implementing cryptographic channel protection for the organization of communication via the MAVLink protocol when controlling autonomous unmanned aerial vehicles based on the ChaCha20 encryption algorithm is proposed. The analysis and synthesis of methods for ensuring the security of control channels and data transmission between the NPU and autonomous unmanned aerial vehicles has been carried out. The analysis of the AES-CTR, AES-CBC, ChaCha20 and RC4 encryption protocols was performed, the results of which made it possible to establish ChaCha20 as the most suitable method of cryptographic protection of UAVs running MAVLink. The results of experiments conducted to test the ChaCha20 encryption algorithm showed that the use of this algorithm does not affect the performance of the MAVLink protocol, since it uses the same processor time.

**Conclusion.** The analysis of methods of cryptographic protection of channels for the organization of communication using the MAVLink protocol when controlling autonomous unmanned aerial vehicles is carried out, on the basis of which a method for implementing channel protection using the MAVLink protocol when controlling UAVs based on the ChaCha20 encryption algorithm is proposed.

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle; cryptographic information protection; MAVLink protocol; ChaCha20 encryption algorithm.*

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

**For citation:** Khmelevskaya A V., Sevryukov A. A., Sevryukov A. E., Babanin I. G., Babanina E. Yu. Method for Implementing Cryptographic Protection of Channels to Organize Communication via MAVLink Protocol when Control of Autonomous UAVS. *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(4): 122–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-122-141>.

Received 16.10.2022

Accepted 12. 11.2022

Published 22.12.2022

\*\*\*

## Введение

Различные способы применения БПЛА уже предлагают решения наиболее острых экономических, экологических проблем и проблем производительности, с которыми сталкиваются отрасли во всем мире. Беспилотные аппараты используются для осмотра опор и линий электропередач, обследования, мониторинга, разведки и т. д. Стандартизация такой области, как беспилотные аппараты, является серьёзной проблемой. Однако уже существующие стандарты ориентируют свои ключевые атрибуты на безопасность полётов.

Стандарт ISO 21384-3:2019(E) таким образом рекомендует: операторы должны внедрить систему управления безопасностью в качестве стандартной практики независимо от типа эксплуатируемых беспилотных авиационных систем (БПЛА), что означает применение всех практических осуществимым мер информационной безопасности во всех аспектах применения БПЛА [1].

Многие современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для обмена данными с наземным пунктом

управления (НПУ) используют протокол MAVLink. Однако при использовании данного протокола остро стоит вопрос обеспечения защиты передаваемой информации, поскольку протокол MAVLink не обеспечивает никакой безопасности и может быть взломан довольно легко. Нет никаких механизмов обеспечения конфиденциальности, аутентификации. НПУ связывается с БПЛА через неаутентифицированный и незашифрованный канал. Любой злоумышленник, обладая соответствующим передатчиком, может связаться с дроном и вводить команды в существующий сеанс. Кроме того, потоки сообщений MAVLink могут быть легко перехвачены, потому что они также отправляются без шифрования.

MAVSec – улучшенная версия MAVLink, обладает криптографическими механизмами для смягчения уязвимостей конфиденциальности [2].

## Материалы и методы

Прошивка автопилота обновляется для различных улучшений, касающихся исправлений ошибок, поддержки нового

оборудования, безопасности и т. д. Однако факт обновления прошивки автопилота создает уязвимость, при которой вредоносный код может быть вставлен в прошивку на этапе установки. Кроме того, вредоносный код может быть вставлен на многих этапах разработки обновления, начиная с производства, затем до распространения, загрузки микропрограмм оператора и обслуживания.

Инфраструктура NECAD учитывает уязвимости встроенного ПО в ЕИМ с помощью аппаратных и программных методов для отслеживания потока управления встроенным ПО и выполнения проверки во время обновления [3]. Модуль подключается к главному процессору автопилота с возможностью чтения внутренних регистров и содержимого программной памяти для проверки прошивки, а также любых других необходимых соединений, необходимых для контроля выполнения нормальной работы БПЛА. Он также содержит специальную связь сигнализации об обнаружении неисправности, которая сообщает другим функциональным модулям об обнаружении злонамеренного отказа оборудования. ЕИМ (монитор целостности выполнения) работает в основном вместе с HRIM (монитором целостности аппаратных ресурсов) и I2M (монитором целостности информации) для доступа к интерфейсу отладки главного процессора, а также для перекрестной проверки данных внутренних регистров главного процессора с данными, полученными от

датчиков. Кроме того, он может работать с FIM (функциональным монитором целостности) для более высокого уровня анализа специфических функций приложения, предоставляя информацию о времени выполнения кода.

Первоначальная проверка встроенного ПО выполняется при загрузке/инициализации автопилота, при этом используются методы проверки содержимого памяти автопилота, такие как использование цепочки хеширования со случайным запросом, для чего может потребоваться статический хеш для сравнения [4]. Если вредоносный код вставлен таким образом, чтобы он был замаскирован от методов обнаружения микропрограмм, мониторы целостности во время работы БПЛА проверяют любое ненормальное поведение внутренних систем. Некоторые методы, которые можно использовать для выполнения во слежения за ненормальной активностью, связанной с вставкой вредоносного кода, можно разделить на программные и аппаратные решения.

Программные решения могут потребовать агрессивного подхода, такого как вставка избыточных инструкций в программу для обнаружения отклонений в потоке выполнения программы [5]. Отслеживающее обеспечение безопасности может использоваться для периодического мониторинга автопилота для проверки несоответствий в производительности или содержимом памяти во время выполнения задачи.

Для аппаратных методов может потребоваться внешнее оборудование, такое как сторожевой процессор и пошаговая блокировка, которые способны контролировать состояние производительности и состояние главного процессора БПЛА, проверяя поток выполнения программы или отслеживая обращения к памяти [5; 6; 7].

Другой метод заключается в отслеживании мгновенного потребления тока в системе посредством мониторинга цифровых отпечатков [6]. Для успешного применения методов отслеживания ненормальной активности БПЛА требуется, чтобы фреймворки безопасности знали определенные спецификации операций автопилота в виде инструкций, частоты алгоритмов, частоты обновления датчиков и т. д. Тогда после успешной проверки прошивки автопилота HECAD передает полномочия бортовых датчиков контроллеру и основному бортовому процессору БПЛА. В случае ошибки при проверке прошивки HECAD имеет возможность предотвратить обмен данными между главным процессором и датчиками и управление исполнительными механизмами. Монитор целостности выполнения следит за внутренней памятью главного процессора для проверки содержимого регистров и, возможно, за счетчиком программ и/или регистрами команд для проверки выполнения программы. Перспективным направлением защиты навигационного модуля БПЛА от вредоносных вставок можно считать самообучающиеся системы на

базе нейронных сетей, которые могут распознавать нормальную и ненормальную активности, анализируя характер типичного полёта.

Криптографические алгоритмы разделяются на симметричные алгоритмы, в которых используются симметричные ключи, и на асимметричные алгоритмы, которые используют пару «открытый – закрытый» ключ.

Симметричное шифрование является быстрым по своей конструкции и потребляет мало энергии, поскольку один и тот же ключ используется как для шифрования, так и для дешифрования. Это делает его подходящим для малоресурсных дронов. В свою очередь, асимметричные механизмы могут потребовать серьезные вычислительные ресурсы, дополнительные ресурсы памяти и дополнительные расходы энергии. Асимметричная криптография не подходит для статической коммуникации [8].

Так как модуль контроля полёта по своей сути выполняет исполнительную роль, являясь последним звеном перед актуаторами (двигатели БПЛА, закрылки, манипуляторы), воздействия на его работу происходят либо как вследствие атаки на другие функциональные модули, либо имеют запланированный характер, т. е. являются реализацией программной уязвимости модуля: внедрение сбоев, нарушение логики использования, применение взаимоблокировки, использование вирусов, червей и вредоносного ПО.

Для смягчения и противодействия угрозам функционального модуля контроля полёта целесообразно использовать IDS (системы обнаружения вторжений) [9]. IDS обычно представляет собой программно-аппаратное обеспечение, которое проверяет систему на наличие аномалий и отклонений.

Существует два типа IDS [10]:

- IDS неправильного использования;
- IDS аномалий.

IDS неправильного использования имеет дело с заранее заданными сигнатурами атак, которые воздействуют на уязвимые точки безопасности. Такие сигнатуры хорошо известны до атаки и используются для проверки в качестве шаблонов.

IDS аномалий сравнивает обычную производительность системы для проверки ее поведения и формирования соответствующей статистики. Если есть отклонения от нормальной производительности, то такое поведение фиксируется механизмом IDS. IDS идентифицирует входящий трафик и определяет, нужно ли его защищать или нет. Она использует три типа информации: долгосрочную, конфигурационную и информацию аудита системы.

Долгосрочная информация связана с построением базы данных методов, используемых для выявления атак. Конфигурационная информация зависит от текущего состояния системы. Информация аудита отображает текущее состояние системы. На основании данных аудита и искусственной карта состояния

системы этого делается вывод о том, были ли выявлены факты, указывающие на фактическое вторжение или нет. Профилактически принимаются меры по возврату системы в безопасное состояние. Используя межсетевые экраны, шифрование и аутентификацию, формируется один из барьеров для защиты системы.

Конкретными примерами, готовыми для интеграции в БПЛА, могут являться следующие подходы.

Децентрализованный гибридный метод обнаружения аномалий при использовании обнаружения максимумов и взаимной корреляции HybrIDS [11]. Первый этап обнаружения, используемый в HybrIDS, называется MaximaDetectionSystem (MDS). Его основная цель – быстро определить потенциальную угрозу. В рамках многоступенчатой схемы обнаружения ее вторичной целью является калибровка вторичной фазы IDS, называемой CCDS (система кросс-корреляционного обнаружения), чтобы она могла функционировать более точно. MDS анализирует пики, присутствующие в функции плотности вероятностей, на основе статистики, полученной из запросов, сделанных другими узлами системы. Он изолирует ненормальное поведение, которое проявляется как выпадающие пики в функции плотности, которые не соответствуют ожидаемому распределению. Эти выпадающие пики, как правило, быстро появляются для взаимодействий, которые статистически маловероятны;

это позволяет MDS быстро выявить наличие таких подозрительных взаимодействий. Запросы на взаимодействие классифицируются с помощью целочисленных меток. Когда запрос получен узлом, запрос и его источник записываются в таблицу истории. Эта таблица содержит: столбцы, которые сопоставляются с метками взаимодействия; и строки, которые сопоставляются с другими узлами, контролируемые IDS. Записанная информация сохраняется в виде значений счетчика, которые указывают количество запросов, полученных классификацией, и от какого узла они исходят. В распределение должно оптимально отражать схему хи-квадрат для обнаружения пиков, не указывающих на нормальное поведение системы, которое может происходить дальше графика функции плотности вероятностей. Точность исходного предсказанного распределения определяет уровень строгости, необходимый при установке порога для обнаружения внешних пиков. Статистическая модель представляет собой совокупность записей из таблицы истории. Каждая запись таблицы представляет собой значение счетчика, которое можно усреднить для формирования функции плотности вероятности, представляющего статистику запросов отдельных узлов. MDS формирует средний «профиль поведения». Система кросс-корреляционного обнаружения (CCDS) опирается на данные из таблицы истории MDS. Оценки (т. е. одна оценка на узел) обес-

печивают взаимную корреляцию усредненной функции плотности вероятности для системы с отдельными функциями плотности вероятностей, соответствующих каждому узлу. CCDS обеспечивает статистические сравнения посредством векторной взаимной корреляции взаимодействий узлов. Системные действия, превышающие установленный порог, считаются нарушением нормальной деятельности системы [11].

Следующим методом обнаружения и противодействия может являться адаптивный подход слияния данных, основанный на стратегии Маркова в теории игр. Данный метод представляет собой структуру слияния данных и сбора данных для обнаружения и прогнозирования многоступенчатых скрытых атак.

Структура состоит из двух полностью связанных основных частей:

1. Объединение данных модуль (для уточнения примитивного понимания и оценок, а также для выявления новых атак).
2. Динамический / адаптивный модуль распознавания признаков (для генерации примитивов оценок и идентификации новых или неизвестных атак).

Марковский (стохастический) игровой метод используется для оценки вероятности каждой возможной атаки в графе среды с неопределенностью и информационной незавершенностью.

Система обнаружения вторжения на основе правил поведения может быть ещё одним кандидатом для внедрения систему БПЛА.



Работа данного IDS для эталонной модели БПЛА основана на использовании простых правил поведения на основе спецификации для каждого БПЛА (табл.) Они ориентированы на встроен-

ные датчики и исполнительные механизмы, также позволяют узлу мониторинга выполнять обнаружение вторжений на доверенный соседствующий функциональный модуль.

**Таблица.** Таблица правил поведения БПЛА

**Table.** Table of UAV behavior rules

Название	Контроль или чтение	Диапазон
Широта	Чтение	( $-90^{\circ}$ , $90^{\circ}$ )
Долгота	Чтение	( $-180^{\circ}$ , $180^{\circ}$ )
Высота	Чтение	( $-423$ м, $150$ м)
Крен	Чтение	( $-180^{\circ}$ , $180^{\circ}$ )
Тангаж	Чтение	( $-180^{\circ}$ , $180^{\circ}$ )
Рыскание	Чтение	( $-180^{\circ}$ , $180^{\circ}$ )
Срыв	Чтение	Правда, ложь
Сила тяги	Контроль	( $0$ , $100\%$ )
Местоположение	Контроль	Подтверждено, не подтверждено

Оптимальный поиск правил поведения выполняется с помощью критерии приоритета. Каждое правило поведения определяет не одно состояние, а количество состояний, некоторые из которых являются безопасными, в которых нормальное поведение соблюдается, в то время как другие являются небезопасными состояниями, в которых злонамеренное поведение наблюдается более явно. Правило поведения таким образом имеет ряд переменных состояний, каждое из которых имеет диапазон значений, вместе указывающих, находится ли узел в нормальном состоянии или под воздействием злонамеренного поведения (в отношении этого правила).

Следующая процедура преобразует спецификацию поведения конечный автомат. Определяется индикатор поведения атаки в результате нарушения правила поведения. Затем этот индикатор поведения атаки преобразовывается в конъюнктив-предикат нормальной формы, и идентифицируются задействованные компоненты состояния, лежащие в основе конечного автомата. Далее индикаторы поведения атаки объединяются в логическое выражение в дизъюнктивной нормальной форме. Затем преобразуется объединение всех переменных предиката в компоненты состояния автомата, и устанавливаются их соответствующие диапазоны. В заключение происходит

управление количеством состояний путем коллапса состояний и выявление не легитимных комбинаций [12].

Алгоритмы симметричного шифрования подразделяются на две основные категории: потоковые шифры (такие, как RC4, режим CTR и ChaCha20) и блочные шифры (такие, как AES). Блочные шифры шифруют группы фиксированной длины из  $N$  бит (блоки открытого текста) в блок из  $N$  бит зашифрованных данных. Потоковые же шифры могут шифровать открытый текст различного размера.

AES в режиме счётчика (CTR): режим счетчика (CTR) – это режим алгоритма AES, который превращает блочный шифр в поточный шифр. Сначала поток входных блоков формируется в счетчики. Последующие счетчики получаются из начального счетчика  $IV$ , который приращается и используется для шифрования каждого блока по очереди. Затем функция прямого шифрования применяется к этим счетчикам для создания последовательности выходных блоков  $g_i$ , которые объединены исключающим ИЛИ с открытым текстом  $m_i$  для создания зашифрованного текста  $c_i$ .

**Input :**  $n$ -block message  $m = m_1 \dots m_n$ ,  
and a block  
cipher key  $k$

**Output:** Ciphertext AES-encrypt-ctr  
 $(k, m) = c_1 \dots c_n$

1: Initialization:

2:  $IV \leftarrow \{0, 1\}^n$ ;

3:  $r_0 \leftarrow IV$ ;

4: Encryption:

5: **for**  $i$  from 1 to  $n$  **do**

6:  $r_i = (IV + i)_k$

7: **end**

8: **for**  $i$  from 1 to  $n$  **do**

9:  $c_i = m_i \oplus r_i$

10: **end**

11: **return**  $c_1 \dots c_n$

Алгоритм 1 объясняет псевдокод шифрования AES-CTR, где  $IV$  – начальное значение счетчика,  $m_i$  –  $i$ -й блок простого текста, а  $c_i$  представляет  $i$ -й блок зашифрованного текста. И  $IV + i$ , и  $m_i$  независимы. Расшифровка-преобразование идентично шифрованию. Главная разница в том, что позиции открытого и зашифрованного текста заменены.

Режим счетчика (CTR) используется из-за его простоты и эффективности, потому что нет необходимости ни в функции декодирования, ни заполнителя, и он предлагает большую гибкость в реализации. Помимо высокого уровня безопасности он представляет высокая скорость, так как может выполняться параллельно. Действительно, шифрование и дешифрование могут выполняться параллельно на нескольких блоках простых или зашифрованных данных, что позволяет нам добиться максимального уровня параллелизма. Другая альтернатива заключается в том, что CTR преобразует блочный шифр в потоковый шифр, поскольку потоковый шифр более уместен из-за того, что MAVLink предоставляет ограниченную буферизацию.

Режим цепочки блоков шифра AES (CBC): BlockChaining шифр (CBC) – это режим блочного шифрования, наиболее часто используется, когда необходимо безопасно отправлять большие объемы данных. CBC-режим связывает предыдущий блок зашифрованного текста с текущим блоком сообщения перед применением функции шифрования. Этот режим эффективен для маскировки любого шаблона в открытом тексте: шифрование каждого блок зависит от всех предыдущих блоков.

Input: N-block message  $P = P_1 \dots P_N$ ,  
and a block  
cipher key  $k$

**Output: Ciphertext AES-encrypt-cbc**

$(k; P) = C_1 \dots C_N$

1: Initialization:

2:  $IV \leftarrow \{0,1\}^n$ ;

3:  $C_0 \leftarrow IV$ ;

4: Encryption:

5: **for**  $i$  from 1 to  $N$  **do**

6:  $C_i = (P_i \oplus C_{i-1})_k$

7: **end**

8: **return**  $C_1 \dots C_N$

Алгоритм 2 объясняет псевдокод шифрования AES-CBC. Как показано в алгоритме 2, режим CBC принимает секретный ключ  $k$  на вход, вектор инициализации  $IV$ , который случайным образом выбирается длиной, равной длине блока  $N$ , и открытый текст. Открытый текст разделен на несколько блоков  $P_1 \dots P_N$ , и каждый блок подвергается операции XOR с зашифрованными данными предыдущего блока до его шифро-

вания. Результат операция XOR зашифрован ключом  $K$  для получения зашифрованный текст  $C_1 \dots C_N$ . Таким образом, дешифрование – это обратный процесс, который включает расшифровку текущего зашифрованного текста и последующее добавление предыдущего блок зашифрованного текста к результату.  $IV$  и зашифрованное сообщение отправляется получателю, который затем обрабатывает эти данные с использованием AES-CBC под тем же ключом для проверки целостности сообщения. И восстанавливает исходно сообщение.

RC4 – это самый популярный и широко распространенный алгоритм потокового шифрования с симметричным ключом, используемый в сетевой безопасности [13]. Шифрование сообщения в RC4 достигается путем генерации ключевого поток, над которым производится операция исключающего ИЛИ с потоком открытого текста для создания потока зашифрованного текста.

**KSA**

Initialization:

**for**  $i$  from 0 to 255 **do**

$S[i] = i$ ;

**end**

$j = 0$ ;

$L = \text{length of the key.}$

$N = \text{length of the Substitution box or state.}$

$K = \text{key randomly chosen.}$

Scrambling:

**for**  $i$  from 0 to  $N-1$  **do**

$j = (j + S[i] + K[i \bmod L]);$

$\text{swap}(S[i]; S[j]);$

**end**

**PRGA**

Initialization:

 $i = 0;$  $j = 0;$ 

Generation Loop:

 $i = i + 1;$  $j = j + S[i];$  $swap(S[i]; S[j]);$  $outputO = S[S[i] + S[j]];$ 

Псевдокод для RC4 показан в алгоритме 3. Он состоит из двух частей: первая – это ключевой алгоритм планирования (KSA), тогда как вторая часть является алгоритмом генерации псевдослучайных чисел (PRGA), который генерирует псевдослучайную выходную последовательность. KSA принимает в качестве входных данных размер ключа  $k$ , который может варьироваться от 8 до 2048 бит (кратно 8 битам). Начинается тождественная перестановка в  $S$ , затем постоянно используется ключ для создания новой, неизвестной и зависящей от ключа перестановки. Поскольку единственное действие на  $S$  – поменять местами два значения, тот факт, что  $S$  содержит перестановку, всегда сохраняется. PRGA работает путем постоянного перемешивания перестановок, хранящихся в  $S$  с течением времени, каждый раз выбирая другое значение из перестановки  $S$ . Один раунд выходов RC4  $n$ -битное слово в качестве ключевого потока, которое затем подвергается операции исключающего ИЛИ с открытым текстом для создания зашифрованного текста.

Потоковый шифр RC4 эффективен для обработки в реальном времени. Алгоритм прост, быстр и легко объясним. Может быть эффективно реализован как в программном, так и в аппаратном обеспечении.

Алгоритм шифрования ChaCha20 требует следующие параметры: 256-битный ключ шифрования, 96-битный одно-разовый номер и 32-битный счетчик начальных блоков для шифрования открытого текста произвольной длины [14]. На выходе получается зашифрованный сообщение такой же длины.

Потоковый шифр ChaCha работает с матрицей состояний  $M$ , содержащей 16 слов. Каждое слово имеет ширину 32 бита. Матрица 1:

$$M = \begin{pmatrix} m_0 & m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 & m_7 \\ m_8 & m_9 & m_{10} & m_{11} \\ m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} \end{pmatrix} \Leftarrow \begin{pmatrix} c & c & c & c \\ k_1 & k_2 & k_3 & k_4 \\ k_5 & k_6 & k_7 & k_8 \\ cnt & cnt & n & n \end{pmatrix} \quad (1)$$

Первые четыре слова, обозначенные буквой  $c$ , являются константами, указанными в спецификации ChaCha. Следующие восемь слов – ключевые слова, обозначаемые  $k_i$  ( $i = 1, \dots, 8$ ). Последняя строка состоит из двух встречных слов  $cnt$  и двух случайных слов  $n$ . ChaCha работает с ключами длиной 128 и 256 бит. В 256-битном случае ключевые слова копируются по порядку в  $(k_1, \dots, k_8)$  из  $M$ .

В 128-битном случае ключевые слова копируются по порядку как во второй, так и в третьей строке  $M$ ,  $(k_1, \dots, k_4) = (k_5, \dots, k_8)$ .

$M$  проходит через хеш-функцию, которая имеет в качестве основного строительного блока функцию quarter-round (см. алгоритм). Функция quarter-round состоит из операций ARX (сложение по модулю 232, вращение, исключение ИЛИ) и является источником нелинейности для потокового шифра ChaCha, представлено в алгоритме 4.

$(a,b,c,d) = \text{quarterround}(a,b,c,d)$

**begin**

1:  $a \leftarrow a + b$

2:  $d \leftarrow (a \oplus d) \lll 16$

3:  $c \leftarrow c + d$

4:  $b \leftarrow (c \oplus b) \lll 12$

5:  $a \leftarrow a + b$

6:  $d \leftarrow (a \oplus d) \lll 8$

7:  $c \leftarrow c + d$

8:  $b \leftarrow (c \oplus b) \lll 7$

9: **return**  $a,b,c,d$

10: **end**

Один раунд хеш-функции состоит из четырех quarter-round. Количество раундов, используемых в хэш-функции ChaChar, является компромиссом между безопасностью и эффективностью.  $r$  – количество раундов, используемых в хэш-функции. Раунды ChaChar обратимы, поэтому нужно модульно добавить  $M$  к выходному результату раунда, чтобы сформировать хэш.

Реализация криптографической защиты предполагает интеграцию вышеупомянутых алгоритмов шифрования как на стороне автопилота БПЛА, так и на стороне НПУ. Сообщения MAVLink содержат заголовок с идентификатором, который нельзя зашифровать. Поэтому только полезная информация сообщения MAVLink может быть зашифрована, так как шифрование заголовка приведет к тому, что получатель не сможет распознавать соответствующий тип сообщения MAVLink. MAVLink использует контрольную сумму, чтобы определить, было ли сообщение изменено, поэтому контрольная сумма должна будет пересчитана после шифрования. Решением этой проблемы было бы выполнить шифрование перед вычислением контрольной суммы и расшифровать после повторной проверки. Перед отправкой любого параметра через отправку полезной информации heartbeat-сообщение отправляется с БПЛА на НПУ, чтобы убедиться, что система готова и работает. Шифрование выполняется на пути с БПЛА на НПУ. Полезное сообщение зашифровано сеансовым ключом, полученным на этапе аутентификации, и контрольная сумма вычисляется после шифрования, чтобы гарантировать, что сообщение правильно принято наземной станцией. БПЛА отправляет сообщение, содержащее зашифрованные полезные данные на наземную станцию. Как только сообщение получено, НПУ сначала проверяет контрольную сумму, а

затем расшифровывает полезные данные. Алгоритмы шифрования AES-CTR, AES-CBC, ChaCha20 и RC4 должны имплементироваться как на стороне БПЛА, так и на стороне НПУ.

Однако, как показали эксперименты, только ChaCha20 является самым

подходящим методом криптографической защиты БПЛА под управлением MAVLink [15; 16; 17; 18].

MAVLink-ChaCha20 отправляет больше пакетов по сравнению с CBC и CTR (рис. 1).

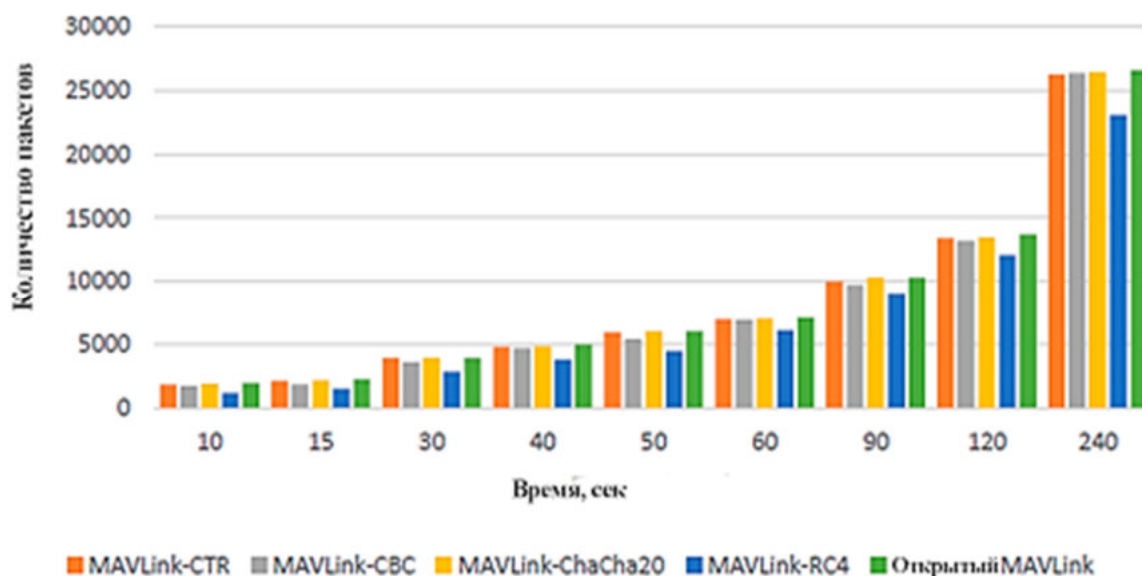


Рис. 1. Сравнение протоколов по количеству отправленных пакетов

Fig. 1. Comparison of protocols by the number of packets sent

Таким образом, ChaCha20 подходит для использования в маломощных БПЛА и сообщений в реальном времени [19].

Согласно графику на рисунке 2, MAVLink-RC4 является самым ресурсоемким с точки зрения использования памяти, потому что KSA и PRGA в алгоритме шифрования RC4 выполняются последовательно, что требует использования большего числа регистров.

В свою очередь, MAVLink-ChaCha20 требует меньше ресурсов памяти, что делает ChaCha20 хорошо подходящим для

устройств БПЛА. Согласно графику тестирования, разницы между незащищенным протоколом MAVLink и MAVLink-ChaCha20 в условиях использования памяти почти не наблюдается.

Чем больше времени ЦП используется в процесс шифрования, тем выше будет нагрузка на ЦП. Результаты моделирования, представленные на рисунке 3, заключают в том, что MAVLink-RC4 использует максимальное время загрузки процессора, в то время как MAVLink-ChaCha20 потребляет меньше времени ЦП [20].

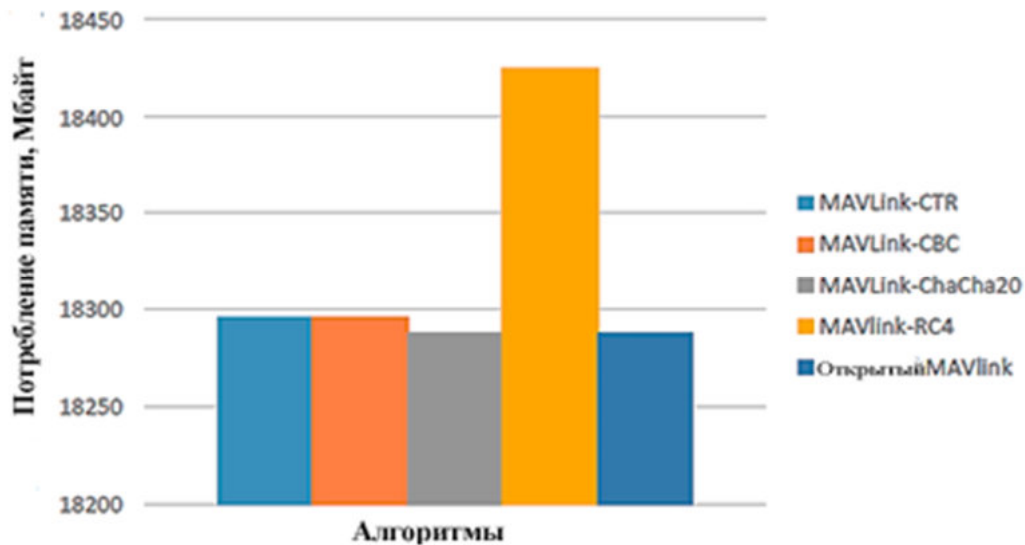


Рис. 2. Сравнение протоколов по потреблению памяти

Fig. 2. Comparison of memory consumption protocols

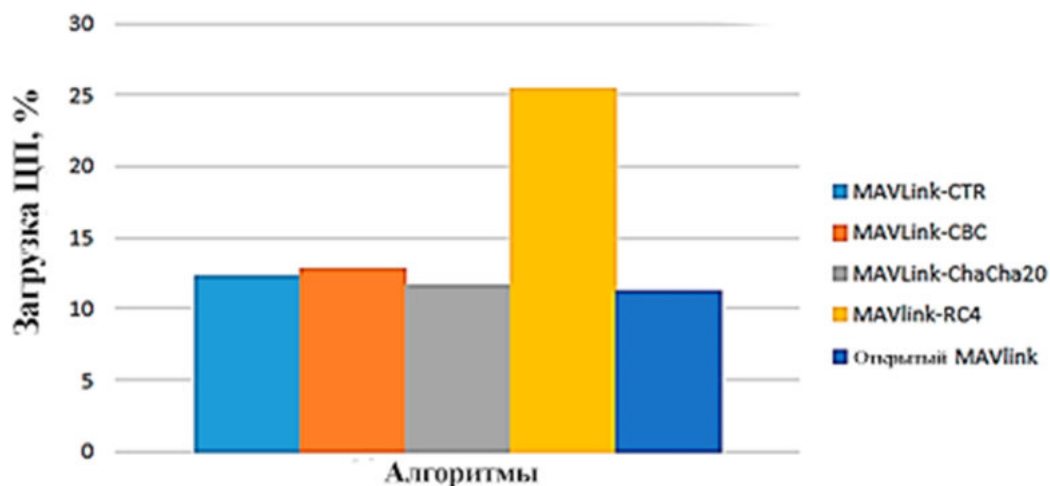


Рис. 3. Сравнение протоколов по загрузке ЦП

Fig. 3. Comparison of CPU utilization protocols

Это может объясняться тем, что ChaCha20 основан операциях ARX (сложение по модулю 232, вращение, исключение ИЛИ), которые являются дружественными к инструкциям процессора. Напротив, AES использует двоичные поля для Sbox и вычисления Mixcolumns, которые обычно выполняются в качестве справочной таблицы.

Следовательно, использование алгоритма шифрования ChaCha20 не повлияет на производительность протокола MAVLink, так как использует почти то же процессорное время.

### Результаты и их обсуждение

Основные результаты в соответствии с поставленной целью следующие:

1. Проведён анализ и синтез методов обеспечения безопасности каналов управления и передачи данных между НПУ и автономными беспилотными летательными аппаратами.

2. Проведен анализ протоколов шифрования AES-CTR, AES-CBC, ChaCha20 и RC4, результаты которого позволили определить ChaCha20 в качестве самого подходящего метода криптографической защиты БПЛА под управлением MAVLink.

3. Представлены результаты экспериментов по испытанию алгоритма шифрования ChaCha20, которые пока-

зывают, что использование данного алгоритма не повлияет на производительность протокола MAVLink, так как использует почти то же процессорное время.

### Выводы

В работе представлен способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MAVLink при управлении автономными беспилотными летательными аппаратами, основанный на алгоритме шифрования ChaCha20.

### Список литературы

1. Беспилотные авиационные системы. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70853/7ec34c8a22bf46958423b7e3a2e43693/ISO-21384-3-2019.pdf> (дата обращения: 05.08.2022).
2. Allouch A., Cheikhrouhou O., Koubaa A. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems // International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Morocco, 2019. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>.
3. Leccadito M. A Hierarchical Architectural Framework for Securing Unmanned Aerial Systems // Virginia Commonwealth University. Richmond, 2016. 122 p. <https://doi.org/10.25772/ODK3-E418>.
4. Yağdereli E., Gemci C., Ziya Aktaş A. A study on cyber-security of autonomous and unmanned vehicles // Journal of Defense Modeling and Simulation. 2015. N 12 (4). <https://doi.org/10.1177/1548512915575803>.
5. Sugihara M. A dynamic continuous signature monitoring technique for reliable microprocessors // IEICE Trans. Electron. 2011. Vol. 94 (4). P. 477–486. <https://doi.org/10.1587/transele.E94.C.477>.
6. Horst R., Harris L. Multiple instruction issue in the NonStop Cyclone processor // ACM SIGARCH Computer Architecture News. 1990. Vol. 18. P. 216–226. <https://doi.org/10.1109/ISCA.1990.134528>.



7. Gonzalez C., Reed R. Detecting unauthorized software execution in SDR using power fingerprinting // Military Communications Conference. San Diego: MILcom, 2010. P. 2211–2216. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2010.5680393>.

8. Хмелевская А. В., Михайлова Н. Ю., Николаенко А. И. Методика проведения аудита безопасности информационных систем // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. С. 171–175.

9. Dovbnya V. G., Koptev D. S., Babanin I. G., Knyazev A. A. Evaluation of the influence of the value of the dynamic range of the radio receiver on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation // T-Comm. 2021. Vol. 15, N 6. P. 65–69.

10. Zhang W., Gong X., Han G. An improved ant colony algorithm for path planning in one scenic area with many spots // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 13260–13269. <https://doi.org/10.1155/2016/7672839>.

11. Xie J., Pan X. An improved rc4 stream cipher // International Conference on Computer Application and System Modeling. Taiyuan, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICCASM.2010.5620800>.

12. Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Бабанин И. Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2016. 316 с.

13. Nir Y., Langley A. Chacha20 and poly1305 for ietf protocols. URL: <https://tools.ietf.org/id/draft-nir-cfrg-rfc7539bis-04.html> (дата обращения: 05.08.2022).

14. Применение БПЛА в задачах интеллектуального контроля и управления сельскохозяйственными работами / А. А. Князев, А. В. Хмелевская, М. Н. Луценко, А. Н. Кондратьев // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2022. С. 136–140.

15. Методологические основы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе комплексной субполосной обработки сверхкороткоимпульсных радиолокационных и оптических сигналов / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, Д. С. Коптев, Е. Г. Жиликов, И. Е. Мухин, А. Н. Заливин, В. Г. Довбня, И. Г. Бабанин, О. Г. Бондарь; Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. 204 с.

16. Analytical evaluation of equivalent energy loss in causal frequency selection filters in the processing of quadrature amplitude modulation signals / V. G. Andronov, I. E. Mukhin, I. G. Babanin, A. E. Sevryukov, D. S. Koptev, A. A. Chuev // Journal of Physics. Conference Series. 2020. N 1679 (3). P. 032006.

17. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles / I. G. Babanin, V. G. Andronov, D. S. Koptev, A. I. Nikolaenko, A. E. Sevriukov // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. St. Petersburg, 2021. P. 9470577.

18. Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Анализ существующих методов и возможные пути повышения эффективности системы диагностирования двигателей летательных аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 41–57.

19. Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 58–68.

20. Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Коптев Д. С. Основы конструирования радиоэлектронной аппаратуры с учетом обеспечения электромагнитной совместимости / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. 139 с.

## References

1. Беспилотные авиационные системы [Unmanned aircraft systems]. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70853/7ec34c8a22bf46958423b7e3a2e43693/ISO-21384-3-2019.pdf>. (accessed 05.08.2022)

2. Allouch A., Cheikhrouhou O., Koubaa A. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Morocco, 2019. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>

3. Leccadito M. A Hierarchical Architectural Framework for Securing Unmanned Aerial Systems. Virginia Commonwealth University. Richmond, 2016. 122 p. <https://doi.org/10.25772/0DK3-E418>

4. Yağdereli E., Gemci C., Ziya Aktaş A. A study on cyber-security of autonomous and unmanned vehicles. *Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2015, no. 12 (4). <https://doi.org/10.1177/1548512915575803>

5. Sugihara M. A dynamic continuous signature monitoring technique for reliable microprocessors. *IEICE Trans. Electron*, 2011, vol. 94 (4), pp. 477–486. <https://doi.org/10.1587/transele.E94.C.477>

6. Horst R., Harris L. Multiple instruction issue in the NonStop Cyclone processor. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 1990, vol. 18, pp. 216–226. <https://doi.org/10.1109/ISCA.1990.134528>

7. Gonzalez C., Reed R. Detecting unauthorized software execution in SDR using power fingerprinting. Military Communications Conference. San Diego, MiLcom, 2010, pp. 2211–2216. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2010.5680393>

8. Khmelevskaya A. V., Mikhailova N. Yu., Nikolaenko A. I. [Methods of auditing the security of information systems]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles on the materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 171–175. (In Russ.)

9. Dovbnya V. G., Koptev D. S., Babanin I. G., Knyazev A. A. Evaluation of the influence of the value of the dynamic range of the radio receiver on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation. *T-Comm*, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 65–69.

10. Zhang W., Gong X., Han G. An improved ant colony algorithm for path planning in one scenic area with many spots. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 13260–13269. <https://doi.org/10.1155/2016/7672839>

11. Xie J., Pan X. An improved rc4 stream cipher. International Conference on Computer Application and System Modeling. Taiyuan, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICCAASM.2010.5620800>

12. Mukhin I. E., Khmelevskaya A. V., Babanin I. G. Metodologicheskie osnovy sinteza sistem obespecheniya elektromagnitnogo dostupa sredstvami radiomonitirovaniya sovremennykh sistem telekommunikatsii [Methodological bases of synthesis of electromagnetic access systems by means of radio monitoring of modern telecommunication systems]. Kursk, Southwest State University Publ., 2016. 316 p.

13. Nir Y., Langley A. Chacha20 and poly1305 for ietf protocols. Available at: <https://tools.ietf.org/id/draft-nir-cfrg-rfc7539bis-04.html>. (accessed 05.08.2022)

14. Knyazev A. A., Khmelevskaya A. V., Lutsenko M. N., Kondrat'ev A. N. [The use of UAVs in the tasks of intellectual control and management of agricultural work]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2022, pp. 136–140. (In Russ.)

15. Oleinik I. I., Chernomorets A. A., Koptev D. S., Zhilyakov E. G., Mukhin I. E., Zalivin A. N., Dovbnya V. G., Babanin I. G., Bondar' O. G. Metodologicheskie osnovy obnaruzheniya malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove kompleksnoi

subpolosnoi obrabotki sverkhkorotkoimpul'snykh radiolokatsionnykh i opticheskikh signalov [Methodological bases of detection of small-sized unmanned aerial vehicles based on complex subband processing of ultrashort pulse radar and optical signals]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021. 204 p.

16. Andronov V. G., Mukhin I. E., Babanin I. G., Sevryukov A. E., Koptev D. S., Chuev A. A. Analytical evaluation of equivalent energy loss in causal frequency selection filters in the processing of quadrature amplitude modulation signals. *Journal of Physics. Conference Series*, 2020, no. 1679 (3), p. 032006.

17. Babanin I. G., Andronov V. G., Koptev D. S., Nikolaenko A. I., Sevriukov A. E. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*. St. Petersburg, 2021, p. 9470577.

18. Tyapkin S. A., Mukhin I. E., Koptev D. S. Analiz sushchestvuyushchikh metodov i vozmozhnye puti povysheniya effektivnosti sistemy diagnostirovaniya dvigatelei letatel'nykh apparatov [Analysis of existing methods and possible ways to improve the efficiency of the aircraft engine diagnostics system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 41–57.

19. Tyapkin S. A., Mukhin I. E., Koptev D. S. Metod sovmestnogo primeneniya pokazatelya struktury vibrosignala i izvestnykh rezul'tatov identifikatsionnykh izmerenii v zadachakh preventivnogo obnaruzheniya neispravnostei aviatsionnykh dvigatelei [Method of joint application of the vibration signal structure indicator and known results of identification measurements in the tasks of preventive fault detection of aircraft engines]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 58–68.

20. Mukhin I. E., Khmelevskaya A. V., Koptev D. S. Osnovy konstruirovaniya radioelektronnoi apparatury s uchetom obespecheniya elektromagnitnoi sovmestimosti [Fundamentals of designing radioelectronic equipment taking into account electromagnetic compatibility]. Kursk, Southwest State University Publ., 2018. 139 p.

## Информация об авторах / Information about the Authors

**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 Антон Александрович**, главный специалист, Областное казенное учреждение «Центр электронного взаимодействия», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tony.sevryukov@internet.ru

**Anton A. Sevryukov**, Chief Specialist, Regional State Institution "Electronic Interaction Center", Kursk, Russian Federation, e-mail: tony.sevryukov@internet.ru

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

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

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

**Ekaterina Yu. Babanina**, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanina@internet.ru

---

# МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

---

## MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

---

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-142-161>



### Моделирование и реализация онлайн-сервиса для поиска попутчиков для междугородних поездок

А. В. Малышев<sup>1</sup>, Н. А. Пигарева<sup>2</sup>, Т. Н. Конаныхина<sup>1</sup> ✉, Я. О. Заикин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
Волоколамское ш. 4, г. Москва 125993, Российская Федерация

✉ e-mail: govtn@mail.ru

#### Резюме

**Целью исследования** является разработка и автоматизация процесса поиска попутчиков для междугородних автомобильных поездок. Актуальность разработки определяется необходимостью создания общественного программного обеспечения в рамках замещения программного обеспечения, разработанного компаниями, приостановившими или прекратившими свою деятельность на территории РФ, цифровизацией региона, а также в связи с реализацией проекта «Цифровая экономика Российской Федерации», предложенное программное обеспечение увеличивает доступности междугороднего передвижения при повышении безопасности водителя и пассажиров.

С целью упрощения процесса перемещения пассажиров между населенными пунктами и оптимизацией времени и затрат предложена модель онлайн-сервиса для организации междугородних поездок. Общественный транспорт не всегда представляет подходящий вариант, в связи с чем увеличиваются временные затраты для достижения нужного пункта, при этом затраты на бензин при поездке на личном транспорте зачастую обходятся дороже, чем на общественном транспорте, пусть и с большим комфортом.

**Методы.** Разработка веб-приложения была выполнена с помощью в ASP.NET Core, интерфейс приложения разрабатывался с применением ASP.NET Core MVC. Веб-приложение позволяет просматривать данные о существующих запланированных поездках и опубликовывать информацию о своих поездках.

**Результаты.** В ходе выполнения работы был разработан и реализован онлайн-сервиса поиска попутчиков для междугородних поездок. Все базовые функции, необходимые для выполнения основных поставленных задач веб-приложения, были успешно реализованы, подключенная база данных работает стабильно.

**Заключение.** Разработанный программный продукт может использоваться в повседневной жизни для поиска средств передвижения.

---

**Ключевые слова:** онлайн-сервис; программно-информационная система; база данных.

---

© Малышев А. В., Пигарева Н. А., Конаныхина Т. Н., Заикин Я. О., 2022

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022; 12(4): 142–161

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

**Для цитирования:** Моделирование и реализация онлайн-сервиса для поиска попутчиков для междугородних поездок / А. В. Малышев, Н. А. Пигарева, Т. Н. Конаныхина, Я. О. Заикин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 142–161. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-142-161>.

Поступила в редакцию 07.10.2022

Подписана в печать 03.11.2022

Опубликована 22.12.2022

## Modeling and Implementation of an Online Service for Finding Travel Companions for Long-Distance Trips

Alexander V. Malyshev<sup>1</sup>, Natalia A. Pigareva<sup>2</sup>,  
Tatyana N. Konanykhina<sup>1</sup> ✉, Yaroslav O. Zaikin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4 Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russian Federation

✉ e-mail: govtn@mail.ru

### Abstract

**The purpose of research** is to develop and automate the process of finding fellow travelers for long-distance car trips. The relevance of the development is determined by the need to create domestic software as part of the replacement of software developed by companies that have suspended or ceased their activities in the territory of the Russian Federation, digitalization of the region, as well as in connection with the implementation of the project "Digital Economy of the Russian Federation", the proposed software increases the availability of intercity traffic while improving driver safety and passengers.

In order to simplify the process of moving passengers between localities, and to optimize time and costs, an online service model for organizing long-distance trips is proposed. Public transport is not always a suitable option, and therefore the time costs increase to reach the desired point, while the cost of gasoline when traveling by private transport is often more expensive than by public transport, albeit with a large comfort.

**Methods.** The development of the web application was carried out with the help of ASP.NET Core, the application interface was developed using ASP.NET Core MVC. The web application allows you to view data about existing scheduled trips and publish information about your trips.

**Results.** In the course of the work, an online travel search service for long-distance trips was developed and implemented. All the basic functions necessary to perform the main tasks of the web application have been successfully implemented, the connected database works stably.

**Conclusion.** The developed software product can be used in everyday life to search for vehicles.

**Keywords:** online service, software and information system, database.

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

**For citation:** Malyshev A. V., Pigareva N. A., Konanykhina T. N., Zaikin Ya. O. Modeling and Implementation of an Online Service for Finding Travel Companions for Long-Distance Trips. *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(4): 142–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-142-161>.

Received 07.10.2022

Accepted 03.11.2022

Published 22.12.2022



## Введение

С развитием Интернета и социальных сетей появилась возможность создавать различные приложения для упрощения процессов поиска людей и услуг по всему миру [1; 2; 3; 4; 5], в т. ч. и сервисы для поиска спутников в поездку.

Сервисы для поиска попутчиков пользуются большой популярностью в связи с тем, что водитель может компенсировать часть стоимости или полную стоимость поездки, разделив её с пассажирами, а пассажиры могут добраться в нужный им населенный пункт в удобное время без привязки к расписанию движения общественного междугороднего транспорта и часто значительно дешевле, также такие приложения решают проблему отсутствия маршрутов как таковых или прямых маршрутов между некоторыми населенными пунктами. Подобные сервисы значительно увеличивают безопасность поездки в сравнении, например, с автостопом, в связи с фиксацией приложения маршрута, данных водителя и пассажиров, которые могут оставлять отзывы друг о друге, тем самым при выборе попутчиков можно отказать в поездке пассажиру с плохими отзывами или выбрать водителя с осторожным стилем вождения, что, несомненно, позволяет сделать поездку более комфортной и безопасной.

Подобные сервисы существуют в виде сайтов, приложений и групп в социальных сетях с различным функционалом,

но наибольшую популярность получил начавший свою работу в России в 2014 г. Bla-Bla-Car. Набрав большую популярность, сервис привлёк внимание мошенников, что привело к снижению уровня доверия к нему. А в марте 2022 г. пресс-служба Bla-Bla-Car уведомила о том, что французская штаб-квартира компании намерена в ближайшие месяцы приостановить инвестиции в свою дочернюю структуру в России, как и её финансирование на неопределённый срок, что создаёт риск закрытия сервиса на территории РФ. Все вышеперечисленное приводит к необходимости разработки отечественного программного обеспечения, способного заменить иностранный сервис.

Предлагаемый проект представляет собой программный сервис, предназначенный для автоматизации процесса поиска попутчиков для междугородних автомобильных поездок. Разработка веб-приложения была выполнена с помощью ASP.NET Core, интерфейс предлагаемого программного обеспечения разработан при помощи ASP.NET Core MVC [6; 7; 8].

Данная программа может использоваться в личных целях для уменьшения стоимости поездки, путём разделения затрат на дорогу между участниками поездки или же для повышения уровня собственного комфорта, путешествуя на легковом автомобиле, вместо общественного транспорта.



Функциональное назначение данного программного продукта заключается в информировании пользователей о запланированных поездках, что увеличивает разнообразие и доступность междугородних передвижений.

Программный продукт может использоваться широким кругом лиц, имеющих необходимость передвижения между городами.

Входными данными для программной системы являются [9; 10; 11]: введённые пользователем данные: дата и время поездки, пункт отправления, пункт назначения, стоимость поездки, количество свободных мест, имя, возраст, логин, пароль, контактный номер.

Выходными данными для программной системы являются:

- список подходящих поездок;
- уведомления о действии на странице;
- обновлённый список запланированных поездок.

## Материалы и методы

Разрабатываемая многопользовательская программно-информационная система – это веб-приложение, которое позволяет просматривать данные о существующих запланированных поездках и публиковать информацию о своих поездках [12; 13; 14].

Каждый пользователь может выступать как в роли попутчика, так и в роли организатора поездки. Для добавления информации или бронирования необходима регистрация и авторизация на сайте.

В разрабатываемом программном продукте реализованы следующие функции: возможность регистрации, возможность авторизации в личном кабинете сервиса, возможность редактирования собственного профиля, возможность поиска подходящей поездки, возможность публикации / удаления собственной поездки, возможность бронирования / отмены бронирования места в поездке, возможность связи с водителем / попутчиком, возможность просмотра доступных поездок, возможность просмотра стоимости поездок, возможность просмотра публичной информации о водителе / попутчике, возможность просмотра забронированных мест, возможность просмотра забронированных поездок [15; 16].

На рисунке 1 изображён порядок действий в веб-приложении для поиска поездки.

На рисунке 2, а изображён порядок действий в веб-приложении для просмотра списка всех поездок, на рисунке 2, б – порядок действий в веб-приложении для регистрации в базе данных.

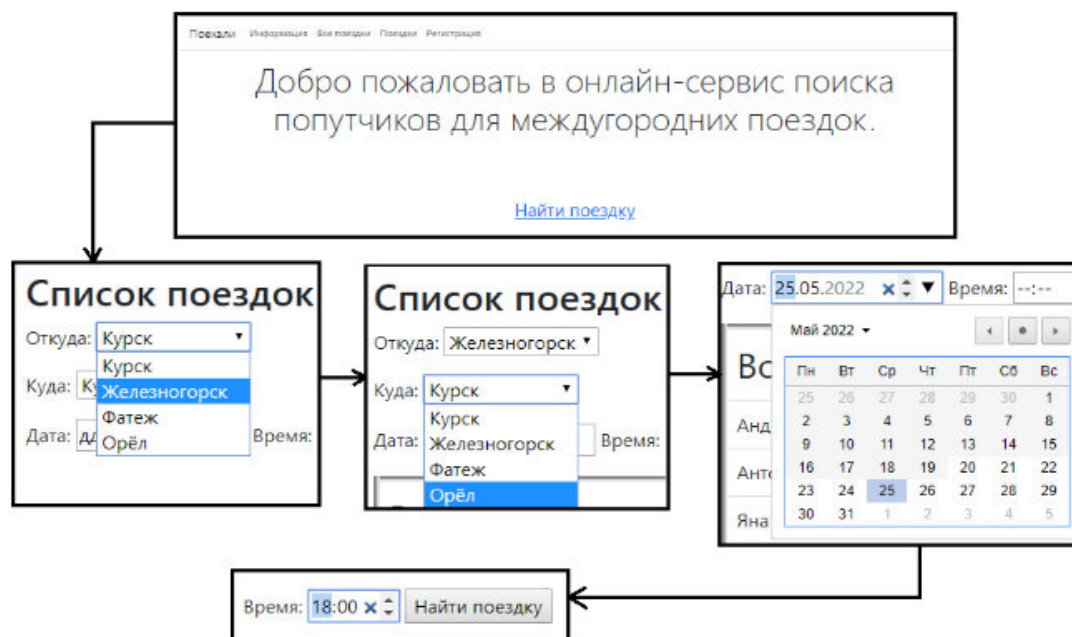


Рис. 1. Порядок действий на странице поиска поездки

Fig. 1 Procedure on the trip search page

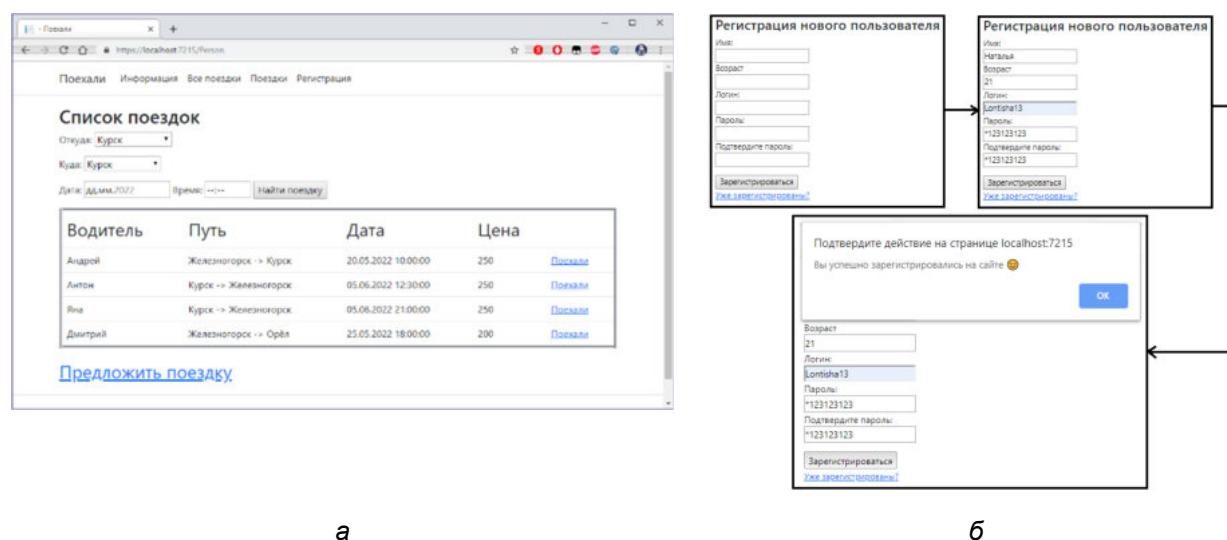


Рис. 2. Порядок действий на странице: а – просмотр поездок; б – регистрация

Fig. 2. The procedure on the page: a – viewing trips; b – registration

Выходными данными прецедента «Публикация поездки» являются оповещение на странице об успешном создании поездки и занесение данных в базу данных.

База данных разработанного приложения содержит информацию обо всех

сущностях предметной области. БД приложения содержит следующие таблицы: пользователь; поездки [17].

На рисунке 3 показана концептуальная модель предметной области.

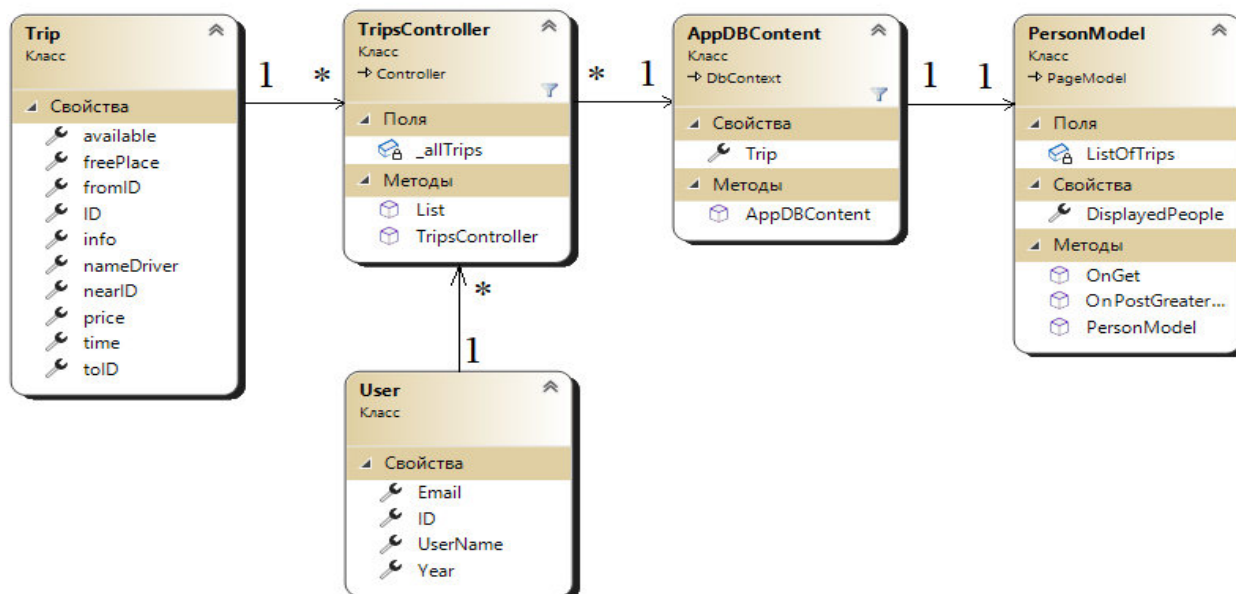


Рис. 3. Модель данных

Fig. 3. Data Model

Подробный реквизитный состав перечисленных таблиц приведён в таблицах 1–2.

В таблице 1 приведена спецификация таблицы User, содержащей данные пользователей.

Таблица 1. Спецификация таблицы User, содержащей данные пользователей

Table 1. Specification of the User table containing user data

Поле	Тип	Обязательное	Характеристика
ID	TEXT	True	Уникальный идентификатор пользователя
number	INT	True	Контактный номер пользователя
UserName	TEXT	True	Имя пользователя
Age	INT	True	Возраст пользователя
Login	TEXT	True	Логин пользователя
Password	TEXT	True	Пароль пользователя

Архитектура данной программной системы состоит из 3 основных компонентов, содержащих несколько модулей:

1. Controllers – обеспечивает взаимодействие модели и представления. Состоит из следующих модулей: Account, Home, Person, Trip.

2. Pages – представления или веб-страницы. Служит для отображения данных и взаимодействия с пользователем,

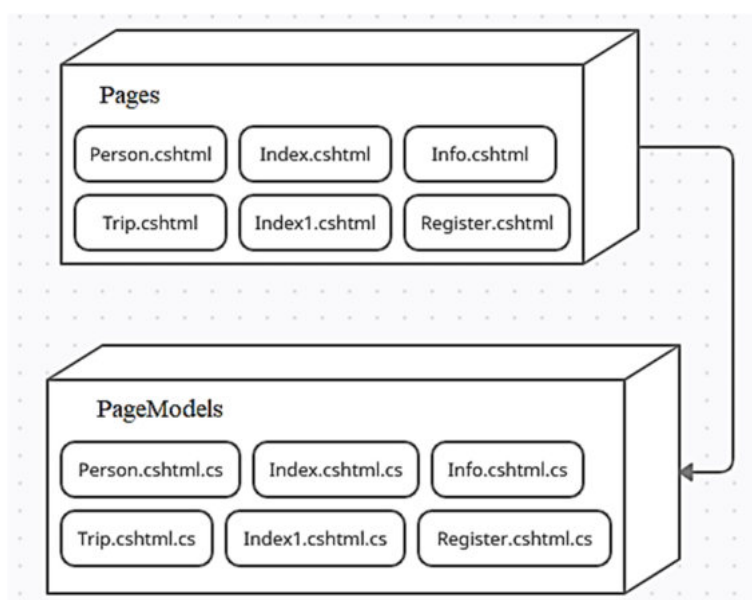
состоит из следующих модулей: Index, Index1, Info, Person, Register, Trip.

3. PageModels – позволяет создавать страницы с кодом Razor, которые могут обрабатывать запросы. Состоит из следующих модулей: Index, Index1, Info, Person, Register, Trip.

На рисунке 4 представлена диаграмма компонентов программы.

**Таблица 2.** Спецификация таблицы Trip, содержащей данные о поездках**Table 2.** Specification of the Trip table containing trip data

Поле	Тип	Обязательное	Характеристика
ID	INT	True	Уникальный идентификатор поездки
available	BOOL	True	Наличие свободных мест
freePlace	INT	True	Количество доступных для брони мест
fromId	TEXT	True	Название пункта отправления
info	TEXT	False	Дополнительная информация о поездке от организатора
nameDriver	TEXT	True	Имя водителя (организатора поездки)
nearID	TEXT	True	Название промежуточного пункта
price	INT	True	Стоимость поездки для попутчика
time	DATETIME	True	Время отправления
toID	TEXT	True	Название пункта прибытия

**Рис. 4.** Диаграмма компонентов программы**Fig. 4.** Diagram of program components

Описание компонентов:

- Person.cshtml – представление интерфейса окна всех поездок и интерфейса поиска подходящей поездки.
- Trip.cshtml – представление интерфейса окна поездок пользователя.
- Index.cshtml – представление интерфейса домашней страницы приложения.

- Index1.cshtml – представление интерфейса личного кабинета пользователя.
- Info.cshtml – представление интерфейса добавления новой поездки.
- Register2.cshtml – представление интерфейса регистрации пользователя.
- Register3.cshtml – представление интерфейса авторизации пользователя.

- Person.cshtml.cs – обеспечение процессов взаимодействия между компонентами страницы и отображения значений из базы данных.

- Trip.cshtml.cs – обеспечение процессов взаимодействия между компонентами страницы и отображения значений из базы данных.

- Index.cshtml.cs – обеспечение процессов взаимодействия между страницами приложения.

- Index1.cshtml.cs – обеспечение процессов взаимодействия между компонентами страницы и отображения значений из базы данных.

- Info.cshtml.cs – обеспечение процессов взаимодействия между компонентами страницы и отображения значений из базы данных.

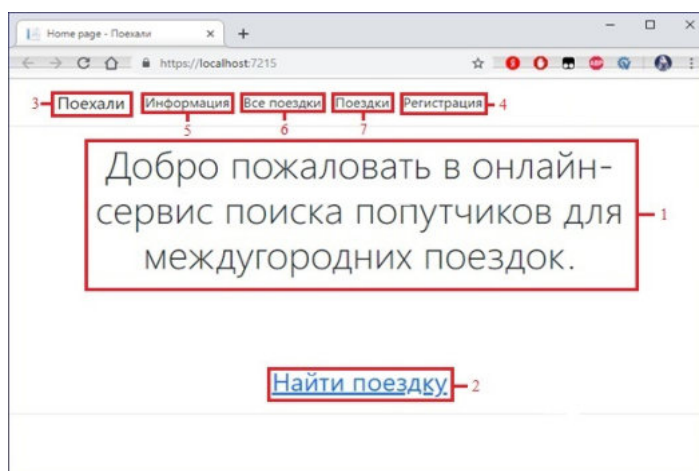
- Register2.cshtml.cs – обеспечение процессов взаимодействия между компонентами страницы и отображения значений из базы данных.

- Register3.cshtml.cs – обеспечение процессов взаимодействия между компонентами страницы и отображения значений из базы данных.

При создании программной системы для реализации поставленных задач были использованы сторонние библиотеки.

На основании требований к пользовательским интерфейсам, с помощью среды разработки Visual Studio 2022 ASP.NET Core был разработан интерфейс программы.

На рисунке 5 изображена главная страница веб-приложения.



**Рис. 5.** Интерфейс главной страницы

**Fig. 5.** Main page interface

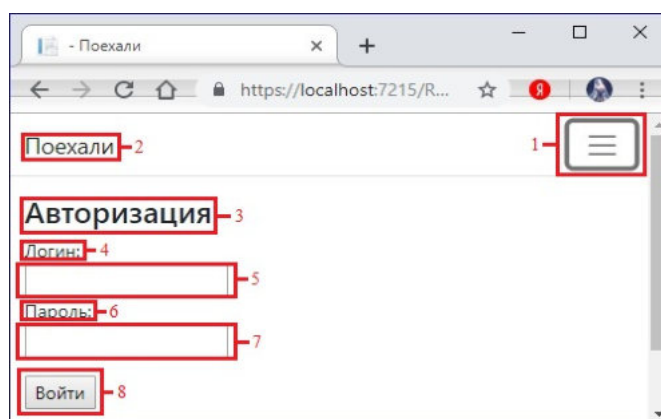
Описание объектов разработанного интерфейса главной страницы предлагаемого веб-приложения приведено ниже (табл. 3).

На рисунке 6 изображена страница авторизации пользователя.

В таблице 4 представлено описание объектов страницы авторизации разработанного веб-приложения.

**Таблица 3.** Объекты интерфейса главной страницы, разрабатываемого веб-приложения**Table 3.** Objects of the main page interface, the web application being developed

Тип объекта	Действие / описание объекта
1. Заголовок первого уровня	Текст приветствия пользователя
2. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу поиска подходящей поездки
3. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на домашнюю страницу
4. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу регистрации
5. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу публикации новой поездки
6. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу просмотра всех поездок
7. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу просмотра забронированных поездок

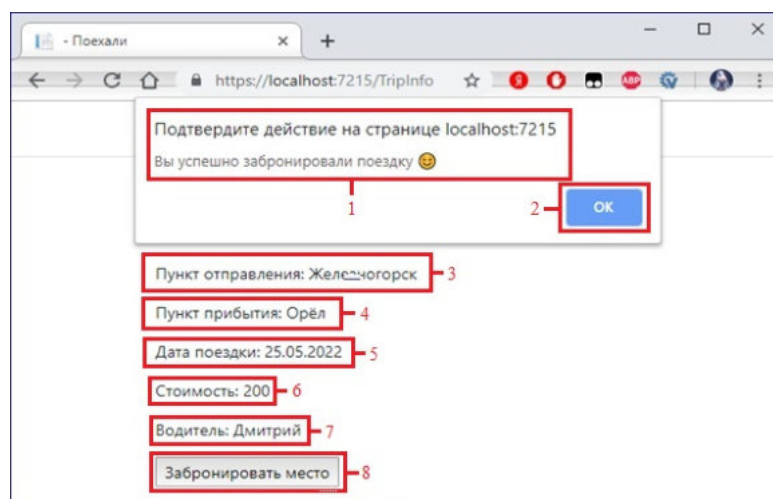
**Рис. 6.** Страница авторизации**Fig. 6.** Authorization page**Таблица 4.** Описание объектов интерфейса страницы авторизации в разработанном веб-приложении**Table 4.** Description of the interface objects of the authorization page in the developed web application

Тип объекта	Описание / действие объекта
1. Menu	Меню навигации
2. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на домашнюю страницу
3. Заголовок второго уровня	Описание области
4. Label	Описание поля для ввода данных
5. Input	Поле для ввода логина пользователя
6. Label	Описание поля для ввода данных
7. Input	Поле для ввода пароля пользователя
8. Input	Кнопка для обработки введенных пользователем данных

На рисунке 7 изображена страница бронирования места в транспортном средстве.

В таблице 5 представлено описание объектов, которые видит пользователь

при поиске транспортного средства в попутном направлении и бронировании места в найденном транспортном средстве.



**Рис. 7.** Страница бронирования

**Fig. 7.** Booking Page

**Таблица 5.** Описание объектов интерфейса страницы поиска и бронирования свободного места в попутном транспортном средстве

**Table 5.** Description of the objects of the interface of the search page and reservation of free space in a passing vehicle

Тип объекта	Описание / действие объекта
1. Alert	Всплывающее уведомление о бронировании места в выбранной поездке
2. Alert	Кнопка подтверждения действия на странице бронирования
3. Основной текст	Отображение информации о пункте отправления выбранной поездки
4. Основной текст	Отображение информации о пункте назначения выбранной поездки
5. Основной текст	Отображение даты выбранной поездки
6. Основной текст	Отображение информации о стоимости выбранной поездки
7. Основной текст	Отображение имени организатора выбранной поездки
8. Input	Кнопка подтверждения бронирования места в выбранной поездке



На рисунке 8 изображена страница просмотра информации об организаторе забронированной поездки.

В таблице 6 представлено описание объектов, расположенных на странице,

содержащей информацию об организаторе поездки (информацию о водителе транспортного средства).

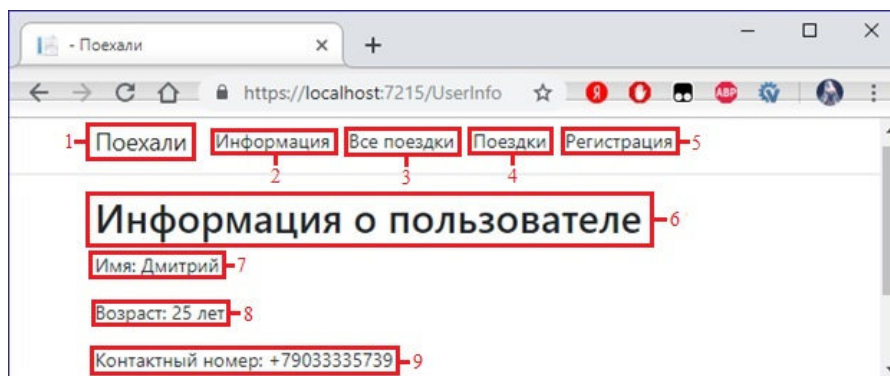


Рис. 8. Страница организатора поездки

Fig. 8. Trip organizer page

Таблица 6. Описание объектов интерфейса страницы пользователя приложения, создавшего поездку

Table 6. Description of the interface objects of the user page of the application that created the trip

Тип объекта	Описание / действие объекта
1. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на домашнюю страницу
2. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу публикации новой поездки
3. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу просмотра всех поездок
4. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу просмотра забронированных поездок
5. Гиперссылка	Кликабельная ссылка для перехода на страницу регистрации
6. Заголовок первого уровня	Описание области
7. Основной текст	Отображение информации об имени организатора забронированной поездки
8. Основной текст	Отображение информации о возрасте организатора забронированной выбранной поездки
9. Основной текст	Отображение контактной информации организатора забронированной поездки



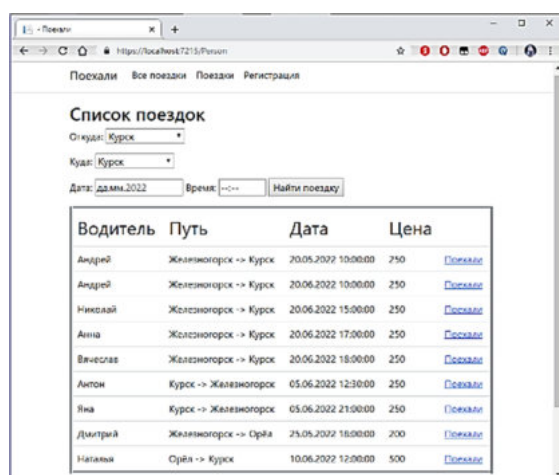
## Результаты и их обсуждение

В рамках системного тестирования программного сервиса поиска попутчиков для междугородних поездок использовались различные методы и функции разработанного приложения [18; 19; 20].

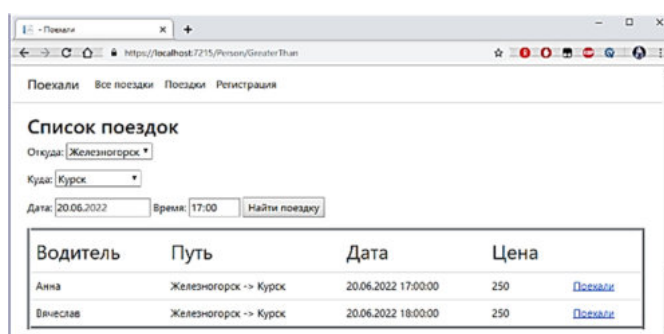
Для поиска подходящей поездки пользователь должен перейти на вкладку

«Все поездки», выбрать из выпадающих списков желаемые пункты отправления и прибытия, указать в соответствующих полях желаемые дату и время поездки.

В результате приложение произведёт отбор поездок согласно введённым пользователем критериям и отобразит список запланированных поездок, подходящих по маршруту и дате (рис. 9).



а



б

Рис. 9. Поездки: а – список; б – результат подбора

Fig. 9. Trips: a – list; b – selection result

Незарегистрированный пользователь должен перейти на вкладку «Регистрация» и заполнить поля: имя, возраст, номер телефона, логин, пароль, повтор пароля. В результате в базу данных сохраняются новые данные (рис. 10).

Попытка повторной регистрации по уже существующему логину приводит к оповещению об ошибке при регистрации (рис. 11).

	Id	Name	Age	Number	Login	Password
▶	1	Андрей	32	89041111111	Andrey1	123123123
	2	Антон	25	89042222222	Anton2	123123123
	3	Яна	22	89043333333	Yana3	123123123
	4	Дмитрий	23	89044444444	Dima4	123123123
	5	Александр	22	89045555555	Alexandr5	123123123
⬢	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Рис. 10. База данных после регистрации нового пользователя

Fig. 10. Database after registering a new user

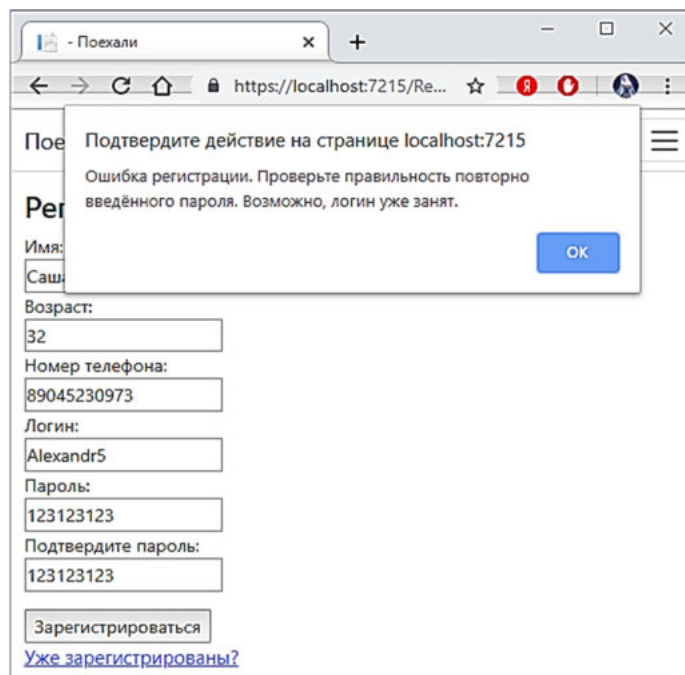
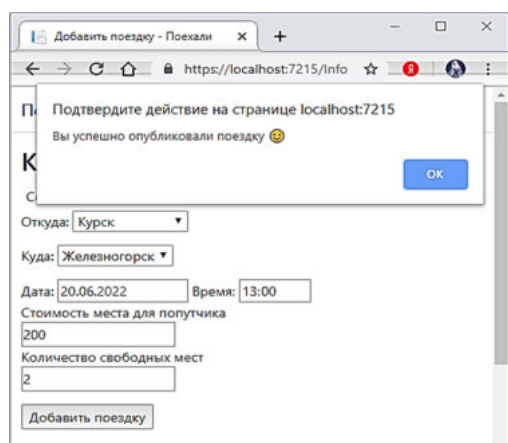


Рис. 11. Неудачная попытка регистрации

Fig. 11. Unsuccessful registration attempt

Для добавления новой поездки пользователь должен авторизоваться на сайте, перейти в раздел «Все поездки» и нажать на кнопку в нижней части страницы «Добавить поездку», заполнить на странице поля с информацией о запланированной поездке (дата, время, пункт отправления и пункт назначения) и указать

стоимость для попутчиков, количество доступных мест. Введённая пользователем информация сохраняется в базу данных. На странице добавления поездки появляется оповещение об успешной публикации поездки. На странице «Все поездки» появляется запись об опубликованной поездке (рис. 12).



а

toID	nameDriver	info	time	price	freePlace	available	fromID	passID
Орёл	Яна	NULL	05.06.2022 21:0...	500	3	True	Курск	Фитек
Курск	Николай	-	20.06.2022 15:0...	250	3	True	Железнодорожск	-
Курск	Наталья	NULL	10.06.2022 12:0...	500	3	True	Орёл	Железнодорожск
Орёл	Дмитрий	NULL	25.05.2022 06:00...	200	2	True	Железнодорожск	Тросна
Курск	Вячеслав	NULL	20.06.2022 18:0...	250	3	True	Железнодорожск	Фитек
Железнодорожск	Антон	Поездка, поб...	05.06.2022 12:3...	250	2	True	Курск	Фитек
Железнодорожск	Анна	Поддерживае...	20.06.2022 17:0...	250	2	True	Железнодорожск	Фитек
Железнодорожск	Андрей	NULL	20.06.2022 10:0...	250	2	True	Курск	-
Курск	Андрей	NULL	20.05.2022 10:0...	250	3	True	Железнодорожск	Фитек
Железнодорожск	Александр	NULL	20.06.2022 13:0...	200	2	True	Курск	-
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

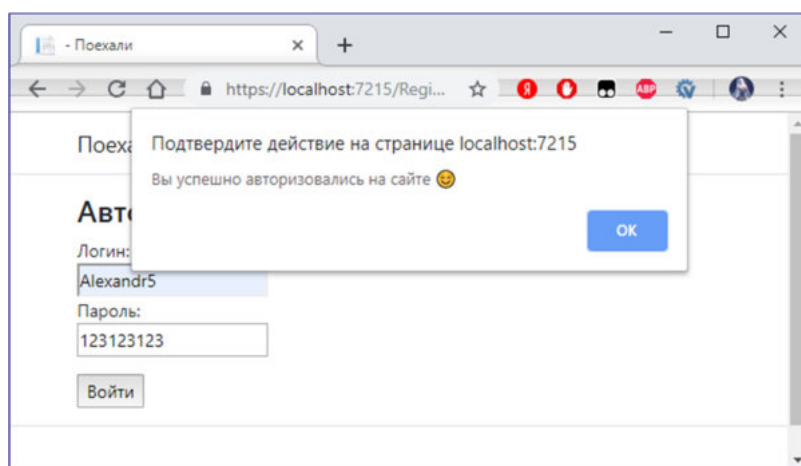
б

Рис. 12. Поездки: а – добавление новой; б – база данных, содержащая сведения

Fig. 12. Trips: a – adding a new one; b – a database containing information

Для авторизации пользователь должен нажать на вкладку «Уже зарегистрированы?» в разделе «Регистрация» и ввести корректные логин и пароль в соответствующие поля на странице авторизации (рис. 13).

При успешном бронировании пользователь получает уведомление об бронировании места и переходит на страницу «Поездки» с обновлёнными данными о запланированных поездках пользователя (рис. 14).



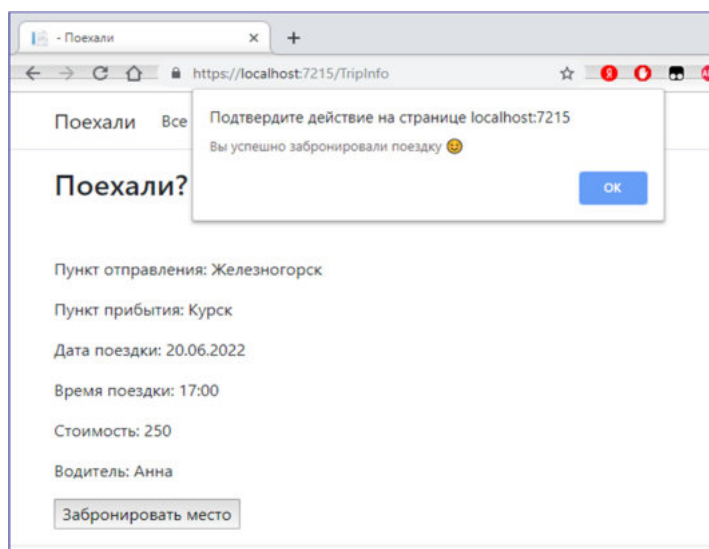
а

Login	Password
Andrey1	123123123
Anton2	123123123
Yana3	123123123
Dima4	123123123
Alexandr5	123123123
NULL	NULL

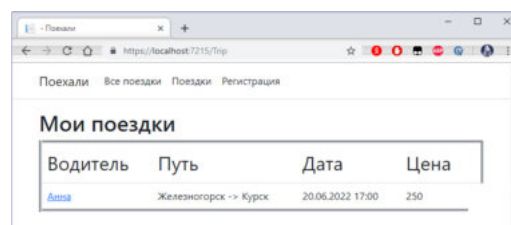
б

**Рис. 13.** Поездки: а – успешная авторизация; б – база данных с корректными данными

**Fig. 13.** Trips: a – successful authorization; b – database with correct data



а



б

**Рис. 14.** Поездки: а – уведомление о успешном бронировании; б – обновлённый список забронированных поездок

**Fig. 14.** Trips: a – notification of successful booking; b – updated list of booked trips

## Выводы

Онлайн-сервисы поиска попутчиков появились уже многие годы назад, но технологии развиваются, и необходимо совершенствовать старые проекты. Это направление является востребованным и актуальным, так как не только способствует повышению мобильности и комфорта любителей путешествовать, но и увеличивает количество отечественного программного обеспечения.

Разработанное веб-приложение, позволяющее находить попутчиков для автомобильных междугородних поездок или же присоединяться к уже запланированным поездкам на личном транспорте, тем самым повышает свой уровень комфорта, уровень мобильности и уменьшает затраты на передвижение между городами.

В результате работы создано веб-приложение, предоставляющее возможность разместить объявление о запланированной поездке с целью поиска попутчиков или же забронировать место в уже

существующей поездке, разработана база данных для хранения личных данных и контактной информации пользователей, для хранения данных о поездках, проведено тестирование программного обеспечения.

В рамках системного тестирования были проверены все заявленные в функциональных требованиях технического задания функции и приложения. Тестирование показало корректную работу программного продукта. Все базовые функции, необходимые для выполнения основных поставленных задач веб-приложения, были успешно реализованы, подключенная база данных работает стабильно, при обновлении данных проблем и сбоев не обнаружено. Интуитивно понятный интерфейс в доработке не нуждается.

Таким образом, разработанный сервис может быть использован в обычной жизни с целью экономии средств и повышения собственного комфорта и уровня мобильности.

## Список литературы

1. Чаплыгин А. А., Малышев А. В. Операционная система с ядром на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 8–20.
2. Говорухина Т. Н. Модели, методы и алгоритмы управления и обработки информации адаптивными реконфигурируемыми модулями в телеметрических системах: дис. ... канд. техн. наук / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2013. 132 с.
3. Рябкова Е. Б., Говорухина Т. Н., Корневский Н. А. Алгоритмы коррекции многомерной линейной разделяющей поверхности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 7. С. 194–199.

4. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска / Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 145–152.

5. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и ранней диагностики нарушений когнитивных функций / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, А. В. Поляков, Т. Н. Говорухина // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 4. С. 85–92.

6. Малышев А. В., Конаныхина Т. Н., Немченко С. А. Разработка и реализация web-ресурса для стоматологической клиники // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 33–53.

7. Baier D. Developing More-Secure Microsoft ASP.NET 2.0 Applications. М.: Microsoft Press, 2006. 456 с.

8. Фримен А. ASP.NET 4.5 с примерами на C# 5.0 для профессионалов. М.: Вильямс, 2021. 2792 с.

9. Бурмака А. А., Говорухина Т. Н., Горяйнов Р. Ю. Оптимизация аналого-дискретных преобразований входного воздействия в подсистеме приемного канала информационно-измерительной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 6. С. 256–270.

10. Efremov V., Efremova I., Malyshev A. Reconstruction of continuous image using maximum likelihood estimates from grouped data for measuring light intensity and interpolation by atomic functions according to aperture of photosensitive element of sensor // Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8867662.

11. Конаныхина Т. Н. Комплексная модель получения первичной информации в телеметрической системе распределенного типа // Провинциальные научные записки. 2022. № 1 (15). С. 49–52.

12. Магда Ю. С. NI Measurement Studio. Практика разработки систем измерения и управления на C#. М.: ДМК Пресс, 2017. 150 с.

13. Шмитт К., Симпсон К. HTML5. Рецепты программирования. М.: Питер, 2019. 288 с.

14. Конаныхина Т. Н., Конаныхин А. Ю., Авилов И. А. Алгоритм быстрого нахождения контура на основе метода следования за пикселями // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 2 (58). С. 18–26.

15. Родин А. А., Сабуров В. Г., Малышев А. В. Проектирование системы автоматизированного перевода для мобильных устройств // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: сборник материалов Всероссийской конференции. Курск: Университетская книга, 2017. С. 143–147.
16. Малышев А. В. Адаптивный алгоритм маршрутизации реконфигурируемого матричного мультипроцессора // Перспективы науки. 2012. № 11 (38). С. 117–119.
17. Кузнецов С. Д. Основы баз данных. М.: Бином, 2018. 484 с.
18. Бурмака А. А., Цыплаков Ю. В., Говорухина Т. Н. Аналитическая и структурная модели принятия решения в процессе обнаружения последовательности видеоимпульсов с использованием процедуры дифференцирования входного воздействия // Радиотехника. 2017. № 10. С. 163–168.
19. Жерденко К. А., Малышев А. В. Современный комплексный подход к тестированию веб-приложений // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2018. С. 51–56.
20. Жерденко К. А., Малышев А. В. Применения MVC-паттерна во front-end разработке веб-программ // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2018. С. 47–51.

## References

1. Chaplygin A. A., Malyshev A. V. Operatsionnaya sistema s yadrom na osnove virtual'noi mashiny s umen'shennym naborom komand [An operating system with a kernel based on a virtual machine with a reduced set of commands]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 8–20.
2. Govorukhina T. N. Modeli, metody i algoritmy upravleniya i obrabotki in-formatsii adaptivnymi rekonfiguriruemymi modulyami v teletricheskikh sistemakh. Diss. kand. tekhn. nauk [Models, methods and algorithms for control and processing of information by adaptive reconfigurable modules in telemetry systems. Cand. techn. sci. diss.]. Kursk, Southwest State University, 2013. 132 p.
3. Ryabkova E. B., Govorukhina T. N., Korenevskii N. A. Algoritmy korrektsii mnogomernoi lineinoi razdelyayushchei poverkhnosti [Algorithms for correction of a multidimensional linear separating surface]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no. 7, pp. 194–199.

4. Govorukhina T. N., Myasoedova M. A., Grigorov I. Yu., Polyakov A. V. Matematicheskie modeli prognozirovaniya i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevaniy nervnoi sistemy, provotsiruemykh kombinirovannym vozdеistviem raznorodnykh faktorov riska [Mathematical models of forecasting and early diagnosis of occupational diseases of the nervous system provoked by the combined effect of heterogeneous risk factors]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2019, vol. 18, no. 2. pp. 145–152.

5. Korenevskii N. A., Rodionova S. N., Polyakov A. V., Govorukhina T. N. Metod sinteza matematicheskikh modelei prognozirovaniya i rannei diagnostiki narushenii kognitivnykh funktsii [Method of synthesis of mathematical models of prediction and early diagnosis of cognitive function disorders]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 85–92.

6. Malyshev A. V., Konanykhina T. N., Nemchenko S. A. Razrabotka i realizatsiya web-resursa dlya stomatologicheskoi kliniki [Development and implementation of a web resource for a dental clinic]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, vol. 12, no. 1. pp. 33–53.

7. Baier D. Developing More-Secure Microsoft ASP.NET 2.0 Applications. Moscow, Microsoft Press, 2006. 456 c.

8. Frimen A. ASP.NET 4.5 s primerami na C# 5.0 dlya professionalov [ASP.NET 4.5 with examples in C# 5.0 for professionals]. Moscow, Vil'yams Publ., 2021. 2792 p.

9. Burmaka A. A., Govorukhina T. N., Goryainov R. Yu. Optimizatsiya analogo-diskretnykh preobrazovaniy vkhodnogo vozdеistviya v podsisteme priemnogo kanala informatsionno-izmeritel'noi sistemy [Optimization of analog-discrete transformations of the input effect in the subsystem of the receiving channel of the information-measuring system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 256–270.

10. Efremov V., Efremova I., Malyshev A. Reconstruction of continuous image using maximum likelihood estimates from grouped data for measuring light intensity and interpolation by atomic functions according to aperture of photosensitive element of sensor. Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAuto-Con 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, p. 8867662.

11. Konanykhina T. N. Kompleksnaya model' polucheniya pervichnoi informatsii v teletricheskoi sisteme raspredelennoogo tipa [Complex model of obtaining primary information in a distributed type telemetry system]. *Provintsial'nye nauchnye zapiski = Provincial Scientific Notes*, 2022, no. 1 (15), pp. 49–52.

12. Magda Yu. S. NI Measurement Studio. Praktika razrabotki sistem izmereniya i upravleniya na C# [NI Measurement Studio. The practice of developing measurement and control systems in C#]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 150 p.
13. Shmitt K., Simpson K. HTML5. Retsepty programmirovaniya [HTML5. Programming recipes]. Moscow, Piter Publ., 2019. 288 p.
14. Konanykhina T. N., Konanykhin A. Yu., Avilov I. A. Algoritm bystrogo nakhozhdeniya kontura na osnove metoda sledovaniya za piksel'yami [Algorithm of fast contour finding based on the method of following pixels]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* = *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2022, no. 2 (58), pp. 18–26.
15. Rodin A. A., Saburov V. G., Malyshev A. V. [Designing an automated translation system for mobile devices]. *Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya. Sbornik materialov Vserossiiskoi konferentsii* [Software engineering: modern trends in development and application. Collection of materials of the All-Russian Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017. S. 143–147. (In Russ.)
16. Malyshev A. V. Adaptivnyi algoritm marshrutizatsii rekonfiguriruemogo matrichnogo mul'tiprotsessora [Adaptive routing algorithm of reconfigurable matrix multiprocessor]. *Perspektivy nauki* = *Prospects of Science*, 2012, no. 11 (38), pp. 117–119.
17. Kuznetsov S. D. Osnovy baz dannykh [Fundamentals of databases]. Moscow, Binom Publ., 2018. 484 p.
18. Burmaka A. A., Tsyplov Yu. V., Govorukhina T. N. Analiticheskaya i strukturnaya modeli prinyatiya resheniya v protsesse obnaruzheniya posledovatel'nosti videoimpul'sov s ispol'zovaniem protsedury differentsirovaniya vkhodnogo vozdeistviya [Analytical and structural models of decision-making in the process of detecting a sequence of video pulses using the procedure for differentiating the input effect]. *Radiotekhnika* = *Radio Engineering*, 2017, no. 10, pp. 163–168.
19. Zherdenko K. A., Malyshev A. V. [Modern integrated approach to testing web applications]. *Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya. Sbornik materialov II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Software engineering: modern trends in development and application. Collection of materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2018, pp. 51–56. (In Russ.)
20. Zherdenko K. A., Malyshev A. V. [Applications of the MVC pattern in front-end development of web programs]. *Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya. Sbornik materialov II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Software engineering: modern trends in development and application. Collection of materials of the II All-Russian Scientific and practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2018, pp. 47–51. (In Russ.)



### Информация об авторах / Information about the Authors

**Малышев Александр Васильевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой программной  
инженерии, Юго-Западный государственный  
университет, г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: alta76@yandex.ru,  
ORCID: 0000-0002-9938-3456

**Alexander V. Malyshev,**  
Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor,  
Head of the Department of Software Engineering,  
Southwest State University, Kursk,  
Russian Federation,  
e-mail: alta76@yandex.ru,  
ORCID: 0000-0002-9938-3456

**Пигарёва Наталья Александровна,**  
студент, Московский авиационный  
институт (национальный исследовательский  
университет), г. Москва,  
Российская Федерация,  
e-mail: nata.pigaryova@yandex.ru,  
ORCID: 0000-0003-4874-5530

**Natalia A. Pigareva,** Student, Moscow Aviation  
Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation,  
e-mail: nata.pigaryova@yandex.ru,  
ORCID: 0000-0003-4874-5530

**Конаныхина Татьяна Николаевна,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
программной инженерии, Юго-Западный  
государственный университет,  
г. Курск, Российская Федерация  
e-mail: govtn@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-2755-0163

**Tatyana N. Konanykhina,** Cand. of Sci.  
(Engineering), Associate Professor  
of Department of Software Engineering,  
Southwest State University, Kursk,  
Russian Federation,  
e-mail: govtn@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-2755-0163

**Заикин Ярослав Олегович,**  
аспирант, Юго-Западный государственный  
университет, г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: yarozai@yandex.ru

**Yaroslav O. Zaikin,** Post-Graduate Student,  
Southwest State University, Kursk,  
Russian Federation,  
e-mail: yarozai@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-162-176>

## Математические модели ранней диагностики и прогнозирования нейротоксикоза у рабочих сварочного производства

И. Ю. Григоров<sup>1</sup> ✉, А. В. Будневский<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко Минздрава России  
ул. Студенческая 10, г. Воронеж 394036, Российская Федерация

✉ e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

### Резюме

**Целью исследования** является комплексное объединение моделей математического прогноза и первоначальной диагностики нейротоксикозов у работников сварочных производств, предоставляющее приемлемое для профилактической медицины, и в частности для врачей-профпатологов, качество принятия решений.

**Методы.** В образе базового математического аппарата выбрана технология мягких вычислений, в частности методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, широко используемая при решении задач со схожей структурой данных и типом нечеткости, с учетом неопределенности описания изучаемого класса профессиональных заболеваний.

Отобранный и адаптированный под решаемые задачи метод синтеза предоставляет возможность учитывать мультипликативный эффект влияния на организм человека вредных химических веществ, таких как марганец, алюминий, медь, оксид углерода и другие, порождаемые процессом сварки с учетом времени воздействия и других существенных эндогенных и экзогенных факторов риска.

**Результаты.** Полученные модели математического прогнозирования и ранней диагностики нейротоксикозов у работников сварочных производств, помимо воздействий на организм человека аэрозолевых, пылевых и фиброгенных факторов риска, позволяют учесть неблагоприятные экологические факторы другой природы в совокупности с особенностями индивидуальных факторов риска и эргономики сварочных цехов. В процессе заключительного моделирования и экспертного оценивания было представлено, что полученная математическая модель обеспечивает уверенность в правильном прогнозе развития и появления нейротоксикоза у работников сварочных производств не ниже 0,85, а ранней диагностики – не ниже 0,9.

**Заключение.** Получены нечеткие модели математического прогнозирования и ранней диагностики нейротоксикоза у работников сварочных производств, где первостепенными причинами риска являются промышленные аэрозоли с большим содержанием химических веществ, в совокупности с другими эндогенными и экзогенными факторами риска. Представлено, что уверенность в прогнозе превышает величину 0,85, а в наличии ранних стадий – 0,9, что допускает рекомендовать полученные результаты в практику работы профильных врачей-профпатологов.

**Ключевые слова:** математические модели; нейротоксикоз; ранняя диагностика профзаболеваний; сварочный цех; промышленные аэрозоли.

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

**Для цитирования:** Григоров И. Ю., Будневский А. В. Математические модели ранней диагностики и прогнозирования нейротоксикоза у рабочих сварочного производства // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 162–176. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-162-176>.

Поступила в редакцию 07.10.2022

Подписана в печать 02.11.2022

Опубликована 22.12.2022

## Mathematical Models of Early Diagnosis and Prediction of Neurotoxicosis in Welding Workers

Igor' Yu. Grigorov<sup>1</sup> ✉, Andrei V. Budnevsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University

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

<sup>2</sup> Voronezh State Medical University named after N. N. Burdenko Ministry of Health of Russia

10 Studentskaya Str., Voronezh 394036, Russian Federation

✉ e-mail: grigorov.igor@mail.ru.

### Abstract

**The purpose of research** is a comprehensive combination of models of mathematical prediction and initial diagnosis of neurotoxicosis in welding workers, providing, acceptable for preventive medicine, and in particular for occupational pathologists, the quality of decision-making.

**Methods.** In the image of the basic mathematical apparatus, the technology of soft computing and, in particular, the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules, widely used when solving problems with a similar data structure and type of fuzziness, taking into account the uncertainty of the description of the class of occupational diseases under study, is chosen.

The synthesis method selected and adapted to the tasks being solved makes it possible to take into account the multiplicative effect of harmful chemicals on the human body, such as manganese, aluminum, copper, carbon monoxide and others generated by the welding process, taking into account exposure time and other significant endogenous and exogenous risk factors.

**Results.** The obtained models of mathematical forecasting and early diagnosis of neurotoxicosis in welding workers, in addition to the effects of aerosol, dust and fibrogenic risk factors on the human body, allow us to take into account unfavorable environmental factors of a different nature in combination with the peculiarities of individual risk factors and ergonomics of welding shops.

During the final modeling and expert evaluation, it was presented that the resulting mathematical model provides confidence in the correct prognosis of the development and appearance of neurotoxicosis in welding workers at least 0.85, and early diagnosis at least 0.9.

**Conclusion.** Fuzzy models of mathematical forecasting and early diagnosis of neurotoxicosis in welding workers were obtained, where the primary causes of risk are industrial aerosols with a high content of chemicals, in combination with other endogenous and exogenous risk factors. It is presented that the confidence in the prognosis exceeds 0.85, and in the presence of early stages – 0.9, which allows us to recommend the results obtained in the practice of specialized occupational pathologists.

**Keywords:** *mathematical models; neurotoxicosis; early diagnosis of occupational diseases; welding shop industrial aerosols.*

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

**For citation:** Grigorov I. Yu., Budnevsky A. V. Mathematical Models of Early Diagnosis and Prediction of Neurotoxicosis in Welding Workers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravljenje, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(4): 162–176. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-162-176>.

Received 07.10.2022

Accepted 02.11.2022

Published 22.12.2022

## Введение

Анализ данных зарубежных и отечественных исследователей показывает, что современное сварочное производство представляет собой лидера среди загрязнителей воздуха рабочей зоны, как индивидуального работника, так и рабочей зоны предприятия. Во время выполнения различных видов сварочных работ атмосферный воздух рабочей зоны загрязняется сварочным аэрозолем (пылью), в составе которого в зависимости от вида используемой сварки, марок электродов и флюса находятся вредные для здоровья оксиды металлов (никеля, хрома, марганца, железа, алюминия, титана, меди, никеля и др), а также газообразные соединения (оксиды углерода и азота и др.). Пары металлов, конденсируясь на воздухе, образуют сварочную пыль – аэрозоль конденсации. Возникающие при сварке конвективные потоки воздуха уносят пыль и газы вверх, создавая совместно с диффузионными процессами неравномерную запылённость и загазованность помещений, приводящих к появлению и развитию целого ряда заболеваний нервной системы, системы дыхания, желудочно-кишечного тракта,

кожного покрова и т. д. Благодаря применению технических и санитарно-гигиенических мероприятий (совершенствование технологии сварки, применение вентиляции, разработка эффективных средств индивидуальной защиты органов дыхания) опасность основного «номенклатурного» заболевания сварщиков – пневмокониоза – уменьшилась. На лидирующие позиции стали выходить поражения, характерные для токсического действия составляющих элементов сварочного аэрозоля (в первую очередь марганца). Марганец обладает свойством накапливаться в виде малорастворимых фосфатов в головном мозге, костях и паренхиматозных органах. В патогенезе марганцевой интоксикации особую роль играет избирательное поражение подкорковых образований с нарушением дофаминергического тормозного контроля над кортикостриарной возбуждающей активностью вследствие селективного поражения D2-дофаминовых пресинаптических рецепторов [1; 2; 3; 4; 5; 6].

Можно сказать, что по мере снижения весовых концентраций сварочного аэрозоля в воздухе рабочих мест на

смену широко распространенных поражений легких выявляется новая, опасная для рабочих и производства угроза, которую можно назвать как нейротоксикоз. Эта угроза особенно опасна тем, что в начальной стадии поражения нервной системы марганцем появляется инертность нервной системы с недооценкой и безразличием к состоянию своего здоровья.

С виду уравновешенный, медлительный и спокойный сварщик, обладающий высокой квалификацией, незаметно для себя будет ухудшать качество выполняемых действий, более медленно разбираться в чертежах, путать марки применяемых электродов и способы их применения. Работнику всё труднее будет проходить аттестацию для подтверждения разряда или присвоения квалификации. Искключительную тревожность вызывает факт обнаружения нарушений нервной системы у молодых и малостарожированных сварщиков.

Большинство современных исследований в области профпатологии, включая заболевания среди работников сварочных цехов, ориентировано в основном на статистический анализ уровня заболеваемости без синтеза прогностических и диагностических решающих правил.

Встречаются работы, посвящённые оценке риска возникновения профессиональных заболеваний без учёта преобладающих видов сварки, индивидуальных особенностей организма и сопутствующих экзогенных и эндогенных факторов риска.

Представленный в работах подход колоссально снижает потенциально до-

стижимые возможности по оказанию качественной медицинской помощи исследуемой категории пациентов.

Одним из действенных механизмов повышения качества медицинской помощи работникам, занятым в сварочном производстве, является надежное, точное и своевременное выявление факторов риска с анализом последствий их воздействий на организм человека с целью повышения эффективности профилактики и лечения профессиональных заболеваний исследуемой категории работников.

Методика решения аналогичных задач на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета показывает, что для повышения качества ведения пациентов синтез математических моделей прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики профессиональных заболеваний с учетом специфики сварочных процессов целесообразно производить на основе использования методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), достаточно подробно описанной в работах [7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15].

Данная работа посвящена использованию МСГНРП для решения задач прогнозирования и ранней диагностики профессионального нейротоксикоза работников сварочного производства.

## Материалы и методы

С математической точки зрения объектом исследования является структура признакового пространства, обес-

печивающего надежное прогнозирование и раннюю диагностику нейротоксикоза и модели взаимосвязи информативных признаков с исследуемыми классами состояний.

С медицинской точки зрения объектом исследования являются работники, занятые в сварочном производстве Курской области, с высокими рисками появления и развития профессиональных заболеваний и страдающие ими.

В ходе проводимых исследований с учётом мнений высококвалифицированных экспертов в качестве основных задач исследования были выбраны заболевания нервной системы, в частности нейротоксикоз, вызываемый выделением паров марганца.

В качестве базового математического аппарата выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, одним из основных элементов которых является функция принадлежности  $\mu_{\ell}^d(x_j)$  к исследуемым классам состояний  $\omega$  ( $\ell = 1, \dots, L$ ) с базовой переменной, в качестве которой могут использоваться информативные признаки  $(x_i)(j = 1, \dots, J)$ , комплексные показатели  $Y_r$ , определяемые через функциональные зависимости от  $x_j$ , комбинированные показатели  $Z_i$ , отражающие мультипликативное влияние вредных производственных факторов ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) на состояние здоровья и т. д. Верхний индекс  $d$  определяет тип решаемой задачи ( $d = \Pi$  – прогноз;  $d = P$  – ранняя диагностика;  $d = Д$  – дифференциальный диагноз и т. д.).

В соответствии с рекомендациями [16] для определения вклада вредных химических веществ в появление и развитие нейротоксикоза используется базовая переменная  $Z_{\ell i}$ , определяемая по формуле

$$Z_{\ell i} = f_{\ell i} \left( \frac{c_i}{c_{\Pi i}} \right) \cdot f_{\ell i}^*(t_i), \quad (1)$$

где  $c_{\Pi i}$  – предельно допустимые концентрации вредных веществ, выделяющихся в воздух при сварке и резке металлов  $ПА_i$  с идентификатором  $i$ ;  $c_i$  – средняя концентрация выделений за период наблюдения;  $t_i$  – время нахождения человека в контакте  $ПА_i$ ;  $f_{\ell i}(\cdot)$  – нормировочная функция степени влияния  $ПА$  с концентрацией  $c_i$  на появление и развитие заболеваний  $\omega_{\ell}$  с областью определения  $[0, \dots, 1]$ ;  $f_{\ell i}^*(\cdot)$  – нормировочная функция степени влияния времени воздействия  $ПА_i$  на появление и развитие патологии  $\omega_{\ell}$  с той же областью определения, что и  $f_{\ell i}(\cdot)$ .

Следует, что частная уверенность в возникновении и развитии профессиональных заболеваний определяется наборами функций принадлежности  $\omega_{\ell}^d(Z_{\ell i})$  ( $\ell = \Pi$  – профессиональный нейротоксикоз).

Уверенность  $UHR_{\Pi}^{\Pi}$  в прогнозе возникновения профессионального заболевания от факторов риска вредных химических веществ, находящихся в рабочих

зонах сварочных производств (производственные аэрозоли ПА), определяется нечеткой функцией:

$$UHR_{\Pi}^{\Pi} = Ag_{\Pi}^{\Pi}[\mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi})], \quad (2)$$

где  $Ag_{\Pi}^{\Pi}$  – агрегатор прогностических функций принадлежности для класса;  $\omega_{\Pi}; i = 1, 2, \dots$

Для первоначальной стадии профпатологии  $\omega_{\Pi}$

$$UHR_{\Pi}^P = Ag_{\Pi}^P[\mu_{\Pi}^P(Z_{\Pi_i})], \quad (3)$$

где  $Ag_{\Pi}^P$  – агрегатор диагностических функций принадлежности для класса  $\omega_{\Pi}$ .

В работах [17; 18; 19] в качестве агрегирующих функций предлагается выбрать модифицированную формулу Е. Шортлифа, тогда

$$UHR(q+1) = UHR(q) + \mu_{\Pi}^d(Z_{\Pi_{i+1}})[1 - UHR(q)], \quad (4)$$

где  $q$  – номер итерации  $UHR_{\Pi}^d(1) = \mu_{\Pi}^d(Z_{\Pi_1})$ .

Известно, что кроме промышленных аэрозолей на появление и развитие нейротоксикоза оказывает целый ряд существенных экзогенных и эндогенных факторов риска  $EFR_{\Pi}^d$  (способ сварки MMA/MIG/MAG/TIG, экология, эргономика, индивидуальные факторы риска), которые определяются в результате опросов, осмотров, лабораторных и инструментальных методов исследования.

Механизмы расчета  $EFR_{\Pi}^d$  для различных типов профессиональных заболеваний достаточно подробно описаны в работах [20; 21].

Совокупный учет составляющих  $UHR_{\Pi}^d$  и  $EFR_{\Pi}^d$  дает финальную нечеткую модель принятия решений вида

$$UF_{\Pi}^d = UHR_{\Pi}^d + EFR_{\Pi}^d - UHR_{\Pi}^d \cdot EFR_{\Pi}^d. \quad (5)$$

## Результаты и их обсуждение

На экспертном уровне было утверждено решение в качестве производственных факторов риска появления и развития нейротоксикозов выбрать фиброгенные пыль (концентрация  $C_1$ ) и марганцевый аэрозоль (концентрация

$C_2$ ), для которых функции  $f_{\Pi_i}\left(\frac{C_i}{C_{\Pi_i}}\right)$  и  $f_{\Pi_i}^*(t_i)$  модели (1) определяются следующими выражениями:

$$f_{\Pi_1}(C_1 / C_{\Pi_1}) = \begin{cases} 0,056 X_1^2, & \text{если } X_1 \leq 3, \\ 1 - 0,056(X_1 - 6)^2, & \text{если } 3 \leq X_1 < 6, \\ 1, & \text{если } X_1 \geq 6, \end{cases}$$

$$f_1^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 2, \\ 0,00255(t-2)^2, & \text{если } 2 \leq t < 16, \\ 1 - 0,00255(t-30)^2, & \text{если } 16 \leq X_1 < 30, \\ 1, & \text{если } t \geq 30, \end{cases}$$

$$f_{\Pi_2}(C_2 / C_{\Pi_2}) = \begin{cases} 0,03(X_2)^2, & \text{если } X_2 < 4, \\ 1 - 0,03(X_2 - 8)^2, & \text{если } 4 \leq X_1 < 8, \\ 1, & \text{если } X_2 \geq 8, \end{cases}$$

$$f_2^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 4; \\ 0,0022(t-4)^2, & \text{если } 4 \leq t < 19; \\ 1 - 0,0022(t-34)^2, & \text{если } 19 \leq X_1 < 34; \\ 1, & \text{если } t \geq 34, \end{cases}$$

где  $X_1 = C_1/C_{П1}$ ;  $X_2 = C_2/C_{П2}$ .

Функции принадлежности к классу  $\omega_{П}$  для выражения (2) определяются аналитическими выражениями вида:

$$\begin{aligned} \mu_{П}^{\Pi}(Z_{П1}) &= \\ &= \begin{cases} 0, & \text{если } Z_{П1} < 0,1, \\ 3,26(Z_{П1} - 0,1)^2, & \text{если } 0,1 \leq Z_{П1} < 0,45, \\ 0,8 - 3,26(Z_{П1} - 0,8)^2, & \text{если } 0,45 \leq Z_{П1} < 0,8, \\ 0,8, & \text{если } Z_{П1} \geq 0,8, \end{cases} \\ \mu_{П}^{\Pi}(Z_{П2}) &= \\ &= \begin{cases} 0, & \text{если } Z_{П2} < 0,2, \\ 2,04(Z_{П2} - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq Z_{П2} < 0,55, \\ 0,5 - 2,04(Z_{П2} - 0,9)^2, & \text{если } 0,55 \leq Z_{П2} < 0,9, \\ 0,5, & \text{если } Z_{П2} \geq 0,9. \end{cases} \end{aligned}$$

Применение функций  $\mu_{П}^{\Pi}(Z_{П1})$  и  $\mu_{П}^{\Pi}(Z_{П2})$  увеличивает уверенность в прогнозе появления и развития нейротоксикоза, поэтому уверенность в  $\omega_{П}$  по факторам риска химические вещества в промышленных аэрозолях сварочных производств (модель 4) определяется выражением

$$\begin{aligned} UHR_{П}^{\Pi} &= \mu_{П}^{\Pi}(Z_{П1}) + \mu_{П}^{\Pi}(Z_{П2}) - \\ &- \mu_{П}^{\Pi}(Z_{П1}) \cdot \mu_{П}^{\Pi}(Z_{П2}). \end{aligned} \quad (6)$$

Составляющая  $EFR_{П}^{\Pi}$  модель 5 определяется выражением

$$\begin{aligned} EFR_{П}^{\Pi}(p+1) &= EFR_{П}^{\Pi}(p) + \\ &+ \mu_{П}^{\Pi}(X_{p+1})[1 - EFR_{П}^{\Pi}], \end{aligned} \quad (7)$$

где функции принадлежности  $\mu_{П}^{\Pi}(X_{p+1})$  и данным опросов, осмотров и инструментальных исследованиям определяются выражениями, приведенными в работах [22; 23].

Финальная уверенность в прогнозе появления и развития нейротоксикоза  $UF_{П}^{\Pi}$  определяется выражением (5).

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что прогностическая уверенность модели (7) превышает величину 0,85 при делении на 2 класса – *заболеет* и *не заболеет нейротоксикозом*.

Для определения ранней стадии заболевания модель (5) конкретизируется выражением

$$\begin{aligned} UF_{П}^p(q+1) &= UF_{П}^p(q) + \\ &+ D_{П}^p(q+1)[1 - UF_{П}^p(q)], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $UF_{П}^p(1) = D_{П}^p(1) = \mu_{П}^p(ER_p)$ ;

$$D_{П}^p(2) = \mu_{П}^p(UF_{П}^{\Pi}); \quad D_{П}^p(3) = \mu_{П}^p(U_{01}^{\Pi}).$$

Функция принадлежности  $\mu_{П}^p(ER_p)$  определяется по величине энергетического разбаланса меридиана легкого по методике<sup>1</sup>, описанной в работах [24; 25; 26].

<sup>1</sup> Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и

классификация условий труда. Введ. 2005-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2005. 133 с.



Функция принадлежности  $\mu_{\Pi}^p(UF_{\Pi}^{\Pi})$  определяется по базовой переменной, вычисляемой по формуле (5).

Функция принадлежности  $\mu_{\Pi}^p(U_{01}^{\Pi})$  определяется по данным опросника, характеризующего наличие ранних стадий нейротоксикоза (мозговой крик, судороги, гипертермия, тахикардия, тремор).

Результаты математического моделирования и экспертного оценивания достаточно сильно зависят от субъективного экспертного мнения, что требуют объективизации с использованием статистического анализа на репрезентативных контрольных выборках. Объем этих выборок определялся по общепринятым рекомендациям и составил 100 человек на каждый из исследуемых классов состояний, что позволило обеспечить уровень вероятностной оценки не хуже 0,9. При контроле прогностических моделей профессиональных заболеваний работников сварочных цехов, расположенных в Курской области, было организовано наблюдение за состоянием здоровья этих работников в течение 5 лет начиная с 2017 г. В первый год исследований производилось измерение информативных признаков для задач прогноза появления и развития таких профессиональных заболеваний, как профессиональный нейротоксикоз (класс  $\omega_{\Pi}$ ), с расчётом показателей  $UF_{\Pi}^{\Pi}$ . В ходе анализа гистограмм распределения исследуемых классов состояний, построенных на объектах контрольной выборки по шкале  $UF_{\Pi}^{\Pi}$  экспертами, был выбран единый порог дифузификации на уровне 0,6. По этому порогу было отобрано 100 работ-

ников сварочных цехов, по которым модели «оставили» обследуемых в классе «здоровые», и 100 работников, которых модели «отнесли» к исследуемым классам заболеваний (класс  $\omega_{\Pi}$ ). После каждого года наблюдения фиксировалось количество заболевших и не заболевших обследуемых. В ходе проверки прогностических решающих правил производился расчет всех выбранных показателей качества.

Исторически сложилось, что воздействие на организм человека сварочных аэрозолей изучалось при воздействии массовой концентрации. Нормирование в воздухе сварочного аэрозоля производственных помещений производится по массе конкретных химических составляющих аэрозоля в воздухе: марганца, алюминия, хрома, кремния, никеля, титана и других, которые характеризуются по химическому составу сварочной проволоки и обмазки электродов. Предельно допустимые концентрации большинства компонентов сварочного аэрозоля в воздухе рабочей зоны укладываются в ряд от 0,3 (марганец) до 2 (кремний) мг/м<sup>3</sup>. Размер частиц сварочного аэрозоля и их количество в объеме вдыхаемого воздуха санитарными нормами не учитываются.

В результате проведенных исследований было установлено, что задачи прогнозирования и ранней диагностики нейротоксикозов относят к классу плохо формализуемых задач, которые следует решать, используя технологию мягких вычислений. Методика решения задач со схожей структурой данных в Юго-Западном государственном университете показывает, что удобно для выбранной в

работе задачи использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил. Используя представленную методологию, с учетом специфики вредных факторов риска сварочных производств в сочетании с другими экзогенными и эндогенными факторами риска были получены нечеткие математические модели, позволяющие решать поставленные в работе задачи с приемлемым для профпатологии качеством.

### Выводы

Особенностью марганцевой интоксикации является дальнейшее ее прогрессирование в течение многих лет после прекращения контакта с ним.

Проблемами хронических нейротоксикозов занимаются преимущественно профпатологи. Предлагаемые математические модели позволяют обеспечивать прогноз появления и развития нейротоксикоза с уверенностью не ниже 0,85, а определять раннюю стадию этой патологии с уверенностью не хуже 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты в практику врачей профпатологов.

Полученные математические модели следует использовать в медицинской практике как в виде программного обеспечения смартфонов и планшетных компьютеров, так и в составе мощных систем поддержки принятия решений, включая телемедицинские системы.

### Список литературы

1. Григоров И. Ю. Прогнозирование пневмокониозов у работников гальванических цехов // Горизонты биофармацевтики: сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической молодежной конференции. Курск: Курский государственный медицинский университет, 2019. С. 79–81.
2. Григоров И. Ю., Разумова К. В., Титов Д. В. Нечеткая оценка риска возникновения профессиональных заболеваний работников гальванических цехов // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы: сборник трудов XXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов / под общей редакцией В. И. Жулева. Рязань: ИП Коняхин А. В. (BookJet), 2019. С. 79–82.
3. Хрипина И. И., Серебровский А. В., Григоров И. Ю. Прогнозирование и ранняя диагностика вибрационной болезни на основе нечетких математических моделей // Избранные вопросы науки XXI века: сборник научных статей. М.: Перо, 2019. С. 96–98.
4. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Корневский, В. И. Серебровский, Н. А. Коптева, Т. Н. Говорухина. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. 231 с.
5. Прогнозирование и ранняя диагностика профессиональных заболеваний в электроэнергетике на основе методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил:

монография / В. И. Серебровский, М. А. Мясоедова, В. В. Серебровский, Н. А. Кореневский, К. В. Разумова. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2019. 285 с.

6. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве / А. В. Фролов, В. А. Лепихова, Н. В. Ляшенко, С. Л. Пушенко, Н. Н. Чибинев, А. С. Шевченко. Ростов н/Д: Феникс, 2009. 566 с.

7. Применение теории измерения латентных переменных для формирования пространства информативных признаков в задачах оценки функционального состояния человека / А. В. Бойцов, Л. П. Лазурина, С. Н. Кореневская, А. Н. Шуткин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 6 (57). С. 52–58.

8. Трушкова Е. А., Ладная Е. В. Особенности профессиональных заболеваний электросварщиков при выполнении сварочных работ на производстве // Молодой ученый. 2016. № 18.1 (122.1). С. 25–27.

9. Гадалов В. Н., Кореневский Н. А., Снопков В. Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 2. С. 515–521.

10. Рюмшин В. Ю., Чевычелов С. А. Исследование возможности применения активирующего флюса для повышения производительности аргонодуговой сварки жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ // Сварочное производство. 2022. № 9. С. 45–49.

11. Глебова Е. В. Производственная санитария и гигиена труда. М.: Высшая школа, 2005. 382 с.

12. Кореневский Н. А., Буняев В. В., Яцун С. М. Компьютерные системы ранней диагностики состояния организма методами рефлексологии: монография. Новочеркасск: Издательство Южно-Российского государственного политехнического университета, 2003. 206 с.

13. Модуль регистрации электрических характеристик биологически активных точек для экспертной системы врача рефлексотерапевта / Н. А. Кореневский, Р. А. Крупчатников, И. А. Ключиков, И. И. Хрипина // Известия Юго-Западного университета. 2014. № 5 (56). С. 81–88.

14. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интеллектуальные технологии в рефлексодиагностике и рефлексотерапии: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

15. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

16. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33–35.
17. Кореневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.
18. Кореневский 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.
19. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–39.
20. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.
21. Метод синтеза нечетких моделей принятия решений по оценке состояния и управлению биотехническими системами / Н. А. Кореневский, В. В. Серебровский, К. В. Разумова, И. И. Хрипина // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 68–74.
22. Кореневский Н. А., Григоров И. Ю., Разумова К. В. Математические модели прогнозирования возникновения и развития бронхиальной астмы у работников гальванических цехов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей по итогам VI Международной научной конференции. М.: Конверт, 2019. С. 61–63.
23. Кореневский 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.
24. Кореневский Н. А., Хрипина И. И., Лазурина Л. П. Нечеткие коллективные классификаторы для оценки состояния живых систем // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов XII Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2015. С. 172–174.
25. Использование технологии мягких вычислений для прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса: монография / Н. А. Кореневский, В. И. Серебровский, Р. В. Степашов, Т. Н. Говорухина. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2016. 224 с.
26. Шуткин А. Н., Кореневская С. Н., Федянин В. В. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких правил // Информационные проекты в медицине и педагогике: материалы Международной научно-практической конференции. М.: ИП Киселева О. В., 2014. С. 61–64.

## Reference

1. Grigorov I. Yu. [Prognozirovanie pnevmokoniozov u rabotnikov gal'vanicheskikh tsekhov]. *Gorizonty biofarmatsevtiki. Sbornik nauchnykh trudov po materialam V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi molodezhnoi konferentsii* [Horizons of biopharmaceutics: collection of scientific papers based on the materials of the V International Scientific and Practical Youth Conference]. Kursk, Kursk State Medical University Publ., 2019, pp. 79–81. (In Russ.)
2. Grigorov I. Yu., Razumova K. V., Titov D. V. [Fuzzy assessment of the risk of occupational diseases of workers of electroplating workshops]. *Biotekhnicheskie, meditsinskie i ekologicheskie sistemy, izmeritel'nye ustroistva i robototekhnicheskie komplekсы. Sbornik trudov XXXII Vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [Biotech, medical and environmental systems, measuring devices and robotic complexes. Proceedings of the XXXIII All-Russian Scientific and Technical Conference of students, young scientists and specialists]; ed. by V. I. Zhuleva. Ryazan', IP Konyakhin A. V. (BookJet), 2019, pp. 79–82. (In Russ.)
3. Khripina I. I., Serebrovskii A. V., Grigorov I. Yu. [Prediction and early diagnosis of vibration disease based on fuzzy mathematical models]. *Izbrannye voprosy nauki XXI veka. Sbornik nauchnykh statei* [Selected issues of science of the XXI century. Collection of scientific articles]. Moscow, Pero Publ., 2019. pp. 96–98. (In Russ.)
4. Korenevskii N. A., Serebrovskii V. I., Kopteva N. A., Govorukhina T. N. Prognozirovanie i diagnostika zabolevani, vyzyvaemykh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennykh modelei [Prediction and diagnosis of diseases caused by harmful industrial and environmental factors based on heterogeneous models]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2012. 231 p.
5. Serebrovskii V. I., Myasoedova M. A., Serebrovskii V. V., Korenevskii N. A., Razumova K. V. Prognozirovanie i rannaya diagnostika professional'nykh zabolevani v elektroenergetike na osnove metodologii sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil. [Forecasting and early diagnosis of occupational diseases in the electric power industry based on the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2019. 285 p.
6. Frolov A. V., Lepikhova V. A., Lyashenko N. V., Pushenko S. L., Chibinev N. N., Shevchenko A. S. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti i okhrana truda v stroitel'stve [Life safety and labor protection in construction]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2009. 566 p.
7. Boitsov A. V., Lazurina L. P., Korenevskaya S. N., Shutkin A. N. Primenenie teorii izmereniya latentnykh peremennykh dlya formirovaniya prostranstva informativnykh priznakov v zadachakh otsenki funktsional'nogo sostoyaniya cheloveka [Application of the theory of measurement of latent variables for the formation of the space of informative features in the tasks of assessing the functional state of a person]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo*

universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2014, no. 6 (57), pp. 52–58.

8. Trushkova E. A., Ladnaya E. V. Osobennosti professional'nykh zabolevaniy elektrosvarshchikov pri vypolnenii svarochnykh rabot na produktsii [Features of occupational diseases of electric welders when performing welding work in production]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2016, no. 18.1 (122.1), pp. 25–27.

9. Gadlov V. N., Korenevskii N. A., Snopkov V. N. Matematicheskie modeli reflektornykh sistem organizma cheloveka i ikh ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevaniy [Mathematical models of reflex systems of the human body and their use for the prediction and diagnosis of diseases]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521.

10. Ryumshin V. Yu., Chevychelov S. A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya aktiviruyushchego flyusa dlya povysheniya proizvoditel'nosti argonodugovoi svarki zharo-prochnogo nikelovogo splava KhN60VT [Investigation of the possibility of using an activating flux to increase the productivity of argon arc welding of heat-resistant nickel alloy HN60W]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2022, no. 9, pp. 45–49.

11. Glebova E. V. Proizvodstvennaya sanitariya i gigiena truda [Industrial sanitation and occupational hygiene]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 382 p.

12. Korenevskii N. A., Bunyaev V. V., Yatsun S. M. Komp'yuternye sistemy rannei diagnostiki sostoyaniya organizma metodami refleksologii [Computer systems for early diagnosis of the state of the body by reflexology methods]. Novocherkassk, South Russian State Polytechnic University Publ., 2003. 206 p.

13. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A., Klyuchikov I. A., Khripina I. I. Modul' registratsii elektricheskikh kharakteristik biologicheskii aktivnykh toчек dlya ekspertnoi sistemy vracha refleksoterapevta [Module for registration of electrical characteristics of biologically active points for the expert system of a reflexologist]. *Izvetiya Yugo-Zapadnogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2014, no. 5 (56), pp. 81–88.

14. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A. Infomatsionno-intelektual'nye tekhnologii v refleksodiagnostike i refleksoterapii [Information and intellectual technologies in reflexology and reflexotherapy]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p.

15. Korenevskii N. A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analyzing and controlling the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series:*

*Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 99–103.

16. Korenevskii N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem [Using fuzzy logic of decision-making for medical expert systems]. *Meditsinskaya Tekhnika = Medical Equipment*, 2015, no. 1, pp. 33–35.

17. Korenevskii N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenii na nechetkikh setevykh modelyakh v zadachakh meditsinskoi diagnostiki i prognozirovaniya [Designing decision-making systems based on fuzzy network models in the tasks of medical diagnostics and forecasting]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2006, no. 6, pp. 25–31.

18. Korenevskii N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

19. Korenevskii N. A., Razumova K. V. Sintez kolektivov gibridnykh nechetkikh modelei otsenki sostoyaniya slozhnykh sistem [Synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = Hightech Technologies*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–39.

20. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A., Al'-Kasasbekh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkikh setevykh modelei [Theoretical foundations of acupuncture biophysics with applications in medicine, psychology and ecology based on fuzzy network models]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p.

21. Korenevskii N. A., Serebrovskii V. V., Razumova K. V., Khripina I. I. Metod sinteza nechetkikh modelei prinyatiya reshenii po otsenke sostoyaniya i upravleniyu biotekhnicheskimi sistemami [The method of synthesis of fuzzy decision-making models for assessing the state and management of biotechnical systems]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 9, pp. 68–74.

22. Korenevskii N. A., Grigorov I. Yu., Razumova K. V. [Mathematical models for predicting the occurrence and development of bronchial asthma in workers of electroplating workshops]. *Peredovye innovatsionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovaniya, problemy vnedreniya v proizvodstvo. Sbornik nauchnykh statei po itogam VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of introduction into production: collection of scientific articles on the results of the VI International Scientific Conference]. Moscow, Konvert Publ., 2019, pp. 61–63. (In Russ.)

23. Korenevskii N. A., Shutkin A. N., Boitsova E. A. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelei G. Rasha [Assessment and management of the state of health based on G. Rasha models]. *Meditsinskaya Tekhnika = Medical Equipment*, 2015, no. 6, pp. 37–40.

24. Korenevskii N. A., Khripina I. I., Lazurina L. P. [Fuzzy collective classifiers for assessing the state of living systems]. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenii i simvol'noi informatsii. Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Optoelectronic devices and devices in image recognition systems, image processing and symbolic information. Collection of materials of the XII International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2015, pp. 172–174. (In Russ.)

25. Korenevskii N. A., Serebrovskii V. I., Stepashov R. V., Govorukhina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkikh vychislenii dlya prognozirovaniya i dia-gnostiki professional'nykh zabolevanii rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa [The use of soft computing technology for forecasting and diagnostics of occupational diseases of workers of the agro-industrial complex]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2016. 224 p.

26. Shutkin A. N., Korenevskaya S. N., Fedyanin V. V. [Designing knowledge bases of medical expert systems using teams of fuzzy rules]. *Informatsionnye proekty v meditsine i pedagogike. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Information projects in medicine and pedagogy. Materials of the International scientific and practical conference]. Moscow, Kiseleva O. V. Publ., 2014, pp. 61–64. (In Russ.)

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Григоров Игорь Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6207-8194

**Igor Yu. Grigorov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6207-8194

**Будневский Андрей Валериевич**, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой факультетской терапии, проректор по научно-инновационной деятельности, Воронежский государственный университет им. Н. Н. Бурденко Минздрава России, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: avbudnevski@vrngmu.ru, ORCID: 0000-0002-1171-2746

**Andrei V. Budnevsky**, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Head of the Department of Faculty Therapy, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities Voronezh State University named after N. N. Burdenko Ministry of Health of Russia, Voronezh, Russian Federation, e-mail: avbudnevski@vrngmu.ru, ORCHID: 0000-0002-1171-2746



## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-177-191>

## Модель обработки информации в коэффициентной обратной задаче для алгебраического многочлена

А. П. Локтионов<sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: loara@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования** заключается в разработке модели описания и оценки эффективности решения коэффициентной обратной задачи анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене с заданными коэффициентами членов младших степеней в условиях влияния погрешности входных данных на точность решения.

**Методы.** В качестве базового математического аппарата используется методология решения обратных задач с приближением функций интерполяционным полиномом Лагранжа. В условиях равномерной непрерывной нормы погрешности входных данных при оценке эффективности решения коэффициентной обратной задачи предлагается использовать минимальное значение целевой функции в виде минимума функции Лебега. При выводе явных формул оптимального плана координат узлов сетки аппроксимации предлагается применить альтернативную характеристику экстремального полинома.

**Результаты.** В качестве базовых элементов математической модели анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене в решении коэффициентной обратной задачи использованы интерполяционные полиномы Лагранжа с числовой оценкой эффективности решения по значению минимума функции Лебега при оптимальном плане координат узлов сетки аппроксимации.

**Заключение.** В ходе проводимых исследований решалась задача разработки модели описания и оценки эффективности решения коэффициентной обратной задачи анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене с частично заданными коэффициентами членов младших степеней и с влиянием погрешности входных данных на точность решения. Показано, что для количественной оценки эффективности решения задачи следует использовать значение целевой функции в виде минимума функции Лебега с вычислением коэффициентов приближенного многочлена интерполяционным полиномом Лагранжа. Для повышения точности распределения координат узлов сетки аппроксимации получены явные формулы оптимального плана координат путем построения экстремального полинома степени, равной степени исследуемого алгебраического многочлена, с числом точек чебышёвского альтернанса, совпадающим со степенью полинома.

**Ключевые слова:** целевая функция; обратная задача; интерполяционный полином Лагранжа; функция Лебега; экстремальные свойства полиномов.

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

**Для цитирования:** Локтионов А. П. Модель обработки информации в коэффициентной обратной задаче для алгебраического многочлена // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 177–191. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-177-191>.

Поступила в редакцию 11.10.2022

Подписана в печать 05.11.2022

Опубликована 22.12.2022

© Локтионов А. П., 2022

# Information Processing Model in the Coefficient Inverse Problem for an Algebraic Polynomial

Askold P. Loktionov<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: loapa@mail.ru

## Abstract

**The purpose of research** is to develop a model for describing and evaluating the effectiveness of solving the coefficient inverse problem of analyzing and processing information about an algebraic polynomial with given coefficients of terms of lower degrees under the influence of input data error on the solution efficiency.

**Methods.** As a basic mathematical apparatus, the methodology for solving inverse problems with the approximation of functions by the Lagrange interpolation polynomial is used. Under the conditions of a uniform continuous error rate of the input data, when evaluating the efficiency of solving the coefficient inverse problem, it is proposed to use the minimum value of the objective function in the form of the minimum of the Lebesgue function. When deriving explicit formulas for the optimal plan of coordinates of the nodes of the approximation grid, it is proposed to apply the alternance characteristic of the extremal polynomial.

**Results.** As the basic elements of a mathematical model for analyzing and processing information about an algebraic polynomial in solving a coefficient inverse problem, Lagrange interpolation polynomials were used with a numerical estimate of the solution efficiency by the value of the minimum of the Lebesgue function.

**Conclusion.** In the course of the research, we solved the problem of developing a model for describing and evaluating the efficiency of the coefficient inverse problem of analyzing and processing information about an algebraic polynomial with given coefficients of terms of lower degrees and with the influence of the input data error on the accuracy of the solution. It is shown that to quantify the effectiveness of solving the problem, one should use the value of the objective function in the form of the minimum of the Lebesgue function, and to calculate the coefficients of the approximate polynomial, use the Lagrange interpolation polynomial.

**Keywords:** target function; inverse problem; Lagrange interpolation polynomial; Lebesgue function; extremal properties of polynomials.

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

**For citation:** Loktionov A. P. Information Processing Model in the Coefficient Inverse Problem for an Algebraic Polynomial. *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(4): 177–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-177-191>.

Received 11.10.2022

Accepted 05.11.2022

Published 22.12.2022

## Введение

Восстановление коэффициентов алгебраического многочлена относится к обратным задачам, типичным для задач математической физики, механики [1; 2; 3].

Задача вычисления коэффициентов многочлена некорректна, неустойчива из-за нарушения требований непрерывной зависимости решения от значений входных данных. Ограничение на конеч-

ность измерений и целесообразность вычисления конечного числа неизвестных параметров приводят к дискретной форме обратных задач. В аналитическо-экспериментальных обратных задачах, в том числе по разработке модели описания и оценки эффективности решения коэффициентной обратной задачи анализа и обработки входной информации об алгебраическом многочлене, выполнены исследования по влиянию объема и чувствительности решения задачи к зашумленным входным данным, по редукции измерений и обусловленности задачи, когда малые зашумления входных данных могут вызвать большое возмущение решения [1; 2; 4; 5; 6; 7; 8; 9]. При обсуждении современных методов регуляризации решения математически некорректных задач отмечается, что в качестве параметра регуляризации часто выступает характеристика распределения узлов сетки, например шаг сетки [1; 10]. Из анализа работ, посвященных различным методам исследования обратных задач, следует отметить обсуждение современного состояния построения алгоритмов функциональной и параметрической оптимизации решения и оценки качества алгоритмов [1; 5; 8; 10].

Для определения коэффициентов многочлена используют различные способы приближения, в том числе полиномиальный интерполянт с матрицей Вандермонда, интерполяционные многочлены Ньютона и Лагранжа, численное дифференцирование интерполяционных

формул [4; 11; 12; 13; 14; 15; 16]. Из анализа работ, посвященных методам исследования качественного поведения интерполяционных формул, оценки эффективности решения, следует отметить содержательный и общий метод оценки погрешности интерполяции использованием в целевой функции констант и функций Лебега [17; 18; 19], использующий в задачах Е. И. Золотарёва, в системах П. Л. Чебышёва [20; 21; 22; 23; 24] экстремальные свойства полиномов и приводящий к альтернансной характеристике распределения узлов сетки аппроксимации с использованием экстремальных свойств полиномов [4; 5; 11; 12; 14; 21; 23].

В коэффициентных обратных задачах часть коэффициентов может быть задана [20; 25]. Опираясь на отмеченные результаты последних лет, необходимо продолжить исследования коэффициентных обратных задач для алгебраического многочлена при частично заданных коэффициентах, в частности у младших членов, которые родственны задачам с заданными старшими коэффициентами, например первой и второй задачам Е. И. Золотарёва, фильтровой задаче [20; 21; 26]. Целью работы является разработка модели описания и оценки эффективности решения коэффициентной обратной задачи анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене с заданными коэффициентами членов младших степеней в условиях влияния погрешности входных данных на точность решения. Предлагаемый в

данной статье подход к исследованию приближением Лагранжа алгебраическом многочлена с заданным (предписанным) коэффициентом второго младшего члена развивает альтернативную характеристику решения задачи специально подобранным распределением узлов сетки.

## Материалы и методы

### Модель описания коэффициентной обратной задачи анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене

Пусть  $n \geq 2$  – целое число и

$$P(a, x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n \quad (a_0 \neq 0) \quad (1)$$

является алгебраическим многочленом степени  $n$  с заданным (предписанным) коэффициентом  $a_{n-1}$ . Для многочлена (1) решаем коэффициентную обратную задачу с математической моделью:

$$0 \leq x_1 < x_2 < \dots < x_{N-1} < x_N \leq l, \quad N = n, \quad (2)$$

$$R[P(a, x_i)] = P^*(a, x_i) - P(a, x_i), \quad (3)$$

$$P^*(a, x) = a_0^* x^n + a_1^* x^{n-1} + \dots + a_{n-2}^* x^2 + a_{n-1}^* x + a_n^*, \quad (4)$$

$$a_{n-r}^* = \sum_{i=1}^n l_{n,r,i} [P^*(a, x_i) - a_{n-1} x_i], \quad r \in (2, 3, \dots, n), \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n l_{n,r,i} x_i^j = \begin{cases} 0 & \text{при } j \neq r \\ 1 & \text{при } j = r \end{cases}, \quad j = 2 : n, \quad r \in (2, \dots, n), \quad (6)$$

$$\Delta_{\max}[a_{n-r}] \leq \alpha_{n,r}(X) \cdot \sup \Delta_{\max}[P(a, x_i)], \quad (7)$$

$$\lambda_{n,r}(X) = \sum_{i=1}^n |l_{n,r,i}| \rightarrow \min. \quad (8)$$

Здесь на отрезке  $[0, 1]$  задана таблица значений  $P^*(a, x_i)$ ,  $i \in (1, \dots, n)$  многочлена (1) в  $N$  узлах сетки аппроксимации (2). Считаем входные данные значений  $P^*(a, x_i)$  многочлена полученными датчиками при измерениях или в результате расчетов на ЭВМ. Каждое из зашумленных входных данных  $P^*(a, x_i)$  содержит погрешность (3) [1; 10]. Решение задачи: вычисление коэффициентов  $a_{n-r}^*$  приближенного многочлена (4) будем получать с помощью интерполяционного полинома Лагранжа (5), в котором формулы множителей Лагранжа  $l_{n,r,i}$  получим решением системы уравнений (6) методом неопределенных коэффициентов. Для значений входных данных  $P^*(a, x_i)$  на точечном множестве  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  в (2) используем равномерную непрерывную норму погрешности. Уровень погрешности вычисления коэффициентов  $a_{n-r}$  и эффективность решения коэффициентной обратной задачи анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене (1) будем оценивать, используя абсолютное число обусловленности задачи  $\alpha_{n,r}(X)$ , связывающее верхние границы абсолютной погрешности решения  $\Delta_{\max}[a_{n-r}]$  и датчиков  $\Delta_{\max}[P(a, x_i)]$  по аналогии с оценкой [4, с. 58], неравенством (7).

На качество приближения Лагранжа сильное влияние оказывает степень многочлена, количество и расположение узлов сетки (2). Снижение влияния погрешности датчиков на погрешность вычисляемых коэффициентов многочлена (1) получим оптимизацией сетки аппроксимации.

*Определение.* Целевая функция в задаче восстановления коэффициентов многочлена (1) по входным данным  $P^*(a, x_i)$  с погрешностью (3) по (8) имеет вид

$$\lambda_{n,r}(X) = \sum_{i=1}^n |l_{n,r,i}| \quad (9)$$

функции Лебега, а параметром регуляризации применимо распределение узлов сетки аппроксимации (2).

Функция (9) является аналогом функции Лебега в [18, с. 59] с тем отличием, что число узлов аппроксимации в (9) меньше на единицу.

Функция (8) может быть реализована прямым аналитическим методом разыскания через частные производные безусловного экстремума (минимума) функции (9) – целевого параметра:

$$\lambda_{n,r,\min} = \min \lambda_{n,r}(X). \quad (10)$$

### Применение чебышёвского альтернанса при выводе формул оптимального плана координат узлов сетки аппроксимации

При выводе явных формул оптимального плана координат узлов сетки аппроксимации с увеличением значений  $n$  и  $r$  все сложнее функцию (9) дифференцировать с преобразованием диффе-

ренциалов относительно каждой координаты узлов в уравнения степени, менее пятой, трудно решать получаемое уравнение с учетом теоремы Абеля о неразрешимости уравнений в радикалах для уравнений пятой и более высоких степеней. В качестве альтернативы дифференцированию функции (9) рассмотрим альтернативную характеристику распределения узлов сетки аппроксимации с использованием экстремальных свойств полиномов.

Пусть на вещественной оси ставим экстремальную задачу: реализовать алгебраический полином

$$L_n(z, u) = z_0 + z_1 u + z_2 u^2 + \dots + z_{n-1} u^{n-1} + z_n u^n$$

степени  $n \geq 2$  при ограничениях

$$|L_n(z, u)| \leq 1 \text{ при } u \in (-1, 1),$$

$$L_n(z, -1) = (-1)^{n-1}, L_n(z, 1) = 1. \quad (11)$$

Будем исследовать свойства полиномов  $L_n(z, u)$  и их вид в зависимости от степени  $n$  полинома и их связь с решением коэффициентной задачи для многочлена (1).

Полином  $L_n(z, u)$  при ограничениях (11) имеет тесную связь с полиномом Чебышёва первого рода, представимого на  $[-1, 1]$  в виде  $T_n(t) = \cos(n \arccos t)$ . Отметим, что корни полинома Чебышёва

$$t_{n,k,i} = -\cos \frac{(2i-1)\pi}{2n}, \quad i \in 1:n \quad (12)$$

расположены на  $[-1, 1]$  по возрастанию от

$$t_{n,k,1} = -\cos(\pi/2n) \quad (13)$$

до  $t_{n,k,n} = \cos(\pi/2n)$ . Полином Чебышёва имеет  $(n+1)$ -точечный альтернанс, а именно принимает значения  $(-1)^{n-i-1}$  в точках

$$t_{n,m,i} = -\cos\left(\pi \frac{i-1}{n}\right), \quad i \in 1:n+1, \quad (14)$$

расположенных на  $[-1, 1]$  по возрастанию от  $t_{n,m,1} = -1$  до  $t_{n,m,n+1} = 1$ .

Решение задачи реализации полинома  $L_n(z,u)$  допускает представление  $L_n(z,u) = T_n[t(u)]$  сложной функцией

$$L_n(u) = \cos(n \arccos t(u)) \quad (15)$$

от вспомогательной переменной

$$t = u \cos^2 \frac{\pi}{2n} + \sin^2 \frac{\pi}{2n}. \quad (16)$$

Будем использовать методологию получения альтернансной характеристики (14) полинома Чебышёва применительно к решению коэффициентной задачи для многочлена (1).

### Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведены результаты вывода формул множителей Лагранжа  $l_{n,r,i}$  с использованием математической модели (1) – (8).

**Таблица 1.** Формулы множителей Лагранжа  $l_{n,r,i}$

**Table 1.** Formulas of Lagrange multipliers  $l_{n,r,i}$

n	r	i	Множители Лагранжа $l_{n,r,i}$	Вспомогательные переменные в формулах множителей Лагранжа
2	2	1	$1/(x_1^2 - x_2^2)$	$\begin{aligned} \gamma_1 &= (x_1 - x_2)(x_1 - x_3)(x_3 - x_2)(x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_3 x_2), \\ \gamma_2 &= [(x_3^4 - x_4^4)\gamma_{11} - (x_3^3 - x_4^3)\gamma_{12}] / \gamma_{13}, \\ \gamma_3 &= -[(x_3^3 - x_4^3) + \gamma_2 \gamma_{14}] / \gamma_{11}, \\ \gamma_4 &= [1 - (x_1^2 - x_4^2)\gamma_2 - (x_2^2 - x_4^2)\gamma_3] / (x_3^2 - x_4^2), \\ \gamma_5 &= (x_3^2 - x_4^2)\gamma_{12} / \gamma_{13}, \\ \gamma_6 &= -(x_3^2 - x_4^2)\gamma_{15} / \gamma_{13}, \\ \gamma_7 &= (x_3^2 - x_4^2)[(x_2^2 - x_4^2)(x_1^4 - x_4^4) - (x_1^2 - x_4^2)(x_2^4 - x_4^4)] / \gamma_{13}, \\ \gamma_8 &= (x_3^2 - x_4^2)[(x_2^3 - x_4^3)(x_3^2 - x_4^2) - (x_2^2 - x_4^2)(x_3^3 - x_4^3)] / \gamma_{13}, \\ \gamma_9 &= (x_3^2 - x_4^2)[(x_1^2 - x_4^2)(x_3^3 - x_4^3) - (x_1^3 - x_4^3)(x_2^2 - x_4^2)] / \gamma_{13}, \\ \gamma_{10} &= -[(x_1^2 - x_4^2)\gamma_8 + (x_2^2 - x_4^2)\gamma_9] / \gamma_{13}, \end{aligned}$
		2	$1/(x_2^2 - x_1^2)$	
3	2	1	$(x_2^3 - x_3^3) / \gamma_1$	
		2	$(x_3^3 - x_1^3) / \gamma_1$	
		3	$(x_1^3 - x_2^3) / \gamma_1$	
	3	1	$(x_3^2 - x_2^2) / \gamma_1$	
		2	$(x_1^2 - x_3^2) / \gamma_1$	
		3	$(x_2^2 - x_1^2) / \gamma_1$	
4	2	1	$\gamma_2$	
		2	$\gamma_3$	
		3	$\gamma_4$	
		4	$-\gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4$	
	3	1	$\gamma_5$	
		2	$\gamma_6$	
		3	$\gamma_7$	
		4	$-\gamma_5 - \gamma_6 - \gamma_7$	
	4	1	$\gamma_8$	
		2	$\gamma_9$	
		3	$\gamma_{10}$	
		4	$-\gamma_8 - \gamma_9 - \gamma_{10}$	

Результат решения уравнения (10) при  $n \in (2, 3)$  – формулы оптимального плана координат узлов сетки аппроксимации  $x_{n,o,i}$ , а также численные значения безразмерных координат  $x_{n,o,i,l} = x_{n,o,i}/l$  и формулы в радикалах  $f(i) = x_{n,o,i,l}$  (табл. 2).

**Таблица 2.** Оптимальные планы координат узлов сетки аппроксимации  $x_{n,o,i,l}$  при  $x_{n,o,1,l} = 0$ ,  $x_{n,o,n,l} = 1$ ,  $n = 2, 3, 4$

**Table 2.** Optimal plans for the coordinates of the grid nodes of the approximation  $x_{n,o,i,l}$  for  $x_{n,o,1,l} = 0$ ,  $x_{n,o,n,l} = 1$ ,  $n = 2, 3, 4$

$n$	3	4	
$i$	2	2	3
Численные значения координат	0,6667	0,4142	0,8284
$f(i)$ в радикалах	$2/3$	$-1 + \sqrt{2}$	$-2 + 2\sqrt{2}$

По применению чебышёвского альтернанса получены следующие результаты.

*Утверждение 1.* Полиномы  $\Pi_n(u)$  – полиномы

$$\Pi_n(u) = 2^{n-1} \cos^{2n} \frac{\pi}{2n} \prod_{i=0}^{n-1} (u - u_{n,k,i})$$

со старшим коэффициентом  $z_n = 2^{n-1} \cos^{2n}(\pi/2n)$  и с расположенными на отрезке  $[-1, 1]$   $n$  действительными корнями:

$$u_{n,k,i} = -\cos \frac{(2i-1)\pi}{2n} \Big/ \cos^2 \frac{\pi}{2n} - \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2n}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (17)$$

Максимум и минимум  $\Pi_n(u)$  на отрезке  $[-1, 1]$  достигаются в точках

$$u_{n,m,i} = -\cos \frac{i\pi}{n} \Big/ \cos^2 \frac{\pi}{2n} - \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2n}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

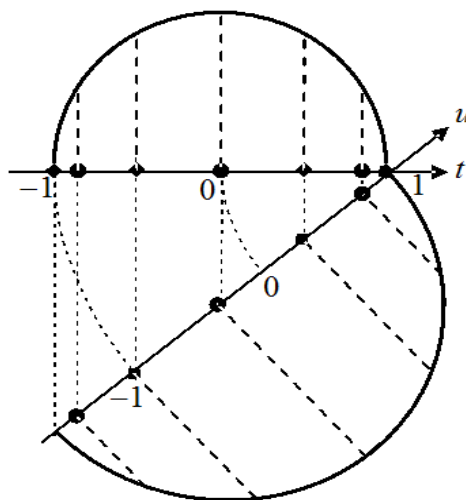
причем

При  $n = 4$  в силу сложности вывода частных производных функции (8) – получения промежуточного результата вида дроби из функций восьмой и десятой степени – значения оптимальных координат  $x_{4,o,i,l}$  получены численным способом (табл. 2).

$$\Pi_n(u_{n,m,i}) = (-1)^{n+i}. \quad (19)$$

Свойства (18) и (19) характеризуют альтернансность полинома (15).

На рисунке 1 на частном примере многочленов третьей степени указано, что преобразование координат корней и точек экстремума многочлена  $T_n(t)$  в соответствующие координаты многочлена  $\Pi_n(u)$  имеет геометрическую интерпретацию.

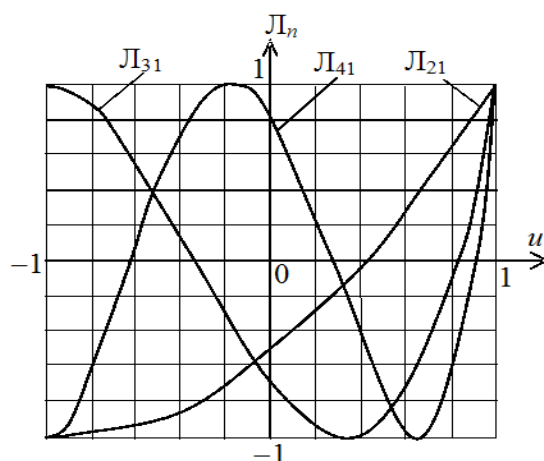


**Рис. 1.** Корни и точки экстремума многочленов  $T_3(t)$  и  $P_3(u)$

**Fig. 1.** Roots and extremum points of the polynomials  $T_3(t)$  and  $\Pi_3(u)$

В верхней части рисунка 1 представлены построенные по методике [4, с. 152] корни (12) и точки экстремума (14) многочлена  $T_3(t)$ , а в нижней части – корни (17) и точки экстремума (18) многочлена  $\Pi_3(u)$ . Корни многочленов помечены кружочками, точки экстремума помечены ромбиками.

На рисунке 2 показаны графики предложенных многочленов  $\Pi_n(u)$  для  $n = 2, 3, 4$ .



**Рис. 2.** Многочлены  $\Pi_n(u)$  для  $n = 2, 3, 4$

**Fig. 2.** Polynomials  $\Pi_n(u)$  for  $n = 2, 3, 4$

На отрезке  $[-1, 1]$  корни полинома (17) расположены по возрастанию от

$$u_{n,k,1} = -\cos \frac{3\pi}{2n} / \cos^2 \frac{\pi}{2n} - \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2n}$$

до

$$u_{n,k,n-1} = \sec \frac{\pi}{2n} - \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2n},$$

а точки (18) от  $u_{n,m,1} = -1$  до  $u_{n,m,n} = 1$ .

Полином  $\Pi_n(u)$  в дополнение к корням (17) имеет действительный корень

$$u_{n,k,n-1} = -\sec \frac{\pi}{2n} - \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2n} < -1.$$

С учетом формулы (13) из связи переменных  $t$  и  $u$  (16) получаем

$$u = \frac{2t-1-t_{n,m,2}}{1-t_{n,m,2}}. \quad (20)$$

Выражение (20) для аргумента  $u$  в формуле (15) совпадает с выражением для аргумента полинома степени  $n$  с  $n$ -точечным альтернансом в анализе В. Н. Мало-зёмова [23, с. 263] с заменой параметра  $t_{n,m,2} > -1$  на параметр  $\alpha < -1$ .

Для полиномов  $\Pi_n(u)$  справедлива рекуррентная формула

$$\Pi_{n+1}(u) = 2t\Pi_n(u) - \Pi_{n-1}(u).$$

Используя известные явные формулы для многочленов Чебышёва  $T_n(t)$  и представление вспомогательной переменной (16), получаем явные формулы для многочленов  $\Pi_n(z, u)$ , отвечающие условиям утверждения 1. Например, при  $n = 2$  используем формулу  $T_2(t) = 2t^2 - 1$  и получаем

$$\Pi_2(u) = -\frac{1}{2} + u + \frac{1}{2}u^2.$$

**Утверждение 2.** Узлы сетки аппроксимации (2) по критерию оптимизации (8) представимы координатами

$$x_{n,o,i} = \frac{u_{n,m,i} + 1}{2}l, \quad i = 1:N$$

перенесением с отрезка  $[-1, 1]$  на отрезок  $[0, 1]$  координат точек (13)  $n$ -точечного альтернанса полиномов  $\Pi_n(u)$  линейной заменой



$$x = \frac{u+1}{2}l, \quad u \in [-1, 1].$$

Доказательство утверждения 2 основано на методе математической индукции.

Утверждение 2 дает альтернативную характеристику решения коэффициентной задачи для многочлена (1). Применением чебышёвского альтернанса в распределении узлов сетки аппроксимации с использованием формул (18) и (19) получены все представленные в таблице 2 численные значения и явные формулы в радикалах оптимальных координат

узлов сетки аппроксимации. Совпадение этих результатов с результатами, полученными по критерию (8), доказывает утверждения 1 и 2.

В таблице 3 приведены результаты вычисления значений безразмерных множителей Лагранжа  $l_{n,r,i,l} = l^r \cdot l_{n,r,i}$  при оптимальных планах координат  $x_{n,o,i,l}$  узлов сетки аппроксимации, полученные по формулам множителей Лагранжа в таблице 1 с подстановкой взамен координат  $x_i$  значений координат  $x_{n,o,i,l}$  из таблице 2, а также значения безразмерного целевого параметра  $A_{n,r,\min} = l^r \cdot \lambda_{n,r,\min}$  при  $r \in (2, 3, \dots, n)$ .

**Таблица 3.** Исследование множителей Лагранжа  $l_{n,r,i,l}$  и целевого параметра  $A_{n,r,\min}$  при оптимальных планах координат узлов сетки аппроксимации  $x_{n,o,i,l}$

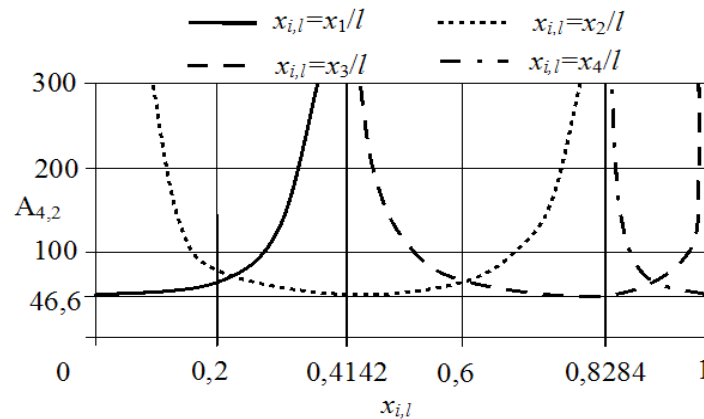
**Table 3.** Study of the Lagrange multipliers  $l_{n,r,i,l}$  and the target parameter  $A_{n,r,\min}$  for the optimal coordinate plans of the grid nodes of the approximation  $x_{n,o,i,l}$

$n$	$r$	Значения безразмерных множителей Лагранжа $l_{n,r,i,l}$				Значения целевого параметра $A_{n,r,\min}$
		$i$				
		1	2	3	4	
2	2	–1,000	1,000	–	–	2,00
3	2	–4,750	6,750	–2,000	–	13,5
	3	3,750	–6,750	3,000	–	13,5
4	2	–14,82	19,90	–8,490	3,410	46,6
	3	27,29	–43,92	29,00	–12,36	112
	4	–13,47	24,02	–20,50	9,950	67,9

Для определения коэффициента  $a_n$  достаточно воспользоваться значением  $P(a, x_1)$  при  $x_1 = 0$  ( $x_{n,o,1,l} = 0$ ).

Эффективность решения исследуемой коэффициентной обратной задачи анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене (1) оцениваем

безразмерным абсолютным числом обусловленности задачи  $A_{n,r} = \alpha_{n,r,l}(X) = l^r \cdot \alpha_{n,r}(X) = l^r \cdot \lambda_{n,r}(X)$ . Отклонение координат узлов сетки аппроксимации от оптимальных координат увеличивает безразмерное абсолютное число обусловленности  $A_{n,r}$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Варианты графиков функций абсолютного числа обусловленности  $A_{4,2}$

**Fig. 3.** Variants of graphs of absolute condition number functions  $A_{4,2}$

На рисунке 3 представлены графики  $A_{4,2}$ -функций величины каждой безразмерной координаты сетки (2) при оптимальных значениях остальных координат. Отклонение координат до половины текущего шага сетки при оптимальных остальных координатах до двух раз увеличивает погрешность определения параметра  $a_2$  (уменьшает эффективность решения исследуемой коэффициентной обратной задачи) в частном примере многочлена (1) при  $n = 4$ ,  $r = 2$ .

### Выводы

В ходе проводимых исследований решалась задача разработки модели описания и оценки эффективности решения коэффициентной обратной задачи анализа и обработки информации об алгебраическом многочлене на примере многочлена с заданным коэффициентом второго младшего члена в условиях зашумленных входных данных.

Было показано, что для количественной оценки эффективности решения задачи восстановления коэффициентов многочлена при равномерной непрерывной норме погрешности входных данных следует использовать значение целевой функции в виде минимума функции Лебега, решение задачи осуществлять в постановке интерполяционного полинома Лагранжа с распределением узлов сетки аппроксимации в качестве параметра регуляризации.

Получено оптимальное распределение координат узлов сетки аппроксимации, связанное с построенным экстремальным полиномом степени, равной степени исследуемого алгебраического многочлена, с числом точек чебышёвского альтернанса на отрезке  $[-1, 1]$ , совпадающим со степенью полинома.

### Список литературы

1. Bakushinsky A. B., Kokurin M. M., Kokurin M. Yu. Regularization Algorithms for Ill-Posed Problems. Inverse and Ill-Posed Problems Series, 61. Boston: De Gruyter, 2018. 326 p. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>.

2. Перельмутер А. В. Обратные задачи строительной механики // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22, № 4. С. 83–101. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101>.
3. Ватульян А. О., Плотников Д. К. Обратные коэффициентные задачи в механике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 3. С. 37–47. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.3.04>.
4. Cheney E. W., Kincaid D. R. Numerical Mathematics and Computing. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2013.
5. Локтионов А. П. Чебышёвский альтернанс при аппроксимации начальных условий обратной задачи Коши // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 3. С. 86–102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-86-102>.
6. Кабанихин С. И. Обратные задачи и искусственный интеллект // Успехи кибернетики. 2021. Т. 2, № 3. С. 33–43. <https://doi.org/10.51790/2712-9942-2021-2-3-5>.
7. Boykov I. V., Krivulin N. P. An Approximate Method for Recovering Input Signals of Measurement Transducers // Measurement Techniques. 2022. Vol. 64. P. 943–948. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02026-3>.
8. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification // Inverse Problems. 2020. Vol. 36, N 12. P. 30. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/abc530>.
9. Балакин Д. А., Пытьев Ю. П. Редукция измерения при наличии субъективной информации // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 12. С. 84–110.
10. Samarskii A. A., Vabishchevich P. N. Numerical Methods for Solving Inverse Problems of Mathematical Physics. Inverse and Ill-Posed Problems Series 52. Berlin; New York: De Gruyter, 2008. 438 p. <https://doi.org/10.1515/9783110205794>.
11. Loktionov A. P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel // Telecommunications and Radio Engineering. 2013. Vol. 72, N 2. P. 161–171. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70>.
12. Локтионов А. П. Информационная система анализа балочных элементов под комбинированной нагрузкой // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 2. С. 45–52. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.2.45.52>.
13. Кудрявцев К. Я. Алгоритм построения полинома наилучшего равномерного приближения по экспериментальным данным // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2019. Т. 8, № 5. С. 480–486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>.
14. Калиткин Н. Н., Колганов С. А. Построение аппроксимаций, удовлетворяющих чебышевскому альтернансу // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2020. № 91. С. 33. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-91>.
15. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)". October 15–16, 2020. Moscow, 2020. P. 1–13.

16. Verbrugge M. W., Wampler C. W., Baker D. R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data // Journal of The Electrochemical Society. 2018. Vol. 165, N 16. P. A4000-A4011. <https://doi.org/10.1149/2.0951816jes>.
17. Ibrahimoglu B. A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // Journal of Inequalities and Applications. 2016. Vol. 93. P. 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.
18. Loktionov A. P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2018. Vol. 12, N 2. P. 53–71. <https://doi.org/10.24874/jsscm.2018.12.02.04>.
19. Шакиров И. А. Полное исследование функций Лебега, соответствующих классическим интерполяционным полиномам Лагранжа // Известия вузов. Математика. 2011. № 10. С. 80–88.
20. Золотарёв Е. И. Приложение эллиптических функций к вопросам о функциях, наименее и наиболее отклоняющихся от нуля. Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1932. С. 1–59. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101>.
21. Агафонова И. В., Малозёмов В. Н. Экстремальные полиномы, связанные с полиномами Золотарёва // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2020. Т. 65, № 7, вып. 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101>.
22. Алиев М. С. Об одной классификации линейно независимых систем функций // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. 2021. Т. 36, № 1. С. 15–23. <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-1-15-23>.
23. Малозёмов В. Н. Что даёт информация об альтернансе? // Избранные лекции по экстремальным задачам. СПб.: Издательство ВВМ, 2017. Ч. 2. С. 259–267.
24. Агафонова И. В., Малозёмов В. Н. Экстремальные полиномы, связанные с полиномами Золотарёва // Доклады Академии наук. 2016. Т. 5, вып. 467. С. 255–256. <https://doi.org/10.7868/S0869565216090036>.
25. Denisov A. M. Iterative method for solving an inverse coefficient problem for a hyperbolic equation // Differential Equations. 2017. Vol. 53. P. 916–922. <https://doi.org/10.1134/S0012266117070084>.
26. Малозёмов В. Н., Тамасян Г. Ш. Этюд на тему полиномиальной фильтровой задачи ( $n = 3$ ) // Избранные лекции по экстремальным задачам. СПб.: Издательство ВВМ, 2017. Ч. 2. С. 305–315.

## References

1. Bakushinsky A. B., Kokurin M. M., Kokurin M. Yu. Regularization Algorithms for Ill-Posed Problems. Inverse and Ill-Posed Problems Series, 61. Boston, De Gruyter, 2018. 326 p. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>

2. Perel'muter A. V. Obratnye zadachi stroitel'noi mekhaniki [Inverse problems of structural mechanics]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* = *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 83–101. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101>
3. Vatul'yan A. O., Plotnikov D. K. Obratnye koeffitsientnye zadachi v mekhanike [Inverse coefficient problems in mechanics]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* = *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2019, no. 3, pp. 37–47. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.3.04>
4. Cheney E. W., Kincaid D. R. *Numerical Mathematics and Computing*. Belmont, Thomson Brooks/Cole, 2013.
5. Loktionov A. P. Chebyshevskii al'ternans pri approksimatsii nachal'nykh uslovii obratnoi zadachi Koshi [Chebyshevsky alternance in approximation of initial conditions of the inverse Cauchy problem]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 86–102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-86-102>
6. Kabanikhin S. I. Obratnye zadachi i iskusstvennyi intellekt [Inverse problems and artificial intelligence]. *Uspekhi kibernetiki* = *The Successes of Cybernetics*, 2021, vol. 2, no. 3, pp. 33–43. <https://doi.org/10.51790/2712-9942-2021-2-3-5>
7. Boykov I. V., Krivulin N. P. An Approximate Method for Recovering Input Signals of Measurement Transducers [Approximate Method for Recovering Input Signals of Measurement Transducers]. *Measurement Techniques* = *Measurement Techniques*, 2022, vol. 64, pp. 943–948. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02026-3>
8. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification. *Inverse Problems*, 2020, vol. 36, no. 12, p. 30. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/abc530>
9. Balakin D. A., Pyt'ev Yu. P. Reduktsiya izmereniya pri nalichii sub"ektivnoi informatsii [Reduction of measurement in the presence of subjective information]. *Matematicheskoe modelirovanie* = *Mathematical Modeling*, 2018, vol. 30, no. 12, pp. 84–110.
10. Samarskii A. A., Vabishchevich P. N. *Numerical Methods for Solving Inverse Problems of Mathematical Physics. Inverse and Ill-Posed Problems Series 52*. Berlin, New York, De Gruyter, 2008. 438 p. <https://doi.org/10.1515/9783110205794>
11. Loktionov A. P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, vol. 72, no. 2, pp. 161–171. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70>
12. Loktionov A. P. Informatsionnaya sistema analiza balochnykh elementov pod kombinirovannoi nagruzkoi [Information system for analysis of beam elements under combined load]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* = *Construction Mechanics and Calculation of Structures*, 2021, no. 2, pp. 45–52. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.2.45.52>
13. Kudryavtsev K. Ya. Algoritm postroeniya polinoma nailuchshego ravnomernogo priblizheniya po eksperimental'nym dannym [Algorithm for constructing the polynomial of

the best uniform approximation according to experimental data]. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI" = Bulletin of the National Research Nuclear University "MEPhI"*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 480–486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>

14. Kalitkin N. N., Kolganov S. A. Postroenie approksimatsii, udovletvoryayushchikh chebyshevskomu al'ternansu [Construction of approximations satisfying Chebyshev alternance]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*, 2020, no. 91, p. 33. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-91>

15. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)". October 15–16, 2020. Moscow, 2020, pp. 1–13.

16. Verbrugge M. W., Wampler C. W., Baker D. R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, vol. 165, no. 16, pp. A4000–A4011. <https://doi.org/10.1149/2.0951816jes>

17. Ibrahimoglu B. A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation. *Journal of Inequalities and Applications*, 2016, vol. 93, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>

18. Loktionov A. P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 53–71. <https://doi.org/10.24874/jsscm.2018.12.02.04>

19. Shakirov I. A. Polnoe issledovanie funktsii Lebega, sootvetstvuyushchikh klassicheskim interpolatsionnym polinomam Lagranzha [Complete study of Lebesgue functions corresponding to classical Lagrange interpolation polynomials]. *Izvestiya vuzov. Matematika = Proceedings of Universities. Mathematics*, 2011, no. 10, pp. 80–88.

20. Zolotarev E. I. Prilozhenie ellipticheskikh funktsii k voprosam o funktsiyakh, naimenee i naibolee otklonyayushchikhsya ot nulya [Application of elliptic functions to questions about functions that deviate least and most from zero]. Leningrad, AN SSSR Publ., 1932, pp. 1–59. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101>

21. Agafonova I. V., Malozemov V. N. Ekstremal'nye polinomy, svyazannye s polinomami Zolotareva [Extremal polynomials related to Zolotarev polynomials]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya = Bulletin of St. Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2020, vol. 65, no. 7, is. 1, pp. 3–14. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101>

22. Aliev M. S. Ob odnoi klassifikatsii lineino nezavisimyykh sistem funktsii [On one classification of linearly independent systems of functions]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Estestvennye nauki = Bulletin of Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences*, 2021, vol. 36, no. 1, pp. 15–23. <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-1-15-23>

23. Malozemov V. N. Chto daet informatsiya ob al'ternanse? [What gives information about alternance?]. Izbrannye lektsii po ekstremal'nym zadacham [Selected lectures on extreme problems]. St. Petersburg, VVM Publ., 2017, pt. 2, pp. 259–267.

24. Agafonova I. V., Malozemov V. N. Ekstremal'nye polinomy, svyazannye s polinomami Zolotareva [Extreme polynomials related to Zolotarev polynomials]. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*, 2016, vol. 5, is. 467, pp. 255–256. <https://doi.org/10.7868/S0869565216090036>

25. Denisov A. M. Iterative method for solving an inverse coefficient problem for a hyperbolic equation. *Differential Equations*, 2017, vol. 53, pp. 916–922. <https://doi.org/10.1134/S0012266117070084>

26. Malozemov V. N., Tamasyan G. Sh. Etyud na temu polinomial'noi fil'trovoi zadachi ( $n = 3$ ) [Etude on the topic of the polynomial filter problem ( $n = 3$ )]. Izbrannye lektsii po ekstremal'nym zadacham [Selected lectures on extreme problems]. St. Petersburg, VVM Publ., 2017, pt. 2, pp. 305–315.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Локтионов Аскольд Петрович,**  
доктор технических наук, доцент,  
Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: loapa@mail.ru,  
Researcher ID: P-5434-2015,  
ORCID: 0000-0003-1108-4185

**Askold P. Loktionov,** Dr. of Sci. (Engineering),  
Associate Professor, Southwest State University,  
Kursk, Russian Federation,  
e-mail: loapa@mail.ru,  
Researcher ID: P-5434-2015,  
ORCID: 0000-0003-1108-4185

## 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 ( $\Omega$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\omega$ ,  $\nu$  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/>.