

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

# **Известия**

**Юго-Западного  
государственного университета**

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

**Научный журнал**

Том 15 № 1 / 2025

---

# **Proceedings**

**of the Southwest  
State University**

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

**Scientific Journal**

Vol. 15 № 1 / 2025



**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).

2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки).

3.3.9. Медицинская информатика (медицинские науки).

#### **ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

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

#### **ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА**

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

#### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Учредитель и издатель:**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**

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

**Телефон:** +7(4712) 22-25-26,

**Факс:** +7(4712) 50-48-00.

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

**Наименование органа, зарегистрировавшего издание:**

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

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2025



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 31.03.2025. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 08.05.2025.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 20,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 11.

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).

2.3.8. Informatics and information processes (technical sciences).

3.3.9. Medical informatics (medical sciences).

**EDITOR-IN-CHIEF**

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

**DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF**

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

**EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Konstantin V. 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

© Southwest State University, 2025



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

Signed for printing 31.03.2025. Format 60×84/8.

Release date 08.05.2025.

Offset paper. Printer's sheets: 20,9.

Circulation 1000 copies. Order 11.

16+

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ .....</b>	<b>8</b>
Оптимизация параметров классификатора при обработке статистических характеристик метаданных сетевых пакетов .....	8
<i>Таныгин М. О., Добрица В. П., Митрофанов А. В., Хауа Ибрахим Ахмат</i>	
Кардиометрические исследования сердечно-сосудистой системы долгожителей .....	21
<i>Чернов Н. Н., Руденко М. Ю.</i>	
<b>МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....</b>	<b>35</b>
Способ тактовой синхронизации для демодуляторов сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией .....	35
<i>Коптев Д. С., Довбня В. Г.</i>	
Подходы к исследованию процессов появления и развития напряженно-деформированного состояния в зависимости от режимов виброн нагружения элемента конструкции .....	51
<i>Сизонов И. И.</i>	
<b>РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ .....</b>	<b>64</b>
Оценка возможности применения канала радиосвязи для передачи видеоинформации между беспилотным подводным аппаратом и пультом дистанционного управления.....	64
<i>Алемпьев М. Ю., Семенова А. Е., Коптев Д. С., Довбня В. Г.</i>	
Применение алгоритмов обработки изображений для улучшения визуализации структур поджелудочной железы .....	79
<i>Сергеев Д. В.</i>	
Методы и алгоритмы идентификации особых точек на снимках, полученных с бортового фотовидеорежистратора беспилотного летательного аппарата .....	91
<i>Горбачев И. Н., Томакова Р. А., Коробков С. В.</i>	
<b>СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....</b>	<b>117</b>
Формирование информативных характеристик импеданса биоматериала для алгоритмов программно-аппаратных комплексов .....	117
<i>Корсунский Н. А., Томакова, Р. А., Брежнев А. В.</i>	
Исследование нелинейного взаимодействия акустической волны с биотканями для целей акустической эластографии .....	131
<i>Лагута М. В., Кравчук Д. А., Чернов Н. Н.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>144</b>
Модель обработки сообщений от нескольких источников, кодированных в режиме сцепления блоков .....	144
<i>Таныгин М. О., Посканный М. В.</i>	
Метод диагностики преходящих невротических расстройств на основе гибридных нечетких моделей.....	157
<i>Сафронов Р. И., Кныш О. А., Родионова С. Н., Стародубцева Л. В.</i>	
Analyzing pandemic dynamics through traveling waves: a mathematical model .....	170
<i>Taha A. Tariq, Konstantinov I. S.</i>	
<b>К сведению авторов.....</b>	<b>180</b>

## CONTENT

<b>INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS .....</b>	<b>8</b>
Optimization of classifier parameters when processing statistical characteristics of network packet metadata .....	8
<i>Tanygin M. O., Dobritsa V. P., Mitrofanov A. V., Khaia Ibrahim Ahmat</i>	
Cardiometric studies of the cardiovascular system of centenarians .....	21
<i>Chernov N. N., Rudenko M. Y.</i>	
<b>MECHATRONICS, ROBOTICS .....</b>	<b>35</b>
Clock synchronization method for quadrature amplitude keyed signal demodulators .....	35
<i>Koptev D. S., Dovbnya V. G.</i>	
Approaches to studying the processes of appearance and development of stress-strain state depending on vibration loading modes of a structure element .....	51
<i>Sizonov I. I.</i>	
<b>IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING .....</b>	<b>64</b>
Evaluation of the possibility of using a radio communication channel to transmit video information between an unmanned underwater vehicle and a remote control .....	64
<i>Alempiev M. Y., Semenova A. E., Koptev D. S., Dovbnya V. G.</i>	
Application of image processing algorithms to improve visualization of pancreatic structures .....	79
<i>Sergeev D. V.</i>	
Methods and algorithms for identifying special points in images obtained from an onboard photo video recorder of an unmanned aerial vehicle .....	91
<i>Gorbachev I. N., Tomakova R. A., Korobkov S. V.</i>	
<b>SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING .....</b>	<b>117</b>
Formation of informative characteristics of biomaterial impedance for algorithms of software and hardware complexes .....	117
<i>Korsunsky N. A., Tomakova R. A., Brezhnev A. V.</i>	
Research of the nonlinear interaction of an acoustic wave with biological tissues for the purposes of acoustic elastography .....	131
<i>Laguta M. V., Kravchuk D. A., Chernov N. N.</i>	
<b>MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS .....</b>	<b>144</b>
A model for processing messages from multiple sources encoded in the block coupling mode .....	144
<i>Tanygin M. O., Poskannyi M. V.</i>	
A method for diagnosing borderline mental disorders based on hybrid fuzzy models .....	157
<i>Safonov R. I., Knysh O. A., Rodionova S. N., Starodubtseva L. V.</i>	
Анализ динамики пандемий через волны передвижения: математическая модель .....	170
<i>Taha A. Тарик, Константинов И. С.</i>	
<b>Information for Authors .....</b>	<b>180</b>

### Оптимизация параметров классификатора при обработке статистических характеристик метаданных сетевых пакетов

М. О. Таныгин<sup>1</sup>, В. П. Добрица<sup>1</sup>, А. В. Митрофанов<sup>1</sup> ✉, Хауа Ибрахим Ахмат<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: mitro3000@rambler.ru

#### Резюме

**Цель исследования.** В статье рассматривается возможность повышения вероятности корректной аутентификации удалённого источника сообщений на основе анализа метаданных формируемых им сетевых пакетов. Целью данного исследования является разработка метода классификации аутентичных сетевых пакетов на основе анализа статистических характеристик времени поступления пакетов и оптимизация параметров классификатора для достижения максимальной точности определения аутентичных последовательностей пакетов.

**Методы.** В исследовании применены методы анализа высокопорядковых моментов межпакетных интервалов, а также логистическая регрессия для классификации пакетов. Используются параметры эксцесса и асимметрии, вычисляемые на основе выборок временных интервалов, образованных приходом пакетов. Разработан классификатор, основанный на минимизации расстояния от пар значений (коэффициентов асимметрии и эксцесса) до параболы, соответствующей распределению Пуассона.

**Результаты.** Были сформированы выборки мощностью  $10^4$  с рассчитанными парами коэффициентов эксцесса и асимметрии. Полученные результаты показывают, что для максимально возможной точности классификации (82–84%) оптимальные параметры параболы составляют:  $a \approx 1,0$ ,  $c = 8–9$ . ROC-кривые анализировались для различных наборов параметров, что подтвердило линейность зависимости доли верно-положительных результатов от доли ложноположительных.

**Заключение.** Результаты исследования подтвердили возможность повышения надежности аутентификации сетевых пакетов путем использования высокопорядковых моментов данных о временных интервалах, что демонстрирует эффективность предложенного метода. Основные выводы включают необходимость тщательной настройки параметров классификатора для оптимизации процесса аутентификации. Поскольку предложенный метод проявляет высокую чувствительность к изменениям в распределениях, это открывает новые направления для дальнейшего исследования в области защиты беспроводных сетей.

**Ключевые слова:** обработка данных; аутентификация; коэффициент эксцесса; коэффициент асимметрии; имитационное моделирование; сетевые пакеты; межпакетные интервалы.

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

**Для цитирования:** Оптимизация параметров классификатора при обработке статистических характеристик метаданных сетевых пакетов / М. О. Таныгин, В. П. Добрица, А. В. Митрофанов, Хауа Ибрахим Ахмат // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 8–20. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-8-20>

Поступила в редакцию 11.01.2025

Подписана в печать 10.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## Optimization of classifier parameters when processing statistical characteristics of network packet metadata

Maxim O. Tanygin<sup>1</sup>, Vyacheslav P. Dobritsa<sup>1</sup>, Aleksey V. Mitrofanov<sup>1</sup> ,  
Khaua Ibrahim Ahmat<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: mitro3000@rambler.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The article considers the possibility of increasing the probability of correct authentication of a remote message source based on the analysis of metadata of the network packets it generates. The purpose of this purpose is to develop a method for classifying authentic network packets based on the analysis of statistical characteristics of the packet arrival time and to optimize the classifier parameters to achieve maximum accuracy in determining authentic packet sequences.

**Methods.** The study applies methods of analyzing high-order moments of interpacket intervals, as well as logistic regression for classifying packets. The parameters of excess and asymmetry calculated based on samples of time intervals formed by the arrival of packets are used. A classifier based on minimizing the distance from pairs of values (asymmetry and excess coefficients) to a parabola corresponding to the Poisson distribution is developed.

**Results.** Samples with a power of  $10^4$  with calculated pairs of excess and asymmetry coefficients were formed. The obtained results show that for the maximum possible classification accuracy (82-84%), the optimal parabola parameters are:  $a \approx 1.0$ ,  $c = 8-9$ . ROC curves were analyzed for different sets of parameters, which confirmed the linearity of the dependence of the proportion of true positive results on the proportion of false positives.

**Conclusion.** The results of the study confirmed the possibility of increasing the reliability of network packet authentication by using high-order moments of time interval data, which demonstrates the effectiveness of the proposed method. The main conclusions include the need for careful tuning of the classifier parameters to optimize the authentication process. Since the proposed method exhibits high sensitivity to changes in distributions, this opens up new directions for further research in the field of wireless network security.

**Keywords:** data processing; authentication; kurtosis coefficient; skewness coefficient; simulation modeling; network packets; interpacket intervals.

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

**For citation:** Tanygin M.O., Dobritsa V.P., Mitrofanov A.V., Khaua Ibrahim Ahmat. Optimization of classifier parameters when processing statistical characteristics of network packet metadata. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo*

## Введение

Классическим способом аутентификации источников сетевых пакетов является внедрение кодов аутентификации сообщений или имитовставок в заголовки пакетов. Отправитель создает пакет данных и на основе его содержания генерирует имитовставку. Приемник, в свою очередь, анализирует полученный пакет и соответствующую имитовставку, определяя, является ли отправитель носителем идентификатора сеанса.

В целом вероятность преодоления имитозащиты или ошибок первого рода в процессе аутентификации зависит от разрядности кода аутентификации [1]. Однако, когда возникает необходимость уменьшения объема передаваемых данных [2], ограниченные размеры имитовставки [3] могут не позволить достичь необходимой вероятности ошибки [4]. Это приводит к необходимости применения алгоритмов аутентификации [5], построенных на принципах сцепления блоков [6], которые при одинаковом размере имитовставки обеспечивают меньшую вероятность ошибок [7], но требуют больше вычислительных ресурсов [8]. Для различных систем связи и протоколов важной становится задача уменьшения размера заголовков из-за

ограничений на размеры передаваемых пакетов данных [9]. Другим подходом к повышению достоверности аутентификации является использование метаинформации<sup>1</sup>. Это информация, которую приемник может получить из факта получения пакета или нескольких пакетов, включая размеры дополнительной информации [10], передаваемой по альтернативным каналам, статистические характеристики сигнала в канале связи, время получения пакетов и пространственное расположение источников данных [11].

Наиболее перспективным представляется анализ времени прихода пакетов, так как каждый протокол передачи имеет свои распределения между пакетными интервалами. Это в сочетании с методами контроля аутентичности позволяет разработать критерии для выделения аутентичных пакетов, даже если анализ кодов аутентификации сообщений не позволяет этого [12]. При этом следует исследовать не только сами значения межпакетных интервалов, а также моменты этих значений как более информативные параметры [13].

В предложенном методе анализа высокопорядковых моментов для небольших выборок межпакетных интервалов

<sup>1</sup> Пат. 2233045 С2 Российская Федерация, МПК Н04J 13/00, Н04В 1/707, Н04L 1/00. Способ и устройство высокоскоростной передачи пакетных

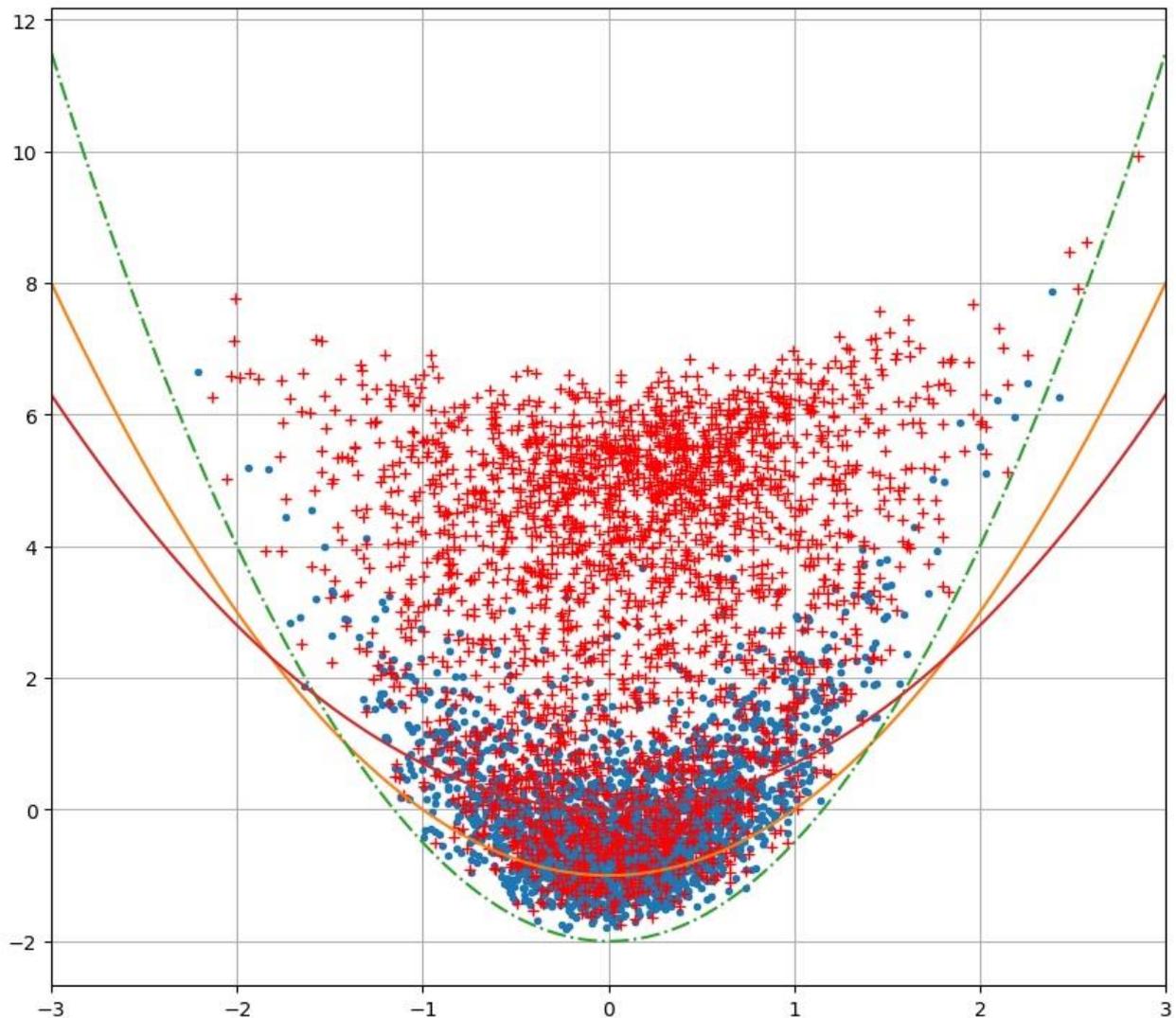
данных / Падовани Р., Синдхушаяна Н. Т., Витли Ч. Е. [и др.]. № 2000114194/09; заявл. 03.11.1998; опубл. 20.07.04.

времени [10] применялся подход, подробно описанный в работе [14], в которой коэффициенты асимметрии и эксцесса для каждой выборки размещались на координатной плоскости, и анализировались зависимости между этими параметрами. Для моделирования передачи данных в сетях LoRaWAN использовалась модифицированная модель, которая учитывала применение кодирования с сцеплением блоков для аутентификации. В результате последовательности сообщений от источника к приемнику дают возможность использовать дополнительную метаинформацию для повышения надежности аутентификации – временные интервалы между получением сообщений. Для выборок, построенных на таких временных интервалах, вычислялись коэффициенты асимметрии и эксцесса. В ходе анализа различий распределений малых выборок, представляющих межпакетные интервалы при поступлении пакетов, наиболее информативными оказались моменты высоких порядков, которые, в отличие от низкопорядковых, более чувствительны к незначительным отклонениям в распределениях выборок. При возникновении ошибок аутентификации значения времени поступления пакета, вызвавшего конфликт среди кодов аутентификации сообщений, меняют два временных интервала в выборке, соответствующей последовательности аутентичных сообщений. Это создает отличия в картах коэффициентов асимметрии и эксцесса для выборок, образованных интервалами между приходом аутентичных

пакетов и для последовательностей, включающих пакеты от сторон их источников.

В настоящей работе мы рассматриваем подход, основанный на анализе статистических характеристик времени поступления сетевых пакетов в приёмник. Как показали исследования, использование моментов высоких порядков позволяет выявлять отличия в законах распределения выборок размером 10–20 элементов. Отличия в законах распределения возникают, когда в последовательности сетевых пакетов происходит коллизия кодов аутентификации и формируются две последовательности межпакетных интервалов [15], отличающиеся двумя элементами: межпакетными интервалами до и после сетевого пакета, в котором возникла коллизия [16].

Используемое решение, основанное на анализе коэффициентов эксцесса и асимметрии двух выборок, сводит задачу разделения двух множеств точек (рис. 1): множество значений коэффициентов эксцесса и асимметрии для межпакетных интервалов в последовательности аутентичных сетевых пакетов (синие точки) и аналогичное множество для последовательностей, содержащих в произвольной позиции один посторонний пакет (красные плюсы). Причём на входе классификатора будет две пары параметров, и классификатор должен выдать «1», если первая пара относится к аутентичной последовательности, и «0» – в противном случае [17].



**Рис. 1.** Карты коэффициентов эксцесса и асимметрии для множества выборок, образованных интервалами между временем поступления пакетов данных: красные плюсы – значения коэффициентов для выборок, содержащих посторонние пакеты; синие точки – значения коэффициентов для выборок, состоящих полностью из аутентичных пакетов

**Fig. 1.** Maps of the kurtosis and asymmetry coefficients for a set of samples formed by intervals between the arrival times of data packets: red pluses are the coefficient values for samples containing extraneous packets; blue dots are the coefficient values for samples consisting entirely of authentic packets

Известные методы машинного обучения, такие как метод  $k$  ближайших соседей, метод сегментации и др. [18], для данных множеств не подходят, так как два множества в общем случае обладают достаточно значительным пересечением на карте коэффициентов эксцесса и асимметрии [19].

В работе [20] исследовался классификатор, в основе которого лежит расстояние до параболы. Парабола в качестве кривой выбрана неслучайно, а потому, что для распределения Пуассона, которое наиболее точно описывает распределение межпакетных временных интервалов, зависимость между коэффи-

циентом эксцесса и коэффициентом асимметрии квадратичная. В исследовании использовалось уравнение параболы  $E = A^2$ , тогда как даже поверхностный анализ размещения точек на карте позволяет сказать, что форма параболы может оказать существенное влияние на качество классификатора, в основе которого лежит расстояние от точек на карте до указанной кривой (рис. 1). Целью настоящего исследования является определение параметров (уравнения) кривой, используемой при классификации пары значений коэффициентов, при которых достигается максимальная точность классификации и достоверности определения аутентичных пакетов данных.

## Материалы и методы

В качестве исходных данных классификатор получает четыре параметра: две пары значений  $(A_1, E_1)$  и  $(A_2, E_2)$ . Как параметры обработки данных мы используем коэффициенты  $a$  и  $c$  уравнения параболы  $E = a \cdot A^2 - c$ . Симметричная относительно оси ординат картина значений коэффициентов эксцесса и асимметрии (рис. 1) позволяет использовать симметричную относительно оси ординат параболу с нулевым коэффициентом при множителе  $A$ . На основе полученных в [21] формул для расстояния от параболы формируем две метрики для каждой пары значений:

$$D_i = (Q - A_i)^2 + (a^2 Q^2 - E_i + c)^2,$$

$$Q = \left[ \frac{1}{4a^2} A_i + \left( \left( \frac{1 - 2a^2(-c - E_i)}{2a^4} \right)^3 + \frac{1}{4} (A_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} +$$

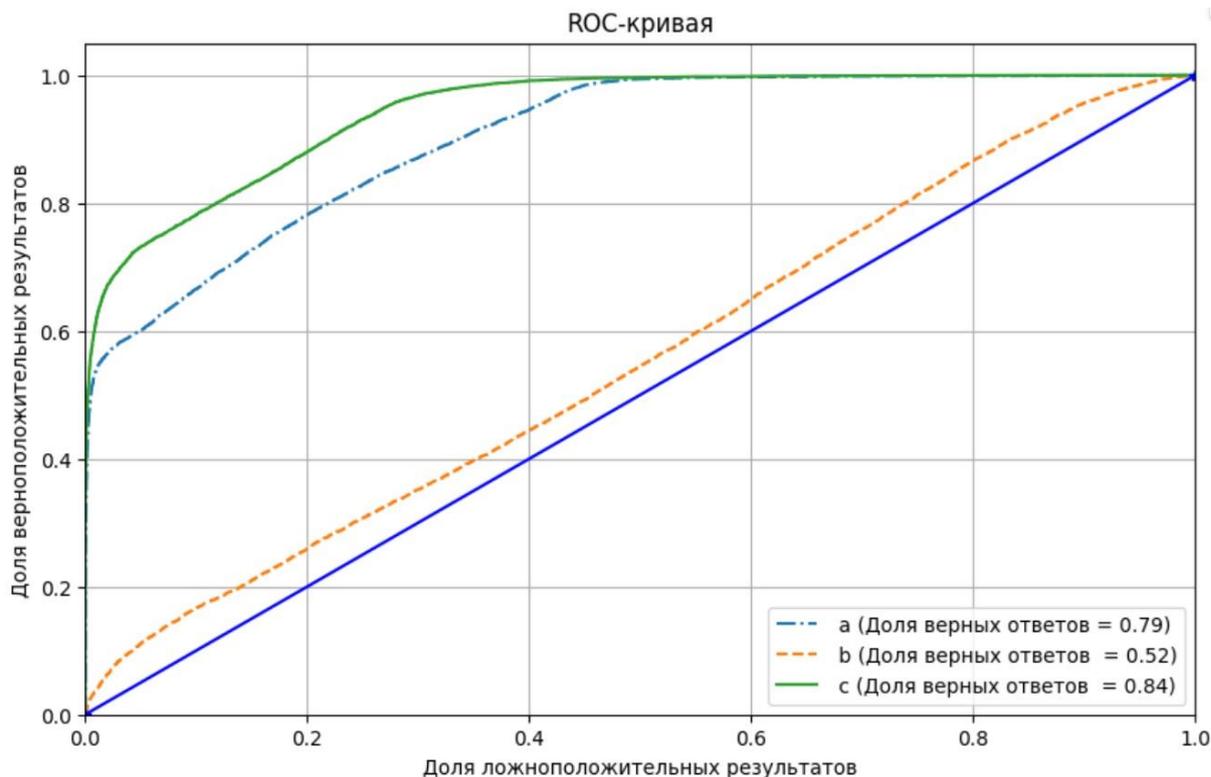
$$+ \left[ \frac{1}{4a^2} A_i - \left( \left( \frac{1 - 2a^2(-c - E_i)}{2a^4} \right)^3 + \frac{1}{4} (A_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}, i = 1, 2. \quad (1)$$

## Результаты и их обсуждение

На основе описанных в [21] моделей были сформированы выборки мощностью  $10^4$  последовательностей каждого типа, для которых рассчитаны  $10^4$  пар значений  $(A_1, E_1)$  и  $(A_2, E_2)$ . Далее для каждой пары значений  $a$  и  $c$  рассчитаны  $10^4$  значений  $D_1$  и  $D_2$ . Тогда задача классификации состоит в получении функции  $f$ , такой, что  $f(D_1, D_2) = 1$ ,

$f(D_2, D_1) = 0$ . Для построения данной функции использовали логистическую регрессию. Характеристикой классификатора, которая может быть использована для настройки классификатора для решения частных задач, является ROC-кривая.

На рисунке 2 представлены данные характеристики для нескольких наборов параметров  $a$  и  $c$ .



**Рис. 2.** ROC-кривая для метода классификации сетевых пакетов на основе расстояния от параболы при различных параметрах уравнения параболы: а –  $a = 1,2$ ,  $c = -3$ ; б –  $a = 0,7$ ,  $c = 0$ ; в –  $a = 1$ ,  $c = -6$ .

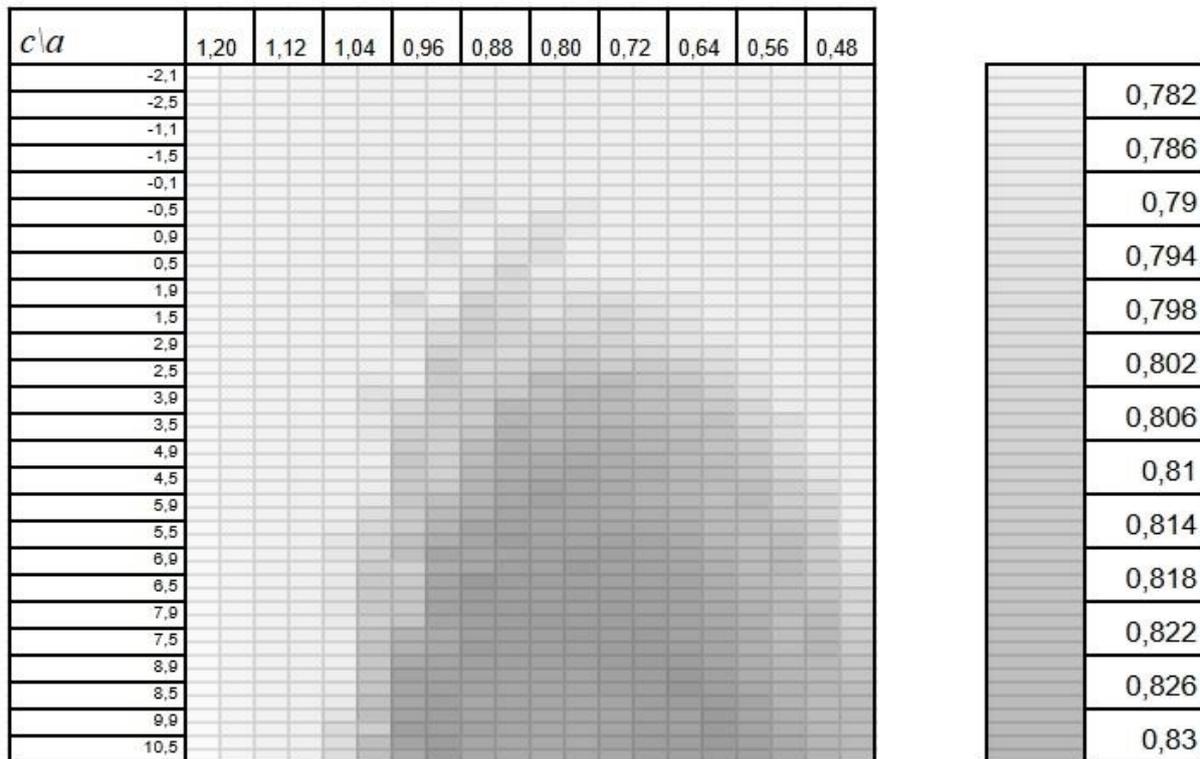
**Fig. 2.** ROC curve for the distance-from-parabola network packet classification method with different parameters of the parabola equation: а –  $a = 1,2$ ,  $c = -3$ ; б –  $a = 0,7$ ,  $c = 0$ ; в –  $a = 1$ ,  $c = -6$

Форма ROC-кривой позволяет её достаточно легко аппроксимировать прямой, так как зависимость доли верноположительных результатов от доли ложноположительных результатов практически линейна. Площадь под ROC-кривой, интерпретируемая как процент верных ответов, находится в прямой зависимости от доли верноположительных результатов при фиксированном значении ложноположительных результатов

Поэтому на втором этапе исследования мы определяли зависимость данного показателя классификатора от параметров

$a$  и  $c$  обработки значений коэффициентов эксцесса и асимметрии (рис. 3).

Параметр  $a$  варьировался в диапазоне от 0,5 до 1,2, параметр  $c$  – в диапазоне от  $-2$  до 10. Градиентная диаграмма на рисунке 3 полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что целесообразные значения параметров  $a$  и  $c$ , при которых точность рассматриваемого метода определения последовательности от целевого источника максимальна, равны:  $a \approx 1,0$ ,  $c = 8-9$ . При этом точность классификации (достоверность аутентификации) находится в диапазоне 82–84%.



**Рис. 3.** Диаграмма зависимости доли верных ответов в зависимости от параметров обработки сообщений  $a$ ,  $c$ .

**Fig. 3.** Diagram of the dependence of the proportion of correct answers on the parameters of message processing  $a$ ,  $c$ .

Объяснением такого значения параметра  $c$ , которое соответствует параболе, достаточно сильно смещённой вниз по оси ординат относительно основного облака значений коэффициентов эксцесса и асимметрии, может быть объяснено тем, что пары значений пар значений  $(A_1, E_1)$  и  $(A_2, E_2)$  при значений  $-1 < A_1 < 1$ ,  $-2 < E_1 < 2$  расположены очень близко друг к другу. При значении  $c = 0$  это создаст ошибку классификации, так как минимум расстояния будет рассчитываться до ветвей параболы, находящихся в диапазоне точка  $|A_1| > 0,5$ , и даже незначительное изменение коэффициента асимметрии может компенсировать значительное изменение коэффициента эксцесса. В случае же

$c = 9$  минимум расстояния будет рассчитываться до окрестности нижней точки параболы, и влиять на значение данного минимума будет коэффициент эксцесса. Данное наблюдение порождает гипотезу о возможности построения классификатора, основанного на минимуме расстояния не до параболы (как кривой, характерной для распределения Пуассона), а до некоторой точки на карте коэффициентов эксцесса и асимметрии. Это позволило бы отказаться от вычисления корней кубического уравнения и значительно упростить вычислительный процесс нахождения минимума расстояния. Но проверка данной гипотезы выходит за рамки настоящей работы и является перспективным направлением исследования

возможности аутентификации в беспроводных сетях связи по значениям межпакетного интервала времени

## Выводы

В данном исследовании был предложен новый метод классификации сетевых пакетов, основанной на анализе статистических характеристик времени их поступления. Улучшение надежности аутентификации в беспроводных сетях достигается за счет использования высокопорядковых моментов, которые позволяют выявлять различия в распределениях межпакетных интервалов. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована на примере применения логистической регрессии и классификатора, опирающегося на минимизацию расстояния до кривой. Оптимальные параметры, полученные в ходе экспериментов, обеспечивают точность классификации в диапазоне 82–84%.

Результаты показывают, что интеграция временной информации и характеристик асимметрии и эксцесса значительно повышает возможность корректной идентификации аутентичных пакетов даже в условиях коллизий кодов аутентификации. Это открывает новые перспективы для применения в области сетевой безопасности и аутентификации в рамках современных протоколов связи.

Исследование подтверждает, что метаинформация, извлекаемая из временных интервалов между пакетами, может служить ценным дополнением к традиционным методам аутентификации, создавая более гибкие и надежные системы защиты. Данный подход может быть адаптирован для различных типов беспроводных сетей, что делает его перспективным направлением для дальнейших исследований и внедрений в практику.

## Список литературы

1. Biswajit P. An Overview of LoRaWAN // WSEAS Transactions on communications. 2021. N 19. P. 231–239. <https://doi.org/10.37394/23204.2020.19>
2. Myung L. IEEE 802.15.5 WPAN mesh standard-low rate part: Meshing the wireless sensor networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2010. N 28(7). P. 973–983. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2010.100902>
3. Таныгин М. О., Гончаров А. С. Исследование характеристик сетей LoRaWAN // Телекоммуникации. 2023. № 3. С. 32–39. <https://doi.org/10.31044/1684-2588-2023-0-3-32-39>
4. A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs / E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2019. Vol. 21, N 1. P. 197–216. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>
5. Ferguson N., Schneier B., Kohno T. Block Cipher Modes // Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications. Indianapolis: Wiley Publishing Inc., 2015. P. 63–76. <https://doi.org/10.1002/9781118722367.ch4>

6. Binoy K. R. Cybersecurity: Fast Encryption Cipher Block Chaining Mode (FCBC Mode) for Time Series Data // *Journal of Mathematical & Computer Applications*. 2024. Vol. 3(2). P. 1–3. [https://doi.org/10.47363/JMCA/2024\(3\)E128](https://doi.org/10.47363/JMCA/2024(3)E128)
7. Lixiang L. An efficient secure data transmission and node authentication scheme for wireless sensing networks // *Journal of Systems Architecture*. 2022. N 133(4). P. 102760. <https://doi.org/0.1016/j.sysarc.2022.102760>
8. Bo Liang, Wenling Wu, Liting Zhang. BCBC: A More Efficient MAC Algorithm // *Information Security Practice and Experience: 7th International Conference*. Guangzhou, China. 2011. Berlin: Springer, 2011. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21031-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21031-0_18)
9. Никешин А. В., Шнитман В. З. Обзор расширяемого протокола аутентификации и его методов // *Труды Института системного программирования РАН*. 2018. Т. 30, вып. 2. С. 113–148. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30\(2\)-7](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-7)
10. Плугатарев А. В. Модель определения источника сообщений на основе статистического анализа метаданных в открытом канале связи // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2022. № 4(60). С. 30–37. [https://doi.org/10.54398/20741707\\_2022\\_4\\_30](https://doi.org/10.54398/20741707_2022_4_30)
11. Таныгин М. О. Восстановление порядка следования информационных пакетов на основе анализа хеш-последовательностей // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. Т. 24, № 1. С. 175–188. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-175-188>
12. Plugatarev A. V., Tanygin M. O. Model for Determining the Message Source by Analyzing Their Arrival Time // *2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2022. P. 388–392. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896326>
13. Таныгин М. О., Митрофанов А. В., Плугатарев А. В. Использование статистических характеристик потоков сообщений для повышения достоверности аутентификации их источника // *Телекоммуникации*. 2023. № 2. С. 2–8. <https://doi.org/10.31044/1684-2588-2023-0-2-2-8>
14. Жукова Г. Н. Карта коэффициентов асимметрии и эксцесса в преподавании теории вероятностей и математической статистики // *Научно-методический электронный журнал Концепт*. 2015. № 8. С. 56–60.
15. Орлов А. И. Система моделей и методов проверки однородности двух независимых выборок // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2020. № 157. С. 145–169. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-157-012>
16. Орлов А. И. О методах проверки однородности двух независимых выборок // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86, № 3. С. 67–76. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-3-67-76>

17. Жукова Г. Н. Идентификация распределения по коэффициентам асимметрии и эксцесса // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 5. С. 26–33.
18. Керимов К. Ф., Азизова З. И. Анализ трафика сети с применением алгоритмов машинного обучения в автоматизированной информационной системе быстрого реагирования на инциденты информационной безопасности и фильтрации трафика сети // Электронный научный журнал «Потомки Аль-Фаргани» Ферганского филиала ТАТУ имени Мухаммада Аль-Хоразми. 2024. Т. 1, № 2. С. 281–285.
19. Костин Д. В., Шелухин О. И. Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для проведения классификации сетевого зашифрованного трафика // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10, № 9. С. 43–52.
20. Математическая интерпретация результатов когнитивного анализа метаданных сетевых пакетов / М. О. Таныгин, В. П. Добрица, А. В. Митрофанов, Х. И. Ахмат // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 3. С. 66–78. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-66-78>

## References

1. Biswajit P. An Overview of LoRaWAN. *WSEAS Transactions on Communications*. 2021;(19):231–239. <https://doi.org/10.37394/23204.2020.19>
2. Myung L. IEEE 802.15.5 WPAN mesh standard-low rate part: Meshing the wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2010;(28):973–983. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2010.100902>
3. Tanygin M.O., Goncharov A.S. Investigation of the characteristics of LoRaWAN networks. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2023;(3):32–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-2588-2023-0-3-32-39>
4. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G. A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2019;21(1):197–216. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>
5. Ferguson N., Schneier B., Kohno T. Block Cipher Modes. *Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications*. Indianapolis: Wiley Publishing Inc.; 2015. P. 63–76. <https://doi.org/10.1002/9781118722367.ch4>
6. Binoy K.R. Cybersecurity: Fast Encryption Cipher Block Chaining Mode (FCBC Mode) for Time Series Data. *Journal of Mathematical & Computer Applications*. 2024;3:1–3. [https://doi.org/10.47363/JMCA/2024\(3\)E128](https://doi.org/10.47363/JMCA/2024(3)E128)
7. Lixiang L. An efficient secure data transmission and node authentication scheme for wireless sensing networks. *Journal of Systems Architecture*. 2022;(133):102760. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2022.102760>

8. Bo Liang, Wenling Wu, Liting Zhang. BCBC: A More Efficient MAC Algorithm. In: *Information Security Practice and Experience: 7th International Conference. 2011. Guangzhou, China*. Berlin: Springer; 2011. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21031-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21031-0_18)

9. Nikeshin A.V., Shnitman V.Z. Review of the extensible authentication protocol and its methods. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences*. 2018;30(2):113–148. (In Russ.) [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30\(2\)-7](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-7)

10. Plugatarev A.V. A model for determining the source of messages based on statistical analysis of metadata in an open communication channel. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2022;4:30–37. (In Russ.) [https://doi.org/10.54398/20741707\\_2022\\_4\\_30](https://doi.org/10.54398/20741707_2022_4_30)

11. Tanygin M.O. Restoring the order of information packets based on the analysis of hash sequences. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020;24(1):175–188. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-175-188>

12. Plugatarev A.V., Tanygin M.O. Model for Determining the Message Source by Analyzing Their Arrival Time. In: *2022 International Russian Automation Conference (RusAuto-Con)*. Sochi; 2022. P. 388–392. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896326>

13. Tanygin M.O., Mitrofanov A.V., Plugatarev A.V. Using statistical characteristics of message flows to increase the reliability of their source authentication. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2023;(2):2–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-2588-2023-0-2-2-8>

14. Zhukova G.N. Map of coefficients of asymmetry and excess in teaching probability theory and mathematical statistics. *Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal Kontsept = Scientific and Methodological Electronic Journal Concept*. 2015;(8):56–60. (In Russ.)

15. Orlov A.I. A system of models and methods for checking the uniformity of two independent samples. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Online Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2020;(157):145–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-157-012>

16. Orlov A.I. On methods of checking the uniformity of two independent samples // Factory laboratory. *Diagnostika materialov = Diagnostics of Materials*. 2020;86(3):67–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-3-67-76>

17. Zhukova G.N. Identification of distribution by coefficients of skewness and kurtosis. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*. 2016;(5):26–33. (In Russ.)

18. Kerimov K.F., Azizova Z.I. Network traffic analysis using machine learning algorithms in an automated information system for rapid response to information security incidents and network traffic filtering. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Potomki Al'-Fargani»*

*Ferganskogo filiala TATU imeni Mukhammada Al'-Khorazmi = The electronic scientific journal «Descendants of Al-Fargani» of the Fergana Branch of the Muhammad Al-Khorazmi TATU. 2024;1(2):281–285. (In Russ.)*

19. Kostin D.V., Shelukhin O.I. Comparative analysis of machine learning algorithms for classifying network encrypted traffic. *T-Comm – Telekommunikatsii i transport = T-Comm – Telecommunications and Transport. 2016;10(9):43–52. (In Russ.)*

20. Tanygin M.O., Dobritsa V.P., Mitrofanov A.V., Akhmat H.I. Mathematical interpretation of the results of cognitive analysis of metadata network packets. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. 2023;27(3):66–78. (In Russ.)* <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-66-78>

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Таныгин Максим Олегович**, доктор технических наук, декан факультета фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [tanygin@yandex.ru](mailto:tanygin@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-4099-1414

**Maxim O. Tanygin**, Doctor of Sciences (Engineering), Dean of the Faculty of Fundamental and Applied Informatics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [tanygin@yandex.ru](mailto:tanygin@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-4099-1414

**Добрица Вячеслав Порфирьевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [dobritsa@mail.ru](mailto:dobritsa@mail.ru), ORCID: 0000-0001-7533-3684

**Vyacheslav P. Dobritsa**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [dobritsa@mail.ru](mailto:dobritsa@mail.ru), ORCID: ID: 0000-0001-7533-3684

**Митрофанов Алексей Васильевич**, преподаватель кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [mitro3000@rambler.ru](mailto:mitro3000@rambler.ru), ORCID: 0000-0001-7200-6418

**Aleksey V. Mitrofanov**, Lecturer of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [mitro3000@rambler.ru](mailto:mitro3000@rambler.ru), ORCID: 0000-0001-7200-6418

**Хауа Ибрахим Ахмат**, аспирант кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [ib-swsu@yandex.ru](mailto:ib-swsu@yandex.ru)

**Khaua Ibrahim Ahmat**, Post-Graduate Student of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [ib-swsu@yandex.ru](mailto:ib-swsu@yandex.ru)

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-21-34>



УДК 616.12.073.7

## Кардиометрические исследования сердечно-сосудистой системы долгожителей

Н. Н. Чернов<sup>1</sup>✉, М. Ю. Руденко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Южный федеральный университет

ул. Шевченко, д. 2, Ростовская область, г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: [nik-chernov@yandex.ru](mailto:nik-chernov@yandex.ru)

### Резюме

**Цель исследования.** Одной из ключевых задач современного общества является продление человеческой жизни. Важно понимать признаки старения организма, особенно его сердечно-сосудистой системы. Это позволит определить наиболее эффективные критерии оценки возрастных изменений сердечно-сосудистой системы. Поэтому рассмотрение реальных данных о состоянии сердечно-сосудистой системы долгожителей с использованием кардиометрического анализа позволит сделать шаг на пути реального понимания продления активного долголетия.

**Методы.** Применялся кардиометрический метод анализа фаз сердечного цикла, основанный на математической модели гемодинамики Г. Поединцева – О. Вороновой, что позволило оценивать динамические характеристики работы сердечно-сосудистой системы и установить критерии поддержания нормальной гемодинамики. При использовании кардиометрии в изучении долгожителей было учтено их проживание в различных географических регионах, а также различные климатические условия этих мест.

**Результаты.** Разработаны аппаратно-программные средства для кардиометрического анализа структуры сердечного цикла. Исследовались люди в возрасте старше 90 лет по показателям, включающим метаболические и гемодинамические параметры. Установлен разбаланс гемодинамики большого и малого круга кровообращения. Основной причиной изменения параметров является неполное дыхание, влияющее на баланс кислорода и углекислого газа в крови. При этом фиксировалось снижение уровня креатинфосфата в мышцах миокарда, характеризующего энергетический потенциал сокращения мышц. Это взаимосвязано с изменениями состояния сердечно-сосудистой системы, которые наиболее отражаются в фазовой структуре сердечного цикла в систолических фазах R-S-L-J. Представлены реальные данные, полученные с помощью серийно выпускаемого гемодинамического анализатора.

**Заключение.** В работе описан кардиометрический способ и эффективные критерии оценки возрастных изменений сердечно-сосудистой системы.

**Ключевые слова:** кардиометрия; электрокардиограмма; реограмма; сердечно-сосудистая система; долгожители.

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

**Для цитирования:** Чернов Н. Н., Руденко М. Ю. Кардиометрические исследования сердечно-сосудистой системы долгожителей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 21–34. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-21-34>

Поступила в редакцию 16.01.2025

Подписана в печать 15.02.2025

Опубликована 31.03.2025

© Чернов Н. Н., Руденко М. Ю., 2025

## Cardiometric studies of the cardiovascular system of centenarians

Nikolay N. Chernov<sup>1</sup> ✉, Mikhail Y. Rudenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southern Federal University

2 Shevchenko Str., Rostov region, Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail: nik-chernov@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** One of the key tasks of modern society is the prolongation of human life. It is important to understand the signs of aging of the body, especially its cardiovascular system. This will allow us to determine the most effective criteria for assessing age-related changes in the cardiovascular system. Therefore, consideration of real data on the state of the cardiovascular system of centenarians using cardiometric analysis will make it possible to take a step towards a real understanding of the prolongation of active longevity.

**Methods.** The cardiometric method of analyzing the phases of the cardiac cycle was used, based on the mathematical model of hemodynamics by G. Dueltsev – O. Voronova, which made it possible to evaluate the dynamic characteristics of the cardiovascular system and establish criteria for maintaining normal hemodynamics. When using cardiometry in the study of centenarians, their residence in different geographical regions, as well as the different climatic conditions of these places, were taken into account.

**Results.** Hardware and software tools for radiometric analysis of the structure of the cardiac cycle have been developed. The study examined people over the age of 90 according to indicators including metabolic and hemodynamic parameters. The imbalance of hemodynamics of the large and small circulatory circles has been established. The main reason for the change in parameters is incomplete breathing, which affects the balance of oxygen and carbon dioxide in the blood. At the same time, there was a decrease in the level of creatine phosphate in the myocardial muscles, which characterizes the energy potential of muscle contraction. This is related to changes in the state of the cardiovascular system, which are most reflected in the phase structure of the cardiac cycle in the systolic phases R-S-L-J. The real data obtained using a commercially available hemodynamic analyzer is presented.

**Conclusion.** The paper provides a method and effective criteria for assessing age-related changes in the cardiovascular system.

**Keywords:** cardiometry; electrocardiogram; rheogram; cardiovascular system; centenarians.

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

**For citation:** Chernov N.N., Rudenko M.Y. Cardiometric studies of the cardiovascular system of centenarians. *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.* 2025;15(1):21–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-21-34>

Received 16.01.2025

Accepted 15.02.2025

Published 31.03.2025

\*\*\*

### Введение

Наука о старении [1] изучает одну из наиболее важных проблему: почему одни люди живут дольше, чем другие. Исследование долголетия ведется на множестве уровней – от анализа социальных [2] и экономических условий жизни [3] до глубокого изучения

физиологических процессов, происходящих на клеточном уровне [4]. Однако, несмотря на значительные успехи, причины феномена долголетия остаются во многом неясными. Одна из основных причин – отсутствие универсальных и объективных критериев оценки здоровья, способных точно отличить здоровое

старение от патологического [6]. Стандартные медицинские показатели часто фиксируют лишь уже развившиеся заболевания, не отражая истинный потенциал организма и его резервные возможности [7]. Это подобно тому, как пытаться оценить работоспособность устройства по наличию трещин в корпусе, игнорируя его мощность и эффективность. Именно кардиометрия – метод, предлагающий комбинацию дифференциального и в то же время комплексного подхода к оценке состояния биологического объекта [8]. В отличие от многих других методов кардиометрия позволяет четко различать нормы и отклонения от них в работе сердечно-сосудистой системы, которая играет ключевую роль в обеспечении жизнедеятельности всего организма. Её показатели, такие как вариабельность сердечного ритма (ВСР), отражают адаптационные возможности организма, его способность реагировать на стресс и восстанавливаться [9]. Высокая ВСР, например, свидетельствует о хорошей адаптивности и резервах организма, в то время как низкая может свидетельствовать о снижении функциональных возможностей и предрасположенности индивида к заболеваниям. Исследования долгожителей с использованием кардиометрии открывают новые перспективы в понимании феномена долголетия [10]. Применение этого метода позволяет обнаружить характерные особенности работы сердечно-сосудистой системы у людей, достигших преклонного возраста, сохраняя при этом высокое качество жизни и активность. Анализ данных ВСР позволяет не только выявить наличие патологий, но и оценить функциональные

резервы организма, его способность противостоять старению на клеточном уровне. Помимо ВСР, современная кардиометрия включает в себя и другие инновационные методы, такие как анализ спектральной мощности сердечного ритма, позволяющий разделить ВСР на отдельные частотные компоненты, отражающие различные физиологические процессы [11]. Изучение частотных компонент предоставляет исследователю возможность получения более детального представления о состоянии вегетативной нервной системы, играющей важную роль в регуляции всех функций организма, включая иммунитет и процессы восстановления. Однако исследования в этой области все еще находятся на стадии развития [12]. Для получения убедительных выводов необходимо проведение масштабных, многоцентровых исследований с участием больших групп долгожителей и контрольных групп. Только тщательный анализ полученных данных позволит определить, являются ли обнаруженные особенности кардиометрических показателей у долгожителей причиной долголетия или же следствием других факторов, например генетической предрасположенности, образа жизни или влияния окружающей среды [13]. Тем не менее кардиометрия позволяет перейти от констатации патологий к глубокому пониманию функциональных возможностей организма и факторов, способствующих здоровому долголетию [14]. Поэтому научно-технической задачей данной работы является выявление на основе кардиометрического подхода параметров трансформаций сердечно-сосудистой системы у людей, достигших долголетия.

## Материалы и методы

Исходные данные исследования включали следующие аспекты. Кардиометрия сердечно-сосудистой системы проводилась у пациентов возрастом от 85 до 100 лет. Часть из них проживала в горных районах на высоте более 1200 метров над уровнем моря, а другая — на равнинных территориях юга России [15]. В результате кардиометрических исследований были исследованы следующие показатели сердечно-сосудистой системы [16]:

1. Метаболические процессы в мышцах сердца: лактат, креатинфосфат (КрФ) и кислород (в условных единицах).

2. Гемодинамика: процент ударного объёма SV от диастолического объёма

ранней диастолы PV1 и показатель RV1 (%):

– PV1 – объём крови, притекающий в желудочек сердца в раннюю диастолу (мл);

– PV2 – объём крови, притекающий в желудочек сердца во время систолы предсердия (мл);

– PV5 – насосная функция аорты (мл).

Системный показатель: индекс напряжённости по Р. М. Баевскому.

Измерение всех параметров проводилось по ортостатической пробе [16], результаты исследований представлены в таблице 1. В работе приведены кардиометрические записи электрокардиограмм и реограмм восьми обследованных пациентов долгожителей с характерными показателями состояния сердечно-сосудистой системы.

**Таблица 1.** Данные метаболизма, гемодинамики и системных показателей долгожителей

**Table 1.** Data on metabolism, hemodynamics and systemic indicators of centenarians

№	Ф.И.О. Страна	Год рожд.	Метаболические, гемодинамические и системные показатели								
			Лактат (3-7)	O <sub>2</sub> (0,5-0,55; 0,6-0,65; 0,7-0,85)	КрФ	RV1 (60%)	PV1	PV2	PV5	ИН (150- 300)	
1	X1 Коста-Рика	1925	39,6 20,13	0,16 0,13	0,36 2,27			+4% +28%	+13%		Лёжа Сидя
2	X2 Коста-Рика	1915	12,68	0,07	1,81			+9%			Лёжа
3	X3 Коста-Рика	1926	7,21 5,85 6,07	0,28 0,37 0,38	1,99 2,59 3,09		-24% -90% -76%	+4% +5%			Лёжа Сидя Стоя
4	X4 Коста-Рика	1919	10,61 6,09	0,07 0,15	1,05 0,75	58,24 54,20				22 18	Лёжа Сидя
5	X5 Коста-Рика	1923	5,44 3,45 5,42	0,52 0,58 0,55	6,50 6,42 5,05	48,97 49,64 45,02				213 371 273	Лёжа Сидя Стоя
6	X6 Россия	1928	7,80 4,50	0,05 0,04	1,82 2,81	71,59 70,24			+1%	728 247	Лёжа Сидя
7	X7 Россия	1924	1,79 1,98	0,77 0,77	4,03 3,02	45,35 45,32				829 1074	Лёжа Сидя
8	X8 Россия	1926	22,14 30,32	0,43 0,44	2,39 3,95	70,63 70,56				239 935	Лёжа Сидя

## Результаты и их обсуждение

В классической кардиологии отсутствует сравнительный анализ возрастных изменений, характерных для здорового сердца. Применяемые методы кардиометрии позволяют выявить новую, ранее не изученную динамику трансформаций сердечно-сосудистой системы с течением времени (табл. 1).

Рассмотрим кардиометрические записи электрокардиограмм (ЭКГ) и

реограмм (РГ) обследованных пациентов с характерными показателями состояния сердечно-сосудистой системы, которые послужили основой для получения данных о метаболизме, гемодинамике и системных показателях долгожителей.

На рисунке 1 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента Х1 (1925 г. рождения), полученные в положении лёжа.



Рис. 1. ЭКГ и РГ, пациент Х1(1925 г. рождения), полученные в положении лёжа

Fig. 1. ECG and RG, patient X1 (born in 1925), received in the supine position

Диагноз: значительно снижен коронарный кровоток, малое количество кислорода.

Следствие: удлинённая фаза Р – Q, межжелудочковая перегородка (МЖП) очень слабая. Нагрузка на систолу

предсердия (РV2). Нагрузка на аорту (РV5). Высокий лактат.

На рисунке 2 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента Х2 (1915 г. рождения), полученные в положении лёжа и сидя.

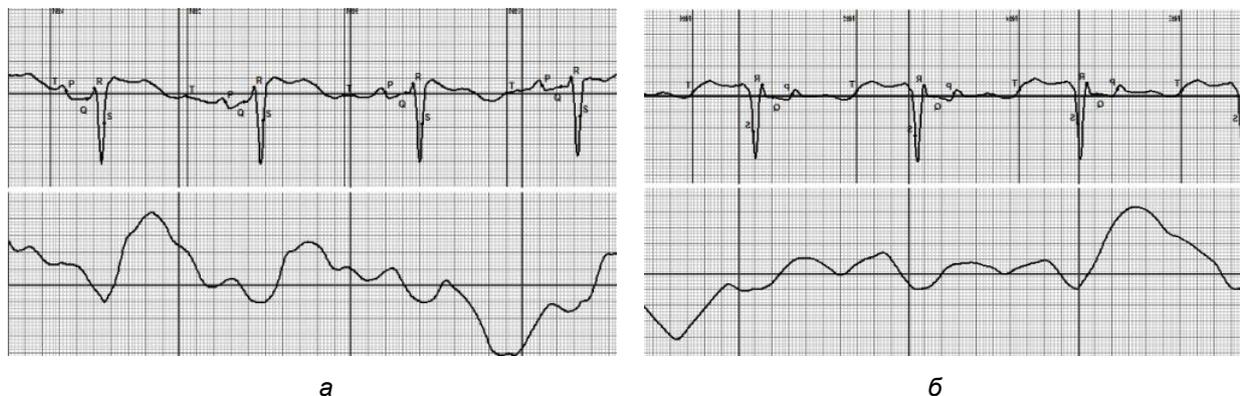


Рис. 2. ЭКГ и РГ пациента Х2 (1915 г. рождения), полученные в положении лёжа (а) и (б) сидя

Fig. 2. ECG and RG of patient X2 (born in 1915), obtained in the supine position (a) and (b) while sitting

Диагноз: мало  $\text{Ca}^{++}$ .

Следствие: коронарный кровоток ослаблен. Кислорода очень мало. Нагрузка на предсердия (PV2).

На рисунке 3 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента ХЗ (1926 г. рождения), полученные в положении лёжа (а), сидя (б) и стоя (в).



**Рис. 3.** ЭКГ и РГ пациента ХЗ (1926 г. рождения), полученные в положении лёжа (а), сидя (б) и стоя (в)

**Fig. 3.** ECG and RG of patient X3 (born in 1926), obtained in the position lying down (а), sitting (б) and (в) standing

Диагноз: эндокардит.

Следствие: снижен коронарный кровоток. Это влияет на гемодинамику и отражается в недостатке объёмов крови в ранней диастоле (PV1)

Нагрузка на предсердия (PV2).

На рисунке 4 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента Х4 (1919 г. рождения),

полученные в положении лёжа (а) и сидя (б).

Диагноз: мало  $\text{Ca}^{++}$ . Экстрасистолия, вызванная увеличением числа фибробластов в мышцах. Аорта расширена.

Следствие: мало кислорода в мышцах. КрФ мало. Малый индекс напряжённости, указывающий на тяжёлое состояние. Гемодинамика хорошая.



а



б

**Рис. 4.** ЭКГ и РГ пациента X4 (1919 г. рождения), полученные в положении лёжа (а) и сидя (б)

**Fig. 4.** ECG and RG of patient X4 (born in 1919), obtained in position lying down (a) and sitting (б)

На рисунке 5 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента X5 (1923 г. рождения), полученные в положении лёжа (а), сидя (б) и стоя (в).

Диагноз. Расширена аорта. Высокое диастолическое давление. Коронарный кровоток недостаточен.

Следствие: процент крови ранней диастолы от ударного объёма снижен (RV1). Остальные показатели в норме.

На рисунке 6 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента X6 (1928 г. рождения),

полученные в положении лёжа (а) и сидя (б).

Диагноз: низкий уровень кислорода в мышцах сердца.

Следствие: сократимость МЖП значительно снижена.

На рисунке 7 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента X7 (1924 г. рождения), полученные в положении лёжа (а) и сидя (б).

Диагноз: лактат ниже нормы.

Следствие: лактат ниже нормы указывает на слабость миокарда. Большой индекс напряжённости указывает на

перенапряжение организма в целом. Параметры гемодинамики в норме.

На рисунке 8 представлены фрагменты электрокардиограммы и реограммы пациента Х8 (1926 г. рождения),

полученные в положении А лёжа и Б сидя.

Диагноз: повышенный лактат.

Остальные параметры в пределах нормы.



а



б



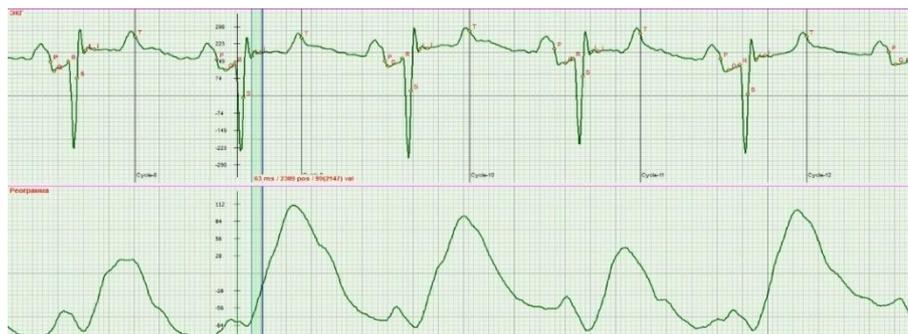
в

**Рис. 5.** ЭКГ и РГ пациента Х5 (1923 г. рождения), полученные в положении лёжа (а), сидя (б) и стоя (в)

**Fig. 5.** ECG and RG of patient X5 (born in 1923), obtained in the position lying down (a), sitting (b) and standing (c)



а



б

Рис. 6. ЭКГ и РГ пациента X6 (1928 г. рождения), полученные в положении лёжа (а) и сидя (б)

Fig. 6. ECG and RG of patient X6 (born in 1928), obtained in the supine (a) and sitting positions (б)



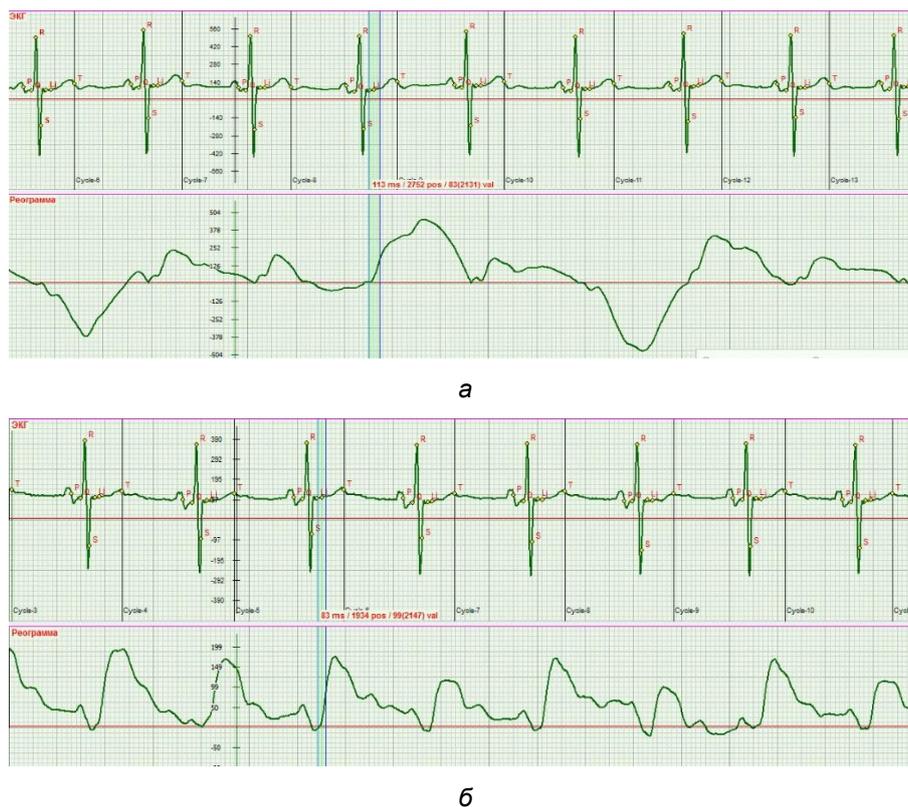
а



б

Рис. 7. ЭКГ и РГ пациента X7 (1924 г. рождения), полученные в положении лёжа (а) и сидя (б)

Fig. 7. ECG and RG of patient X7 (born in 1924), obtained in the supine (a) and sitting positions (б)



**Рис. 8.** ЭКГ и РГ пациент X8 (1926 г. рождения), полученные в положении лёжа (а) и сидя (б)

**Fig. 8.** ECG and RG of patient X8 (born in 1926), obtained in the supine (a) and sitting positions (б)

Исследования метаболизма, гемодинамики и системных показателей сердечно-сосудистой системы долгожителей кардиометрическим методом позволяют оценить трансформации в системе и выработать рекомендации по сохранению здоровья на протяжении многих лет до самого преклонного возраста.

Исходя из приведенных выше данных у обследованных групп долгожителей не выявлено четко выраженных трансформаций сердечно-сосудистой системы с течением времени. Для первых трех из восьми пациентов, проживающих в высокогорных районах, наблюдается снижение коронарного кровотока, у двух из них зафиксировано уменьшение уровня кислорода в крови. Остальные

показатели варьируются в небольших пределах у каждого участника исследования.

Большой практический интерес представляет сравнение возрастных групп жителей (X1-X5), обитающих в высокогорных районах, и жителей России (X6-X8), проживающих на равнинной местности [17].

У проживающих в высокогорных районах отмечается расширение аорты, что обусловлено гипоксией, приводящей к увеличению концентрации углекислого газа в организме, что вызывает расширение сосудов [18] и дисбаланс гемодинамики, особенно заметный при физической активности (X3 и X5) [19]. Недостаточное наполнение аорты

кровью влечет за собой снижение коронарного кровотока [20].

### Выводы

Анализ гемодинамических показателей сердечно-сосудистой системы обследованных долгожителей показал, что снижение амплитуды сокращения сердечной мышцы с возрастом связано с уменьшением общей энергии АТФ. Изменение фазовых функций сердечно-сосудистой

системы носит индивидуальный характер. У большинства обследуемых, особенно живущих в высокогорных районах, основной причиной ухудшения гемодинамики является изменение баланса кислорода и углекислого газа в крови из-за нарушения дыхания. Большая часть обнаруженных изменений в сердечно-сосудистой системе относится к возрастным, которые часто проявляются и у людей среднего возраста.

### Список литературы

1. Кардиометрия. Основы теории и практики / М. Ю. Руденко, В. А. Зернов, О. К. Воронова [и др.]. М.: Издательство Института китайской медицины, 2020. 214 с.
2. Gromov Y. Y. Gorbunov A. V. Tyutyunnik V. M. Intelligent digitalization of cardiovascular risks // *Cardiometry*. 2022. N 22. P: 77–94.
3. Тютюнник В. М. Реакция организма человека на внешние воздействия: Нобелевская премия по физиологии и медицине за 2021 год // *История науки и техники*. 2022. № 8. С. 3–10.
4. Тютюнник В. М., Бучаченко А. Л. Молекулярный механизм магнитных эффектов для выяснения магнитохимии генов // *Marcus International Symposium (Intl. symp. On Solution Chemistry Sustainable Development), SIPS 2022 by FLOGEN (Sustainability through Science & Technology)*. Mont-Royal, 2022.
5. Филиппов Ю. А. Технологии определения функционального и физиологического состояния человека // *Вестник Российского нового университета. Сложные системы: модели, анализ, управление*. 2020. № 5. С. 63–71.
6. Бучаченко А. Л., Тютюнник В. М. Новые рубежи геномной химии. Перспективные направления исследований в науке и технике / под ред. В. М. Тютюнника. Тамбов: Нобелистика, 2021. С. 144–157.
7. Анализатор гемодинамический «кардиокод» / В. А. Зернов, М. Ю. Руденко, О. Г. Дворина, Е. А. Палкин // *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2020. № 97(6-2). С. 44.
8. Сердечно-сосудистая система спортсмена. Кардиометрические характеристики физических возможностей до, во время и после занятий спортом / М. Ю. Руденко [и др.]. М.: Издательство Института китайской медицины, 2020. 160 с.

9. Норск П. Адаптация сердечно-сосудистой системы к невесомости: сюрпризы, парадоксы и последствия для дальних космических миссий // *Acta Physiol. (Oxf)*. 2020. № 228(3). P. e13434. <https://doi.org/10.1111/apha.13434>
10. Зернов В. А., Воронова О. К., Руденко М. Ю. Диагностика функций сердечно-сосудистой системы и оценка параметров гемодинамики на основе фазового анализа сердечного цикла // *Информационные процессы, системы и технологии*. 2022. № 3(24). С. 32–44.
11. Воронова О. К., Зернов В. А., Руденко М. Ю. Точное определение границы фаз быстрого и медленного изгнания на ЭКГ и уточнение местоположения точки j // *Современные технологии в медицине*. 2020. № 12(3). С. 6–11.
12. Hui Zhu, Hanqing Wang, Zhiqiang Liu. Effects of real and simulated weightlessness on the cardiac and peripheral vascular functions of humans // *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*. 2015. N 28(5). P. 793-802. <https://doi.org/10.13075/ijomh.1896.00301>
13. Новиков В. С., Сороко С. И., Шустов Е. В. Дезадаптивные состояния человека и их коррекция при экстремальных воздействиях. СПб.: Политехника-принт, 2018. С. 5–11.
14. Кардиометрическая таксономия потенциала стресс-индикаторов в различных бытовых ситуациях / А. С. Огнев, Э. В. Лихачева, В. А. Зернов [и др.] // *Кардиометрия*. 2019. № 14. С. 101-4. EDN: LNQTO
15. Reverse techniques as a means of increasing the validity of the cardio-oculometric diagnostics / E. V. Brodovskaya, A. Y. Dombrovskaya, V. A. Zernov, E. V. Lobanova, E. V. Likhacheva, L. P. Nikolaeva, A. S. Ognev, M. Y. Rudenko // *Cardiometry*. 2021. N 18. P. 33–37.
16. Рочагов А. В., Жолобов А. В., Явелов О. И. Алгоритм артериального тонометра // *Восточно-Европейский научный журнал*. 2019. № 9 (49), ч. 2. С. 38–44.
17. «Третий режим» движения крови и параметры центральной гемодинамики у детей при аппендикулярном перитоните и деструктивной пневмонии / В. А. Вечеркин, О. К. Воронова, Д. А. Тома, П. В. Коряшкин // *Детская хирургия*. 2019. № 23(4). С. 193–195.
18. Гречкина Л. И. Оценка гемодинамических показателей как потенциальных маркеров риска сердечно-сосудистой системы у молодых мужчин с разными типами саморегуляции кровообращения // *Анализ риска для здоровья*. 2019. № 1. С. 118–124.
19. Rudenko M. Yu., Zernov V. A., Voronova O. K. Mathematical model of hemodynamics // *Russian Journal of Cardiology*. 2018. Vol. 23, N 10. P. 175a-175b.
20. 2018 ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension / B. Williams, G. Mancia, W. Spiering [et al.] // *European Heart Journal*. 2018. N 39(33). P. 3021–104. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy339>

## References

1. Rudenko M.Y., Zernov V.A., Voronova O.K., et al. *Cardiometry. Fundamentals of theory and practice*. Moscow: Izdatel'stvo Instituta kitaiskoi meditsiny; 2020. 214 p. (In Russ.)
2. Gromov Y.Y. Gorbunov A.V. Tyutyunnik V.M. Intelligent digitalization of cardiovascular risks. *Cardiometry*. 2022;(22):77–94.
3. Tyutyunnik V.M. Reaction of the human body to external influences: Nobel Prize in Physiology and Medicine for 2021. *Istoriya nauki i tekhniki = History of Science and Technology*. 2022;(8):3–10. (In Russ.)
4. Tyutyunnik V.M., Buchachenko A.L. The molecular mechanism of magnetic effects for elucidating the magnetochemistry of genes. In: *Marcus International Symposium (Intl. symp. On Solution Chemistry Sustainable Development), SIPS 2022 by FLOGEN (Sustainability through Science & Technology)*. Mont-Royal; 2022.
5. Filippov Y.A. Technologies for determining the functional and physiological state of a person. *Vestnik Rossiiskogo novogo universiteta. Slozhnye sistemy: modeli, analiz, upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Complex systems: Models, Analysis, Management*. 2020;(5):63–71. (In Russ.)
6. Buchachenko A.L., Tyutyunnik V.M. New frontiers of genetic chemistry. Promising research directions in science and technology. Tambov: Nobelistics; 2021. P. 144–157. (In Russ.)
7. Zernov V.A., Rudenko M.Y., Dvorina O.G., Palkin E.A. Hemodynamic analyzer «cardiocode». *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury = Issues of Balneology, Physiotherapy and Therapeutic Physical Culture*. 2020;(97):44. (In Russ.)
8. Rudenko M.Y., et al. The cardiovascular system of an athlete. Cardiometric characteristics of physical capabilities before, during and after sports. Moscow: Izdatel'stvo Instituta kitaiskoi meditsiny; 2020. 160 p. (In Russ.)
9. Norsk P. Adaptation of the cardiovascular system to weightlessness: surprises, paradoxes and consequences for deep space missions. *Acta Physiol. (Oxf)*. 2020;(228):e13434. (In Russ.) <https://doi.org/10.1111/apha.13434>
10. Zernov V.A., Voronova O.K., Rudenko M.Yu. Diagnosis of cardiovascular system functions and assessment of hemodynamic parameters based on phase analysis of the cardiac cycle. *Informatsionnye protsessy, sistemy i tekhnologii = Information Processes, Systems and Technologies*. 2022;(3):32–44. (In Russ.)
11. Voronova O.K., Zernov V.A., Rudenko M.Yu. Precise determination of the boundary of the phases of rapid and slow expulsion on the ECG and clarification of the location of point j. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*. 2020;(12):6–11. (In Russ.)
12. Hui Zhu, Hanqing Wang, Zhiqiang Liu. Effects of real and simulated weightlessness on the cardiac and peripheral vascular functions of humans. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*. 2015;(28):793–802. <https://doi.org/10.13075/ijom.1896.00301>

13. Novikov B.C., Soroko S.I., Shustov E.B. Maladaptive human states and their correction under extreme conditions. St. Petersburg: Polytechnica-Print; 2018. P. 5–11. (In Russ.)
14. Ognev A.S., Likhacheva E.V., Zernov V.A., et al. Cardiometric taxonomy of the potential of stress indicators in various everyday situations. *Kardiometriya = Cardiometrics*. 2019;(14):101-4. (In Russ.) EDN: LNQTO
15. Brodovskaya E.V., Dombrovskaya A.Y., Zernov V.A., Lobanova E.V., Likhacheva E.V., Nikolaeva L.P., Ognev A.S., Rudenko M.Y. Reverse techniques as a means of increasing the validity of the cardio-oculometric diagnostics. *Cardiometry*. 2021;(18):33–37.
16. Rochagov A.V., Zholobov A.V., Yavelov O.I. Algorithm of arterial tonometer. *East European Scientific Journal*. 2019;(9):38–44. (In Russ.)
17. Vecherkin V.A., Voronova O.K., Toma D.A., Koryashkin P.V. The «Third mode» of blood movement and parameters of central hemodynamics in children with appendicular peritonitis and destructive pneumonia. *Detskaya khirurgiya = Pediatric Surgery*. 2019;(23):193–195. (In Russ.)
18. Grechkina L.I. Assessment of hemodynamic parameters as potential markers of cardiovascular risk in young men with different types of circulatory self-regulation. *Analiz riska dlya zdorov'ya = Health Risk Analysis*. 2019;(1):118–124. (In Russ.)
19. Rudenko M.Y., Zernov V.A., Voronova O.K. Mathematical model of hemodynamics. *Russian Journal of Cardiology*. 2018;23(10):175a–175b.
20. Williams B., Mancia G., Spiering W., et al. 2018 ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension. *European Heart Journal*. 2018;(39):3021–104. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy339>

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Чернов Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники, Южный федеральный университет, Ростовская область, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: [nik-chernov@yandex.ru](mailto:nik-chernov@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-2438-4825

**Nikolay N. Chernov**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Department of Electrohydroacoustic and Medical Technology, Southern Federal University, Rostov region, Taganrog, Russian Federation, e-mail: [nik-chernov@yandex.ru](mailto:nik-chernov@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-2438-4825

**Руденко Михаил Юрьевич**, кандидат технических наук, преподаватель, Южный федеральный университет, Ростовская область, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: [cardiocode@mail.ru](mailto:cardiocode@mail.ru), ORCID: 0000-0002-1860-3454

**Mikhail Y. Rudenko**, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer, Southern Federal University, Rostov region, Taganrog, Russian Federation, e-mail: [cardiocode@mail.ru](mailto:cardiocode@mail.ru), ORCID: 0000-0002-1860-3454

### Способ тактовой синхронизации для демодуляторов сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией

Д. С. Коптев<sup>1</sup> ✉, Довбня В. Г.<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

#### Резюме

**Целью исследования** является разработка способа восстановления тактовой синхронизации для демодуляторов сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией.

**Методы исследования** опираются на основы квазиоптимального приёма многопозиционных сигналов, теорию построения радиоприёмных систем цифровых линий связи, методы математического моделирования сигналов, теорию вероятности и математическую статистику. Используются известные алгоритмы оценки фазы тактового колебания при наличии манипуляционной помехи, обусловленной многоуровневой модуляцией сигнала. Допущено предположение, что канал удовлетворяет условиям Найквиста, а искажающая сигнал помеха является аддитивным белым гауссовским шумом.

**Результаты.** Осуществлена разработка способа восстановления тактовой синхронизации, заключающегося в использовании решений и приведении каждой пары смежных символов к бинарному сигналу путем их центрирования относительно нулевой точки и весового взвешивания по уровню. Представлены аналитические зависимости оценки фазы для устройства тактовой синхронизации, а также структурно-функциональные схемы реализации различных вариантов построения данного устройства в составе демодуляторов многопозиционных сигналов с квадратурной-амплитудной манипуляцией. Полученные графики составляющих флуктуационной характеристики дискриминатора устройства тактовой синхронизации свидетельствуют о том, что разработанный алгоритм позволяет разрешить противоречие между снижением манипуляционной составляющей и ростом шумовой составляющей флуктуационной характеристики.

**Заключение.** С точки зрения помехоустойчивости оптимальной является когерентная демодуляция сигналов, однако при этом необходима тактовая (фазовая) синхронизация опорного генератора демодулятора с принимаемым сигналом, а именно обеспечение совпадения во времени тактовых импульсов в решающем устройстве с моментами окончания информационных символов. Применение разработанного способа, как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволило примерно от 0,5 до 0,7 дБ повысить помехоустойчивость демодулятора радиоприемных систем цифровых линий связи.

**Ключевые слова:** радиоприёмная система; квадратурная амплитудная манипуляция; демодулятор; устройство тактовой синхронизации; время запаздывания; дискриминатор; флуктуационная характеристика; алгоритм функционирования.

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

**Для цитирования:** Коптев Д. С., Довбня В. Г. Способ тактовой синхронизации для демодуляторов сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 35–50. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-35-50>

Поступила в редакцию 14.01.2025

Подписана в печать 12.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## Clock synchronization method for quadrature amplitude keyed signal demodulators

Dmitry S. Koptev<sup>1</sup>✉, Vitaly G. Dovbnya<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

### Abstract

**The purpose of the research** is to develop a method for restoring clock synchronization for signals demodulators with square amplitude manipulation.

**Methods** are based on the foundations of quasi-optimal receipt of multi-position signals, the theory of constructing radio-receiving systems of digital communication lines, methods of mathematical modeling of signals, probability theory and mathematical statistics. The well-known algorithms for assessing the phase of clusion of clusion in the presence of manipulation interference, due to a multi-level signal modulation, were used. The assumption was assumed that the channel satisfies the conditions of Naquvist, and the distorting hindrance signal is an additive white Gaussian noise.

**Results.** The development of a method for restoring clock synchronization is implemented, which consists in using solutions and reducing each pair of adjacent symbols to a binary signal by centering them relative to the zero point and weighting by level. Analytical dependences of the phase estimate for the clock synchronization device are presented, as well as structural and functional diagrams of the implementation of various options for constructing this device as part of demodulators of multi-position signals with quadrature-amplitude manipulation. The obtained graphs of the components of the fluctuation characteristic of the discriminator of the clock synchronization device indicate that the developed algorithm allows resolving the contradiction between the reduction of the manipulation component and the growth of the noise component of the fluctuation characteristic.

**Conclusion.** From the point of view of the noise immunity of the optimal, coherent demodulation of signals is, however, a clock (phase) synchronization of the reference generator of the demodulator with the received signal, namely ensuring the coincidence of clock impulses in the decisive device with the ends of the end of information symbols. The use of the developed method, as shown by the results of theoretical and experimental studies, allowed about 0.5 to 0.7 dB to increase the noise resistance of the demodulator of radio-receiver systems of digital communication lines.

**Keywords:** adio receiving system; quadrature amplitude manipulation; demodulator; clock synchronization device; delay time; discriminator; fluctuation characteristic; operating 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:** Koptev D.S., Dovbnya V.G. Clock synchronization method for quadrature amplitude keyed signal demodulators. *Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priboroostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(1):35–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-35-50>

Received 14.01.2025

Accepted 12.02.2025

Published 31.03.2025

\*\*\*

## Введение

Установлено, что устройство тактовой синхронизации (УТС) оказывает значительно меньшее влияние на помехоустойчивость радиоприёмных систем по сравнению с устройством восстановления несущего колебания, при этом усложнение сигналов, используемых источниками радиоизлучений, объективно обуславливает необходимость повышения требований к качеству функционирования УТС [1]. Кроме того, наличие межсимвольной помехи, возникающей вследствие особенностей функционирования адаптивного корректора радиоприёмной системы, оптимизирующего импульсную характеристику непрерывного канала только в отсчетных точках, значительно усложняют условия функционирования УТС [2].

Анализ известных способов восстановления тактовой (символьной) синхронизации многопозиционных сигналов КАМ [3] показывает, что их применение не обеспечивает высокой точности оценки фазы тактового колебания вследствие наличия манипуляционной помехи, обусловленной многоуровневой модуляцией сигнала.

Тактовую синхронизацию в классической постановке можно рассматривать как задачу оптимального оценивания значений постоянной времени запаздывания видеосигнала на фоне аддитивной

помехи [4]. При этом предполагается, что канал является «найквистовским», а искажающая сигнал помеха представляет собой аддитивный белый гауссовский шум. Такое представление помехи практически корректно, поскольку достаточно точно описывает суммарный результат воздействия большого числа независимых помех и значительно упрощает процедуру синтеза [5].

## Материалы и методы

Так как распределение постоянной времени запаздывания при  $\tau \in [0, T]$  принимаемой реализации сигнала  $U(t)$  априори не известно, то в качестве критерия оптимальности при синтезе УТС целесообразно применить критерий максимума правдоподобия [6]. В данном случае предпочтительна эффективная оценка, которая является решением уравнения правдоподобия:

$$\frac{d \ln P[U(t) / \tau]}{d\tau} = 0. \quad (1)$$

Алгоритм оптимальной тактовой синхронизации может быть получен из уравнения (1) разложением  $\ln P[U(t) / \tau]$  в ряд Тейлора и использованием первых трех членов ряда:

$$\hat{\tau} = \frac{\left. \frac{d}{d\tau} \ln P[U(t) / \tau] \right|_{\tau=\hat{\tau}}}{\left. \frac{d^2}{d\tau^2} \ln P[U(t) / \tau] \right|_{\tau=\hat{\tau}}}. \quad (2)$$

Устройство, реализующее этот алгоритм, должно содержать следующие элементы:

– блок дискриминатора, вычисляющий значение первой производной функции правдоподобия:

$$z(\tau, t) = \frac{d}{d\tau} \ln P[U(t) / \tau] \Big|_{\tau=\hat{\tau}} ; \quad (3)$$

– блок точности, вычисляющий значение второй производной функции правдоподобия:

$$k(\tau, t) = \frac{d^2}{d\tau^2} \ln P[U(t) / \tau] \Big|_{\tau=\hat{\tau}} ; \quad (4)$$

– арифметический блок, реализующий вычисление выражения:

$$\hat{\tau} = z(\tau, t) / k(\tau, t) ; \quad (5)$$

– блок фильтрации, обеспечивающий формирование  $\tau_R$  (рис. 1).

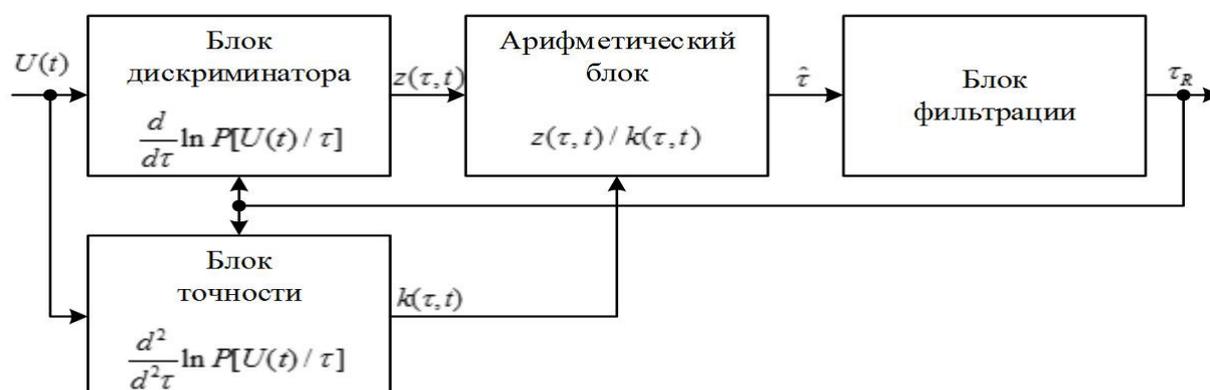


Рис. 1. Структурная схема оптимального УТС [7]

Fig. 1. Structural diagram of the optimal CSD [7]

Если все параметры сигнала  $U(t)$ , кроме  $\tau$ , известны или же предварительно осуществлена их оценка, что имеет место на практике, а шум стационарен, то коэффициент  $k(t)$  может быть учтен в блоке дискриминатора в виде константы  $K = 1/\langle k(t) \rangle$ . При этом блок точности из схемы УТС может быть исключен [8].

Представим входной сигнал устройства тактовой синхронизации на  $k$ -м интервале следующим выражением:

$$U(t) = \sum_{k=0}^{N-1} U_r(t-kT) = \sum_{k=0}^{N-1} S_r(t-kT) + n(t), \quad (6)$$

где  $N$  – число принимаемых символов;  $S_r(t-kT) = a_r^{(k)} G_\Sigma(t-kT)$  – реализация сигнала, соответствующая  $r$ -му символу алфавита  $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_L\}$  объемом  $L$ ;  $a_r^{(k)} = d(2r-1-L)$  – амплитуда  $r$ -й реализации сигнала на  $k$ -м интервале;  $G_\Sigma(t)$  – сигнал, определяющий форму огибающей реализации сигнала;  $d$  – половина расстояния между уровнями амплитуд;

$T$  – длительность символа;  $n(t)$  – аддитивный белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью мощности  $N_0$  [9].

В этом случае функцию правдоподобия для многопозиционного сигнала можно записать в виде

$$P[U(t)/\tau] = \prod_{k=1}^N P[(t-kT)/\tau], \quad (7)$$

где

$$P[U(t-kT)/\tau] = C \sum_r \exp \times \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - a_r^{(k)} G_\Sigma [t - (k-1)T - \tau]]^2 dt \right\}; \quad (8)$$

$C$  – константа.

Реализация оптимальной УТС в соответствии с выражениями (2), (7) и (8) затруднительна ввиду невозможности их аппроксимации относительно простыми функциями [10]. Кроме того, оцениваемый параметр входит в пределы интеграла в выражении (8). Наличие случайного параметра  $a_r^{(k)}$  в этих выражениях приводит к необходимости усреднения функции правдоподобия по этому параметру. Наряду со сложностью практической реализации это усреднение приводит к появлению модуляционной

помехи, которая хотя и фильтруется линейными сглаживающими цепями, но в некоторых практических случаях может вызвать необходимость использования УТС с астатизмом более высокого порядка, что является нежелательным [11].

Использование в данном случае решений об амплитуде  $a_r^{(k)}$ , принимаемой реализации сигнала, позволяет значительно упростить процедуру синтеза УТС и минимизировать величину модуляционной помехи [12].

Пусть известна оценка случайной величины  $a_r^{(k)}$  на каждом тактовом интервале. Тогда информация о метке  $\tau$  (момента смены символов) может быть получена, если имеется реализация сигнала на протяжении хотя бы двух символов. В этом случае для нахождения метки можно применить попарную обработку принимаемых реализаций сигналов, т. е.  $U[t - (k-1)T]$  и  $U(t - kT)$ ,  $U(t - kT)$  и  $U[t - (k+1)T]$  и т. д. [13].

Перейдем от многоуровневого сигнала к бинарному, для этого каждую из пар символов отцентрируем относительно нулевой точки и отнормируем по уровню.

Тогда выражение (8) может быть записано в виде

$$P[U(t-kT)/\tau] = C \sum_r \exp \times \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [C_k [U(t) - \Delta_k] - b_k G_\Sigma [t - (k-1)T - \tau]]^2 dt \right\}, \quad (9)$$

где

$$\Delta_k = G_\Sigma(0, 5T)(\hat{a}_k + \hat{a}_{k-1}), \quad (10)$$

$$C_k = \begin{cases} 0, & \hat{a}_k = \hat{a}_{k-1}, \\ \frac{2}{|\hat{a}_k - \hat{a}_{k-1}|}, & \hat{a}_k \neq \hat{a}_{k-1}, \end{cases} \quad (11)$$

$$b_k = \text{sgn}(\hat{a}_k), \quad (12)$$

$\hat{a}_k, \hat{a}_{k-1}$  – оценки амплитуды реализации сигнала на  $k$ -м и  $k-1$  интервале со средними значениями:

$$\langle \hat{a}_k \rangle = -\sum_l \text{erf} \left\{ \frac{\eta h}{\sqrt{2}} [l - a_k G_\Sigma(t - kT - \tau)] \right\}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [C_k[U(t) - \Delta_k] - b_k \cdot G_\Sigma[t - (k-1)T - \tau]]^2 dt &= -\frac{C_k^2}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - \Delta_k]^2 dt + \\ &+ \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - \Delta_k] \cdot b_k \cdot G_\Sigma[t - (k-1)T - \tau] dt - \frac{1}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} G_\Sigma^2[t - (k-1)T - \tau] dt. \end{aligned} \quad (15)$$

В правой части равенства (15) первое и третье слагаемые не зависят от  $\tau$  и поэтому в исходной формуле (9) могут быть включены в постоянную  $C$ .

$$P[U(t) / \tau] = C \prod_{k=1}^N \text{ch} \left\{ \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - \Delta_k] \cdot G_\Sigma[t - (k-1)T - \tau] dt \right\}. \quad (16)$$

Подставляя выражение (15) в (6) и учитывая, что производные от  $\ln(x)$  и  $\text{ch}(x)$  равны соответственно  $x^{-1}$  и  $\text{sh}(x)$

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_k &= \text{th} \left\{ \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - \Delta_k] \cdot G_\Sigma[t - (k-1)T - \tau] dt \right\} \times \\ &\times \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - \Delta_k] \cdot G'_\Sigma[t - (k-1)T - \tau] dt. \end{aligned} \quad (17)$$

Преобразование статистики  $\prod_{k=1}^N ( )$

в статистику  $\sum_{k=1}^N ( )$  вместе с константой

$$\langle \hat{a}_{k-1} \rangle = -\sum_l \text{erf} \left\{ \frac{\eta h}{\sqrt{2}} [l - a_k G_\Sigma(t - (k-1)T - \tau)] \right\}. \quad (14)$$

Преобразуем выражение под знаком экспоненты в формуле (9) следующим образом:

Тогда выражение для функции правдоподобия сигнала примет следующий вид:

[14], получим выражение, определяющее построение оптимального дискриминатора УТС:

$C$  в дальнейшем целесообразно отнести к линейным сглаживающим цепям [15].

### Результаты и их обсуждение

Рассмотрим функциональную схему оптимального УТС (рис. 2).

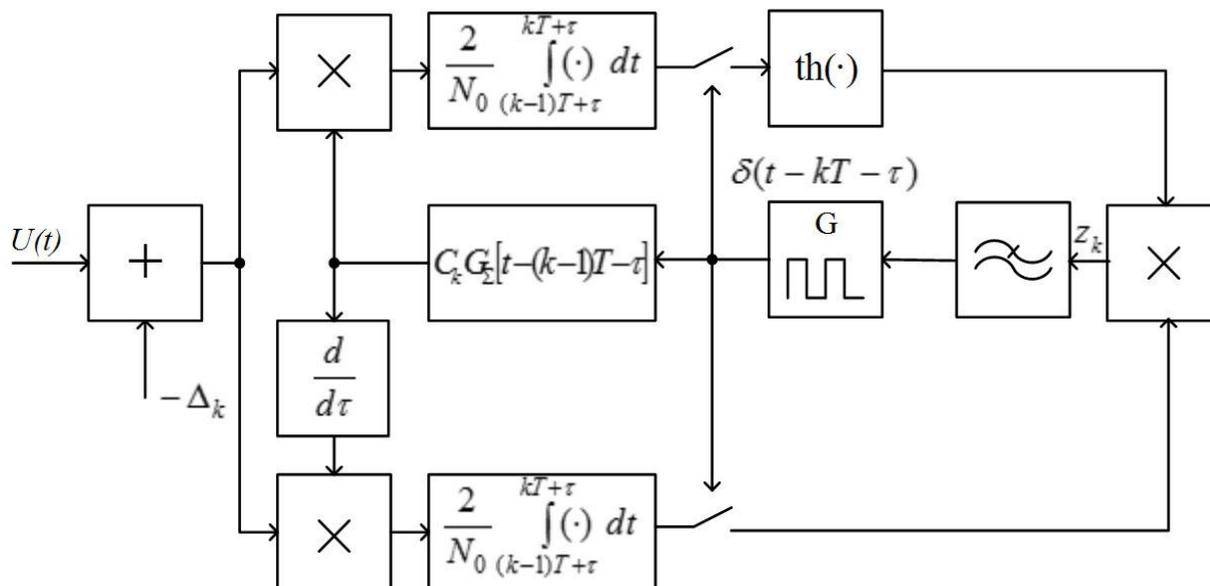


Рис. 2. Функциональная схема оптимального УТС

Fig. 2. Functional diagram of the optimal CSD

Реализация оптимального УТС в соответствии с выражением (17) связана со значительными вычислительными

затратами. Замена операции дифференцирования конечной разностью позволят упростить данное выражение:

$$\hat{\tau}_k = \text{th} \left\{ \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - \Delta_k] \cdot G_{\Sigma} [t - (k-1)T - \tau] dt \right\} \times \frac{C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau-\tau_1}^{kT+\tau+\tau_1} [U(t) - \Delta_k] \cdot \frac{G_{\Sigma} [t - (k-1)T - \tau - \tau_1] - G_{\Sigma} [t - (k-1)T - \tau + \tau_1]}{\tau_1} dt. \tag{18}$$

Учитывая линейность обработки в сглаживающих цепях, воспользуемся методом, позволяющим перегруппировать последовательность значений выходного сигнала дискриминатора  $z(t)$  [16].

Тогда выражение (13) для  $L$ -уровневого сигнала с прямоугольной формой огибающей  $G_{\Sigma}(t) = \text{const}$  может быть записано в виде

$$\hat{\tau}_k = [\text{th}(J_k) - \text{th}(J_{k-1})] \times \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau-\tau_1/2}^{(k-1)T+\tau+\tau_1/2} \frac{U(t) - \Delta_k}{\tau_1} dt, \tag{19}$$

где

$$J_k = \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau}^{kT+\tau} [U(t) - \Delta_k] dt. \tag{20}$$

Функциональная схема УТС с дискриминатором, описываемым выражением (19), представлена ниже (рис. 3).

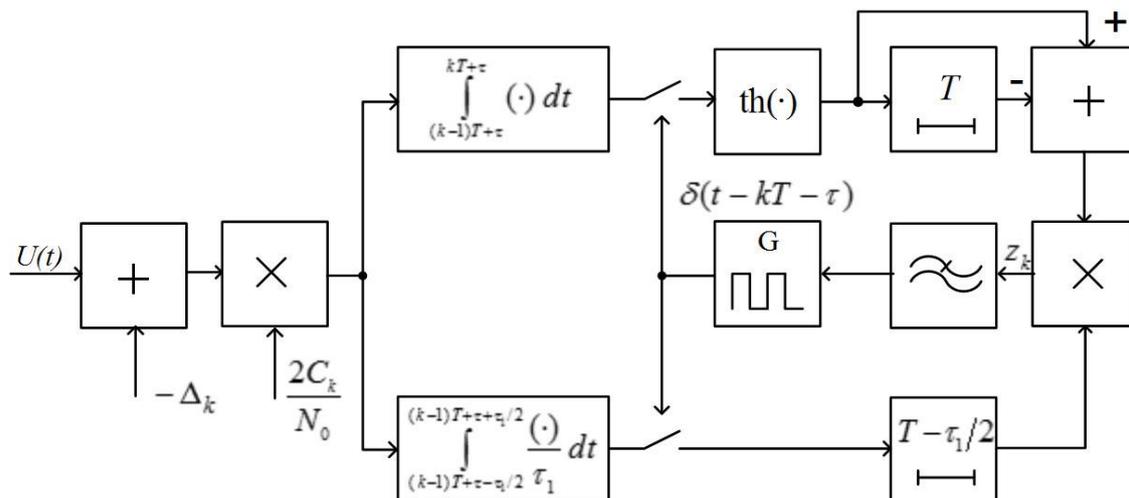


Рис. 3. Функциональная схема УТС, реализующего алгоритм (19)

Fig. 3. Functional diagram of the CSD implementing the algorithm (19)

Для достаточно высокого отношения сигнал / шум функции  $\text{th}(\cdot)$  в выражении (13) можно заменить знаковыми  $\text{sgn}(\cdot)$ :

$$\hat{\tau}_k = [\text{sgn}(J_k) - \text{sgn}(J_{k-1})] \times \frac{2C_k}{N_0} \int_{(k-1)T+\tau-\tau_1/2}^{(k-1)T+\tau+\tau_1/2} \frac{U(t) - \Delta_k}{\tau_1} dt. \quad (21)$$

Поскольку первый множитель в выражении (21) определяет знак изменения амплитуды между парными символами, его можно заменить эквивалентно функцией

$$I_k = \text{sgn}(\hat{a}_k - \hat{a}_{k-1}), \quad (22)$$

что позволит существенно упростить выражение (21):

$$\hat{\tau}_k = \frac{2C_k I_k}{N_0} \left\{ \int_{(k-1)T+\tau-\tau_1/2}^{(k-1)T+\tau+\tau_1/2} \frac{U(t)}{\tau_1} dt - \Delta_k \right\}. \quad (23)$$

В работе [3] отмечается, что при ошибке временной синхронизации меньше, чем длительности фронта и

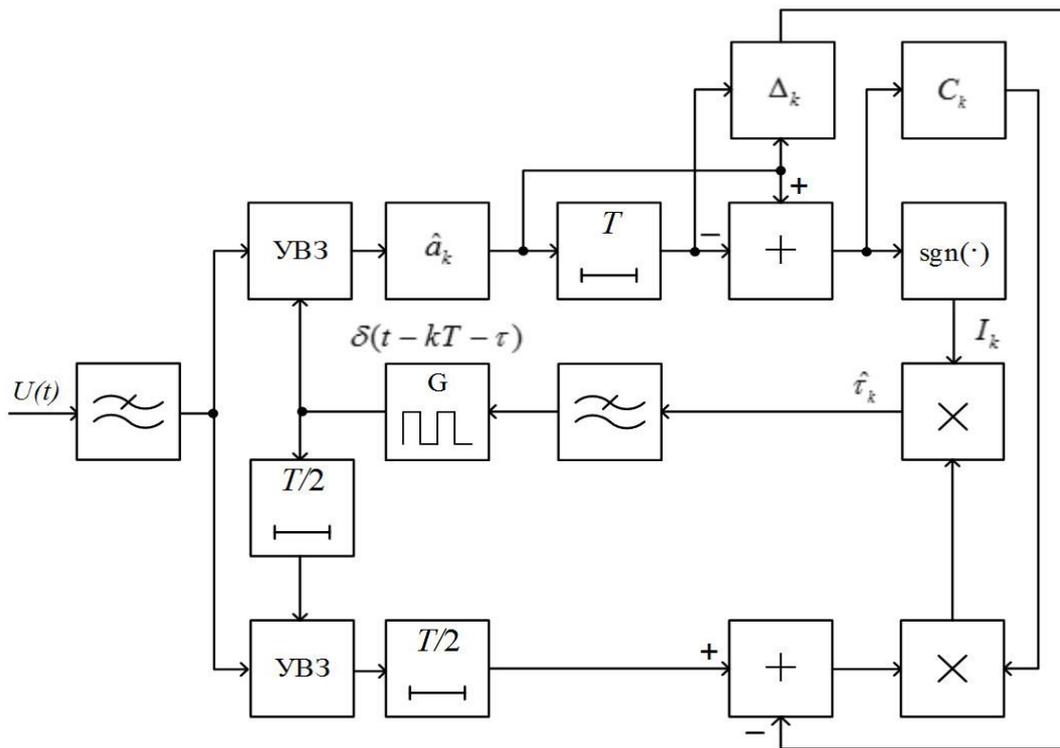
среза импульсов информационной последовательности, операции интегрирования входной смеси в течение  $\tau_1$ , а также в течение длительности символа могут быть заменены взятием мгновенных отсчетов сигнала на выходе согласованного фильтра [17].

Тогда алгоритм функционирования УТС может быть записан в виде

$$\hat{\tau}_k = C_k I_k \{U[(k-0,5)T - \tau] - \Delta_k\}. \quad (24)$$

Рассмотрим функциональную схему УТС, реализующую алгоритм (24), (рис. 4).

Характеристики представленного устройства тактовой синхронизации будут близки к оптимальным только при достаточно большом отношении сигнал / шум, поскольку сигнал ошибки  $Z_k$  для всех реализаций сигнала имеет одинаковый вес, что является следствием стремления минимизировать манипуляционную помеху.



УВЗ – устройство выборки-запоминания

Рис. 4. Функциональная схема UTC-1, реализующего алгоритм (24)

Fig. 4. Functional diagram of CSD-1, implementing algorithm (24)

Указанный недостаток можно устранить, если последовательность значений выходного сигнала дискриминатора  $z_k$  перегруппировать в  $L-1$  групп, каждая из которых соответствует паре символов  $|\hat{a}_k - \hat{a}_{k-1}| = 2dm$ , где  $m = 1, 2, \dots, L - 1$ , и каждой паре поставить в соответствие свой весовой коэффициент  $C_m$  (например, 0 или 1):

$$\hat{\tau}_k = C_m I_k \{U[(k-0,5)T - \tau] - \Delta_k\}, \quad (25)$$

где

$$C_m = \begin{cases} 0, & |\hat{a}_k - \hat{a}_{k-1}| < d(0,5L-1), \\ 1, & |\hat{a}_k - \hat{a}_{k-1}| \geq d(0,5L-1). \end{cases} \quad (26)$$

Это позволит минимизировать дисперсию сигнала ошибки, тем самым

повысив качество функционирования устройства тактовой синхронизации. Функциональная схема UTC, реализующего алгоритм (25), представлена (рис. 5).

Реализация UTC в соответствии с выражениями (24) и (25) связана с существенными аппаратными затратами. Для КАМ-сигналов с позиционностью не выше 64 значение коэффициента  $C_k$  можно положить равным единице [18]:

$$\hat{\tau}_k = I_k \{U[(k-0,5)T - \tau] - \Delta_k\}. \quad (27)$$

Это хотя и приведет к возрастанию внутрисистемной манипуляционной помехи, но позволит существенно упростить реализацию UTC (рис. 6).

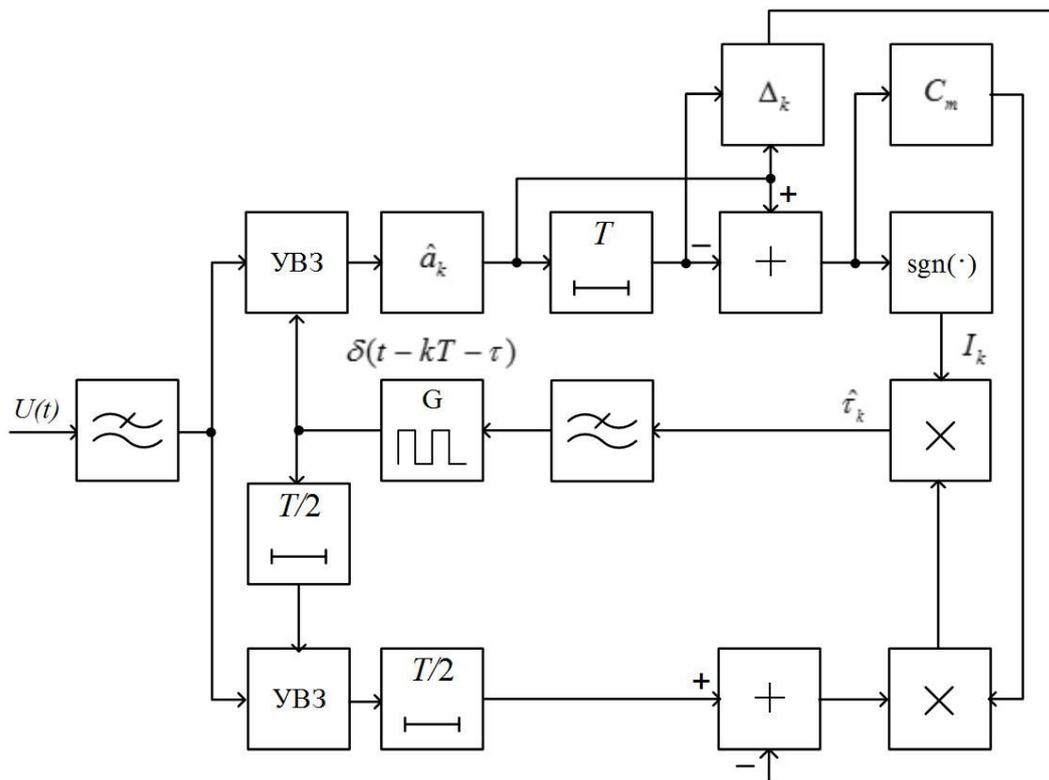


Рис. 5. Функциональная схема UTC-2, реализующего алгоритм (25)

Fig. 5. Functional diagram of CSD-2, implementing algorithm (25)

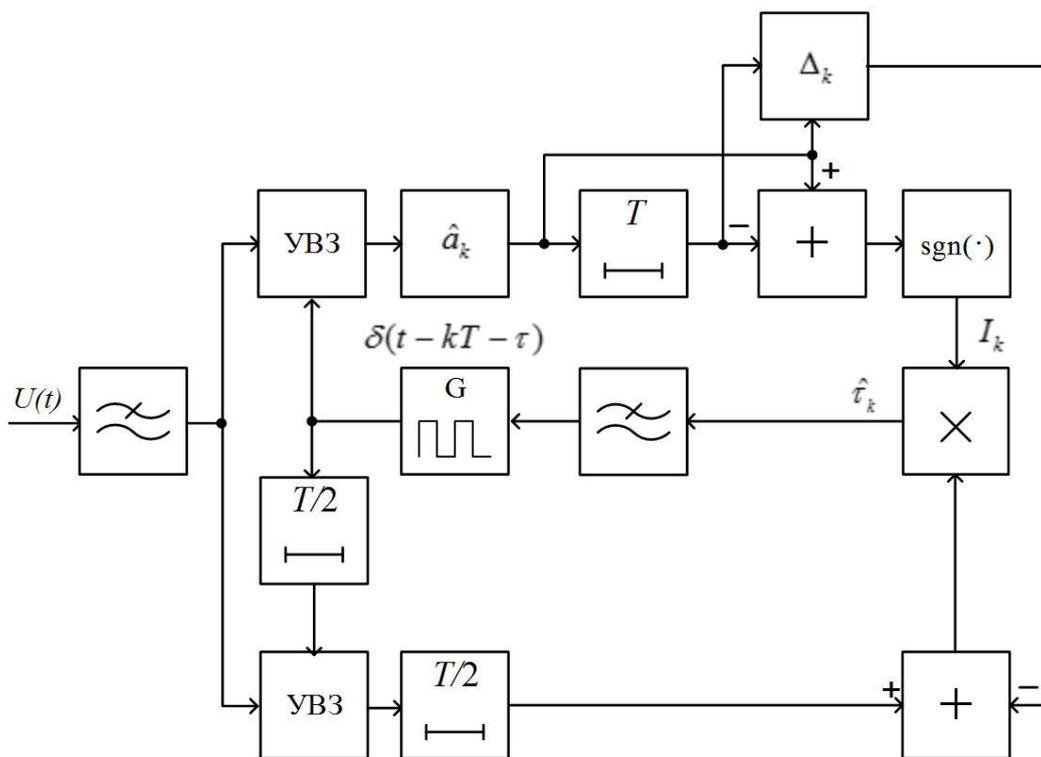
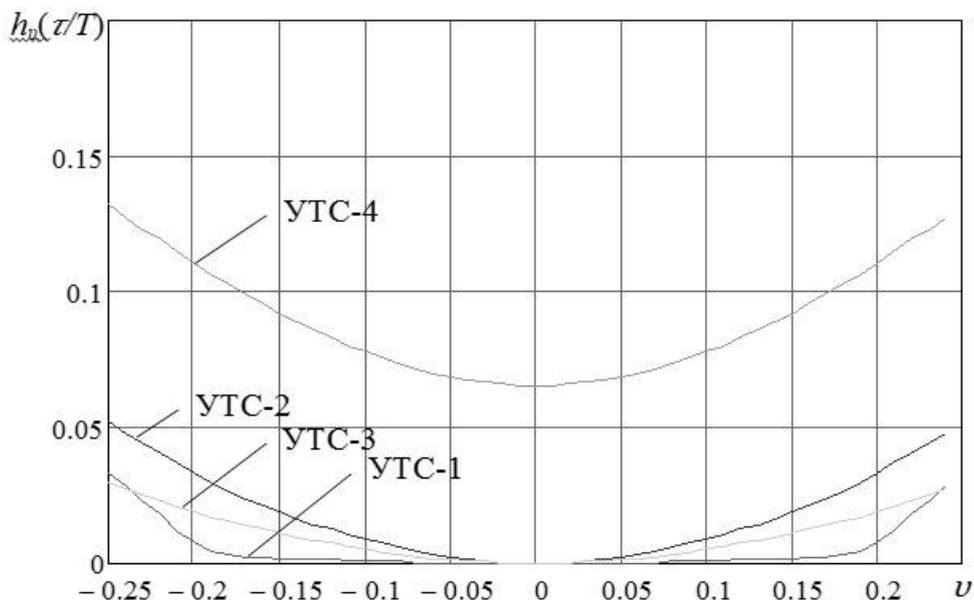


Рис. 6. Функциональная схема UTC-3, реализующего алгоритм (27)

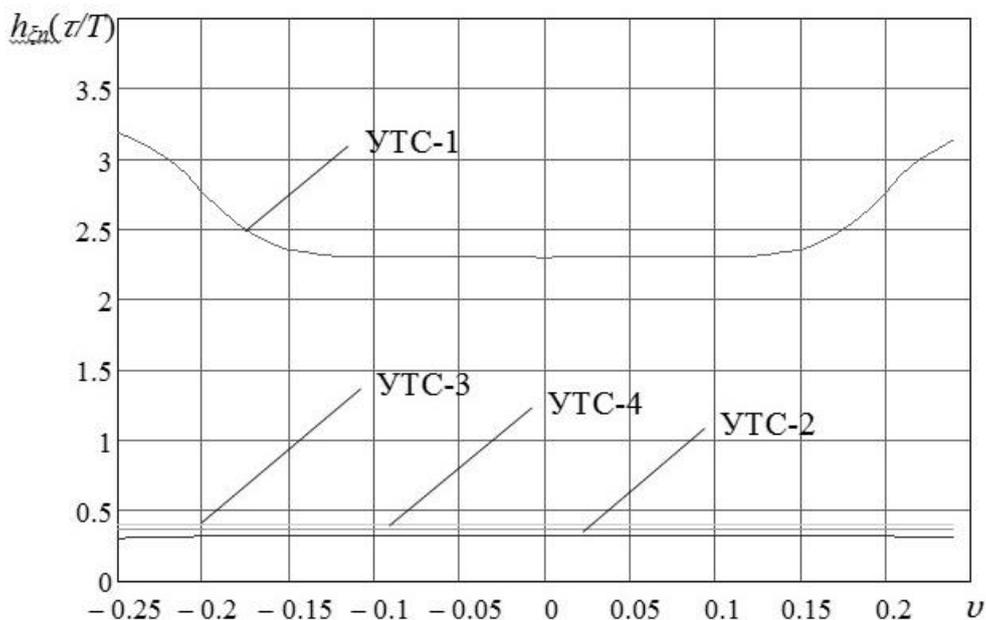
Fig. 6. Functional diagram of CSD-3, implementing algorithm (27)

Рассмотрим результаты расчета манипуляционной и нормированной шумовой составляющих флуктуационной характеристики дискриминаторов устройств тактовой синхронизации,

реализующих алгоритмы (19), (24), (25), (27) для сигнала КАМ-256, отношения сигнал / шум 30 дБ и найквистовского канала с  $\alpha = 0,5$  (рис. 7).



а



б

**Рис. 7.** Составляющие флуктуационной характеристики дискриминатора UTC: а – манипуляционная; б – нормированная шумовая

**Fig. 7.** Components of the fluctuation characteristic of the CSD discriminator: а – manipulation; б – normalized noise

Для сравнения приведены составляющие флуктуационной характеристики для устройства тактовой синхронизации УТС-4 (рис. 8), ориентированного на

обработку двухуровневого сигнала в соответствии с алгоритмом:

$$\hat{\tau}_k = I_k U[(k-0,5)T - \tau]. \quad (28)$$

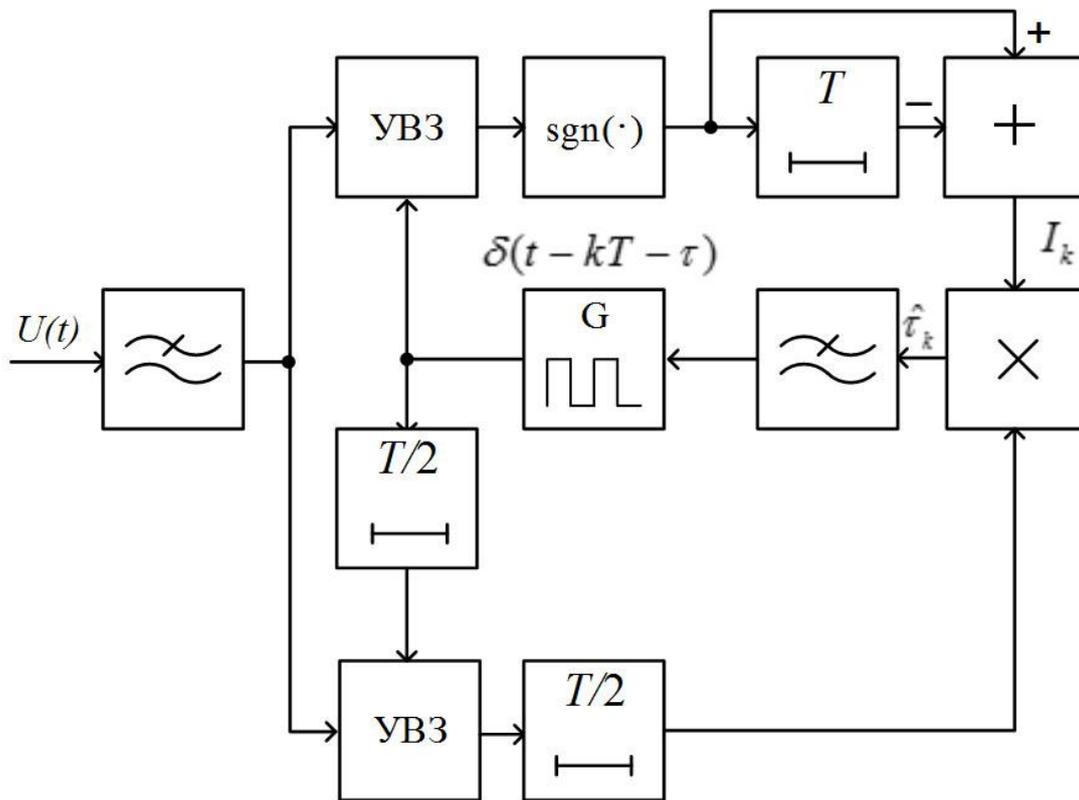


Рис. 8. Функциональная схема УТС-4, реализующего алгоритм (28)

Fig. 8. Functional diagram of CSD-4, implementing algorithm (28)

Приведенные на рисунке 7 графики свидетельствуют о том, что дискриминатор устройства тактовой синхронизации, реализующего алгоритм (19), позволяет разрешить противоречие между снижением манипуляционной составляющей и ростом шумовой составляющей флуктуационной характеристики.

## Выводы

Таким образом, предложенный способ тактовой синхронизации, заключающийся в использовании решений и

приведении каждой пары смежных символов к бинарному сигналу путем их центрирования относительно нулевой точки и весового взвешивания, обеспечивает более эффективную оценку момента принятия решения.

Применение разработанного способа, как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволило примерно от 0,5 до 0,7 дБ повысить помехоустойчивость демодулятора радиоприемных систем цифровых линий связи.

### Список литературы

1. Варианты реализации устройств восстановления тактовых сигналов и данных в составе КМОП высокоскоростных приемопередатчиков последовательных каналов. Обзор / Н. Ю. Раннев, С. В. Кондратенко, В. Д. Байков [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2024. Т. 29, № 3. С. 346–361. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-346-361>
2. Филимонов В. А., Усов Н. А., Остроумов О. А. Алгоритмы получения символьной синхронизации при использовании цифровой обработки сигналов // I-methods. 2023. Т. 15, № 3. С. 1–18.
3. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприемных систем цифровых линий связи: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2017. 175 с.
4. Система алгоритмов цифровой обработки сигнала для когерентной оптической связи / Т. О. Базаров, М. А. Сенько, Л. А. Самоделкин [и др.] // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, № 6. С. 894–912. <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.06.58131.3-24>
5. Рысин А. В., Бойкачев В. Н., Островский Я. Б. Оптимизация частотной и символьной синхронизации в режиме когерентного накопления по псевдослучайным кодам с целью улучшения помехозащищенности и получением максимальной чувствительности по принимаемому сигналу для управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) // Актуальные исследования. 2023. № 33(163). С. 17–35.
6. Лобатый А. А., Бумай А. Ю. Особенности построения алгоритмов оценивания параметров многомерных случайных процессов // Системный анализ и прикладная информатика. 2020. № 1. С. 24–32. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2020-1-24-32>
7. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Способы восстановления несущего колебания для демодуляторов сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Телекоммуникации. 2020. № 8. С. 2–7.
8. Покровский П. С., Кириллов С. Н. Фазовый дискриминатор для радиосигналов с управляемой связью между синфазной и квадратурной составляющими // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 3–11. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-65-3-3-11>
9. Межетов М. А., Туринцев С. В. Выделение сигналов тактовой синхронизации в системах передачи информации режима VDL-2 // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2017. № 2. С. 191–200.
10. Кириллов С. Н., Покровский П. С. Двухкритериальный синтез шестнадцатипозиционных радиосигналов с управляемой связью между синфазной и квадратурной составляющими // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 18–25.

11. Прокофьев И. А., Османов Р. А. Особенности формирования имитирующих помех на основе комплексной многоканальной модуляции // Аллея науки. 2020. Т. 1, № 7(46). С. 285–292.
12. Метод оценки помехоустойчивости цифровых систем передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии стационарных помех / В. В. Зеленевский, М. С. Черноусов, А. В. Зеленевский, Ю. В. Зеленевский // Известия Института инженерной физики. 2020. № 4(58). С. 31–36.
13. 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. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(17\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202009(17)-03)
14. Фомин В. И. Об операторных функциях операторного переменного // Вестник российских университетов. Математика. 2023. Т. 28, № 141. С. 68–89. <https://doi.org/10.20310/2686-9667-2023-28-141-68-89>
15. Сравнительный анализ цифровых и цифро-аналоговых синтезаторов частот и сигналов / И. В. Рябов, Е. С. Клюжев, И. В. Стрельников, П. М. Юрьев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2019. Т. 75, № 1. С. 96–103.
16. Баранов И. А., Скурнович А. В. Алгоритм обеспечения целостности, согласованности и непротиворечивости данных, описывающих родственные отношения // Телекоммуникации. 2018. № 3. С. 2–9.
17. Анализ эффективности пространственной фильтрации сигналов на выходе фотоприёмного устройства с режимом временной задержки и накопления / Б. Н. Дрожников, К. В. Козлов, П. А. Кузнецов, В. Н. Соляков // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3, № 6. С. 566–572.
18. Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 21–35.

## Reference

1. Rannev N.Y., Kondratenko S.V., Baykov V.D., et al. Implementation options for clock and data recovery devices as part of CMOS high-speed serial channel transceivers. Review. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2024; 29(3):346–361. (In Russ.) <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-346-361>
2. Filimonov V.A., Usov N.A., Ostroumov O.A. Algorithms for obtaining symbolic synchronization using digital signal processing. *I-methods*. 2023;15(3):1–18. (In Russ.)

3. Dovbnya V.G., Asiantsev V.E., Mikhailov S.N. Noise immunity of radio receiving systems of digital communication lines. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2017. 175 p. (In Russ.)

4. Bazarov T.O., Senko M.A., Samodelkin L.A., et al. A system of digital signal processing algorithms for coherent optical communication. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2024; 94(6):894–912. (In Russ.) <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.06.58131.3-24>

5. Rysin A.V., Boykachev V.N., Ostrovsky Y.B. Optimization of frequency and symbolic synchronization in the mode of coherent accumulation using pseudorandom codes in order to improve noise immunity and obtain maximum sensitivity to the received signal for controlling unmanned aerial vehicles (UAVs). *Aktual'nye issledovaniya = Current Research*. 2023;(33):17–35. (In Russ.)

6. Lobaty A.A., Bumai A.Y. Features of constructing algorithms for estimating the parameters of multidimensional random processes. *Sistemnyj analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Informatics*. 2020;(1):24–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2020-1-24-32>

7. Dovbnya V.G., Koptev D.S. Methods of carrier oscillation recovery for signal demodulators with quadrature amplitude manipulation. *Telekommunikacii = Telecommunications*. 2020;(8):2–7. (In Russ.)

8. Pokrovsky P.S., Kirillov S.N. Phase discriminator for radio signals with controlled coupling between common-mode and quadrature components. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2018;(65):3–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-65-3-3-11>

9. Mezhetov M.A., Turintsev S.V. Allocation of clock synchronization signals in VDL-2 information transmission systems. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk = Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*. 2017;(2):191–200. (In Russ.)

10. Kirillov S.N., Pokrovsky P.S. Two-criterion synthesis of sixteen-position radio signals with controlled coupling between common-mode and quadrature components. *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki = Successes of Modern Radio Electronics*. 2014;(6):18–25. (In Russ.)

11. Prokofiev I.A., Osmanov R.A. Features of the formation of simulating interference based on complex multichannel modulation. *Alleya nauki = Alley of Science*. 2020;1(7):285–292. (In Russ.)

12. Zelenevsky V.V., Chernousov M.S., Zelenevsky A.V., Zelenevsky Y.V. Method for assessing the noise immunity of digital transmission systems with code compression of data under the influence of stationary interference. *Izvestiya Instituta inzhenernoj fiziki = Proceedings of the Institute of Engineering Physics*. 2020;(4):31–36. (In Russ.)

13. Dovbnya V.G., Koptev D.S. The influence of the quality of operation of heterodynes on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation.

*Radiotekhnika = Radio Engineering*. 2020;84(9):40–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j00338486-202009> (17)-03

14. Fomin V.I. On operator functions of an operator variable. *Vestnik rossijskih universitetov. Matematika = Bulletin of Russian Universities. Mathematics*. 2023;28(141):68–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.20310/2686-9667-2023-28-141-68-89>

15. Ryabov I.V., Klyuzhev E.S., Strelnikov I.V., Yuryev P.M. Comparative analysis of digital and digital-analog synthesizers of frequencies and signals. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2019;75(1): 96–103. (In Russ.)

16. Baranov I.A., Skurnovich A.V. Algorithm for ensuring the integrity, consistency and consistency of data describing family relationships. *Telekommunikacii = Telecommunications*. 2018;(3):2–9. (In Russ.)

17. Drazhnikov B.N., Kozlov K.V., Kuznetsov P.A., Solyakov V.N. Analysis of the effectiveness of spatial filtering of signals at the output of a photodetector with a time delay and accumulation mode. *Uspekhi prikladnoj fiziki = Successes of Applied Physics*. 2015;3(6):566–572. (In Russ.)

18. Dovbnya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. Evaluation of the potential noise immunity of receiving digital signals used in modern and promising radio relay and satellite communication systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(1):21–35. (In Russ.)

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

**Довбня Виталий Георгиевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vit\_georg@mail.ru

**Vitaly G. Dovbnya**, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vit\_georg@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-51-63>



УДК 620.169.1

## Подходы к исследованию процессов появления и развития напряженно-деформированного состояния в зависимости от режимов виброн нагружения элемента конструкции

И. И. Сизонов<sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

### Резюме

**Цель исследования** заключается в определении допустимых и предельных режимов виброн нагружения пластины, имитирующей элемент обшивки летательного аппарата и изготовленной из сплава Д16а, с последующей сборкой и пуско-наладкой стенда экспериментальных исследований процессов появления и развития напряженно-деформированного состояния данной пластины. Циклическое воздействие широкополосной случайной вибрации имитирует рабочие эксплуатационные режимы, которые обуславливают утрату упругих свойств материала и его старение, сопровождаемое уменьшением угла наклона годографа, образованного трехмерным вектором виброускорений, по отношению к горизонтальной плоскости.

**Методы.** Для определения допустимых и предельных режимов виброн нагружения пластины применялись методы математического моделирования. Исследование процессов старения материала пластины, сопровождаемое утратой упругих свойств, производится эквивалентно-циклическим методом, каждый цикл которого содержит две фазы: первая – фаза виброн нагружения пластины, вторая – фаза визуального и рентгеноскопического лабораторного контроля, во время которой должны быть обнаружены (при появлении) внутренние дефекты структур пластины или зафиксировано их развитие. Обнаружение подобных дефектов свидетельствует о вероятном скором нарушении целостности пластины, имитирующей элемент обшивки летательного аппарата.

**Результаты.** Определены значения допустимой и предельной нагрузки на пластину, имитирующей элемент обшивки летательного аппарата. Осуществлены сборка и пуско-наладка стенда экспериментальных исследований процессов напряженного-деформированного состояния, а также подтверждена гипотеза о том, что годограф, образованный трехмерным вектором виброускорений, имеет начальный угол наклона по отношению к горизонтальной плоскости 45°. Вместе с тем ещё не достигнуто заметного эффекта старения, при котором указанный угол изменяется.

**Заключение.** Изменение угла наклона годографа, образованного трехмерным вектором виброускорений, позволяет судить о степени износа материала с возможностью дальнейшего прогнозирования остаточного ресурса материала. Исследования предлагается продолжить в части набора массива экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** годограф; виброускорение; сплав Д16а; рентгеноскопия; эквивалентно-циклический; допустимая нагрузка; предельная нагрузка; упругие свойства; напряженно-деформированное состояние.

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

**Для цитирования:** Сизонов И. И. Подходы к исследованию процессов появления и развития напряженно-деформированного состояния в зависимости от режимов виброн нагружения элемента конструкции // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 51–63. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-1-51-63](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-51-63)

Поступила в редакцию 27.01.2025

Подписана в печать 25.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## Approaches to studying the processes of appearance and development of stress-strain state depending on vibration loading modes of a structure element

Ivan I. Sizonov<sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: [Ivan.sizonov2017@yandex.ru](mailto:Ivan.sizonov2017@yandex.ru)

### Abstract

**The purpose of the research** is to determine the permissible and limiting modes of vibration loading of a plate imitating an aircraft skin element and made of D16a alloy, followed by the assembly and commissioning of an experimental research stand for the appearance and development of the stress-strain state of this plate. The cyclic effect of broadband random vibration simulates operational operating conditions that cause the loss of elastic properties of the material and its aging, accompanied by a decrease in the angle of inclination of the hodograph formed by a three-dimensional vector of vibration accelerations relative to the horizontal plane.

**Methods.** Mathematical modeling methods were used to determine the permissible and limiting modes of vibration loading of the plate. The study of the aging processes of the plate material, accompanied by loss of elastic properties, is performed by an equivalent cyclic method, each cycle of which contains two phases: the first is the phase of vibration loading of the plate, the second is the phase of visual and X-ray laboratory control, during which internal defects in the plate structures must be detected (if any) or their development recorded. The detection of such defects indicates a likely imminent violation of the integrity of the plate imitating the aircraft skin element.

**Results.** The values of the permissible and maximum load on the plate imitating the aircraft skin element are determined. The assembly and commissioning of a stand for experimental studies of stress-strain state processes has been carried out, and the hypothesis that the hodograph formed by a three-dimensional vector of vibration accelerations has an initial angle of inclination relative to the horizontal plane of 45° has been confirmed. However, there has not yet been a noticeable aging effect in which the specified angle changes.

**Conclusion.** Changing the angle of inclination of the hodograph formed by a three-dimensional vector of vibration accelerations makes it possible to judge the degree of wear of the material with the possibility of further forecasting the remaining life of the material. It is proposed to continue the research in terms of collecting an array of experimental data.

**Keywords:** hodograph; vibration acceleration; alloy D16a; fluoroscopy; equivalent cyclic; permissible load; maximum load; elastic properties; stress-strain state.

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

**For citation:** Sizonov I.I. Approaches to studying the processes of appearance and development of stress-strain state depending on vibration loading modes of a structure element. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the*

\*\*\*

## Введение

Современная авиационная промышленность продолжает решать комплексную задачу импортозамещения парка гражданских летательных аппаратов (далее – ЛА) [1], которая состоит не только из технических вопросов поиска альтернативных комплектующих изделий [2], но и проблем правового внутрироссийского и международного регулирования [3]. С другой стороны, отчетлива видна проблема устаревающего парка ЛА [4], для которого актуально внедрение альтернативной [5] и модифицированной [6] методик расчета остаточного ресурса по техническому состоянию. Следует отметить, что наметившийся тренд использования изделий в концепции остаточного ресурса характерен не только для отечественных компаний, но и зарубежных, широко применяющих данный подход при эксплуатации трубопроводов [7], реализации архитектуры контроля оборудования производственных предприятий [8] и медцентров [9]. Одной из наиболее крупных групп контроля остаточного ресурса изделия является группа, основанная на анализе вибрационных характеристик исследуемого объекта. Так, анализ вибрационных характеристик для прогнозирования остаточного ресурса применяется для гражданских судов [10], [11], гидравлического оборудования [12], сложного оборудования роторного типа [13], двигателей внутреннего сгорания обычных автомобилей [14]. Предлагается использовать данный

метод для оценки технического состояния элементов авиационной обшивки [15] и авиационных комплексов [16] наряду с применяемым виброакустическим методом [17]. Существенное влияние на вибрационные характеристики оказывает накопление дефектов, связанных с усталостной деформацией изделия [18].

## Материалы и методы

Исследования процессов возникновения и развития напряженно-деформированного состояния (далее – процессов НДС) в элементах обшивки ЛА производятся посредством двух пластин, изготовленных из сплава Д16а со следующими параметрами:

- ширина (a) = 150 мм;
- длина (b) = 250 мм;
- толщина (h) = 2 мм.

Данные пластины имитируют элементы обшивки ЛА.

Вторая пластина, в отличие от первой, дополнительно имеет четырехгранную пирамиду, закрепленную в геометрическом центре второй пластины. На гранях пирамиды расположены датчики виброускорения и деформации – всего 3, по одному датчику на каждую свободную грань пирамиды, сигналы от которых считываются и анализируются при помощи микроконтроллера семейства STM32F с уникальным (разработанным индивидуально под указанную задачу) программным обеспечением.

Пластины зажимаются на вибростенде TV59335, который обеспечивает реализацию виброрежимов по категории D1 в соответствии с разделом 8 КТ-160G/14G. По истечении цикла вибрации (6–8 часов) первая пластина просвечивается при помощи рентгеноскопа FILIN X-ARM Compact-225U для обнаружения (фиксации процесса развития) внутренних дефектов структуры материала. Вторая пластина не просвечивается и служит только для формирования годографа вектора виброускорений материала с НДС.

Стенд экспериментальных исследований процессов НДС собран на базе АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова».

### Результаты и их обсуждение

Очевидно, что при реализации вынужденных колебаний пластины, зажатой на вибростенде, на неё действует нагрузка  $q$ , обусловленная инерционными свойствами данной пластины. Зависимость значения прогиба пластины, изготовленной из сплава Д16а, от значения приложенной нагрузки со стороны вибростенда установлена согласно следующей методике:

1. Определена цилиндрическая жесткость исследуемой пластины (по сути является аналогом линейной жесткости для образцов, имеющих стержневой форм-фактор) по формуле

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu)^2} = \frac{74 \cdot 10^9 \cdot 0,002^3}{12 \cdot (1 - 0,34^2)} \approx 55,8, \quad (1)$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость исследуемой пластины, Н·м;  $E$  – модуль

упругости (модуль Юнга) для сплава Д16а, Па;  $h$  – толщина исследуемой пластины, м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона для сплава Д16а.

2. Максимальный прогиб пластины рассчитан для геометрического центра пластины по формуле

$$w = q \cdot \frac{a^4}{64 \cdot D} = q \cdot \frac{(0,150)^4}{64 \cdot 55,8} = \frac{q}{7 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где  $w$  – максимальный прогиб пластины, м;  $q$  – механическая нагрузка на пластину, Па;  $D$  – цилиндрическая жесткость исследуемой пластины, Н·м.

Учитывая, что пластина из сплава Д16а является жесткой, то для неё выполняется следующее условие прочности:

$$w < 0,25 h \quad (3)$$

где  $w$  – максимальный прогиб пластины, м;  $h$  – толщина исследуемой пластины, м.

Тогда можно рассчитать, какая нагрузка для исследуемой пластины станет предельной (при превышении этого значения возможно нарушение целостности пластины):

$$q_{\text{предел}} = 7 \cdot 10^6 \cdot 0,0005 = 3500, \quad (4)$$

где  $q_{\text{предел}}$  – предельное значение механической нагрузки, Па;  $w_{\text{предел}}$  – предельный прогиб пластины, м;  $h$  – толщина исследуемой пластины, м.

С учетом запаса прочности 10 % и в соответствии с выражением выше максимально допустимым значением нагрузки будем считать 3150 Па.

3. Рассчитаем наибольшее механическое напряжение, которое будет проявляться в двух симметричных зонах на боковых гранях (длина  $x$  толщина или  $b \times h$ ) исследуемой пластины:

$$\sigma_{\max} = 6 \frac{M_{\max}}{h^2} = \frac{q_{\text{предел}} \cdot a^2}{h^2 \cdot D} =$$

$$= 6 \frac{3150 \cdot (0,150)^2}{(0,002)^2 \cdot 55,8} \approx 1,9 \cdot 10^7, \quad (5)$$

Где  $\sigma_{\max}$  – максимальное возникающее механическое напряжение, Па;  $M_{\max}$  –

максимальный момент силы, Н·м;  $h$  – толщина исследуемой пластины, м.

Рассмотрим зависимость механического напряжения в структуре пластины от величины нагрузки (рис. 1).

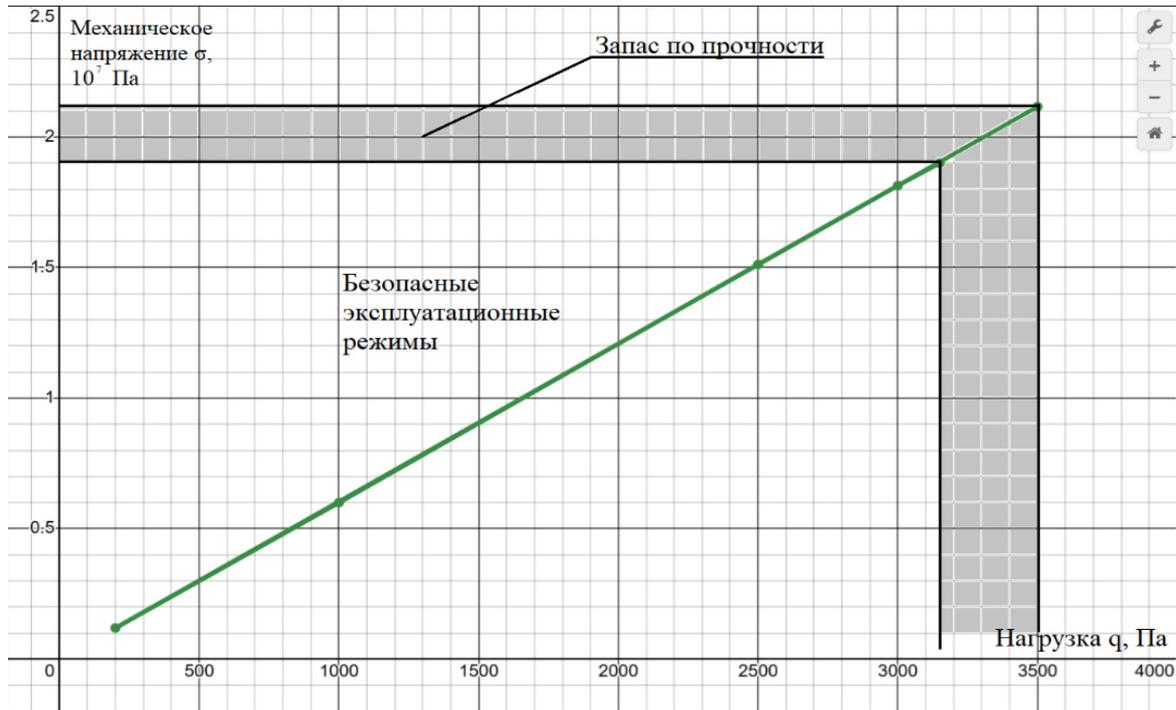


Рис. 1. Зависимость механического напряжения в структуре пластины от величины нагрузки

Fig. 1. Dependence of the mechanical stress in the plate structure on the load value

Произведенные вычисления позволяют осуществить осознанный выбор параметров и настроек вибростенда, выполняющего функцию вибронагружения исследуемой пластины, и подтверждают

годность пластины к нагрузкам по категориям D (D1) или E (E1) в соответствии с разделом 8 КТ-160G/14G (табл. 1).

Таблица 1. Требования в части спектральной плотности мощности виброускорений по категориям D1 и E1 (КТ-160G/14G)

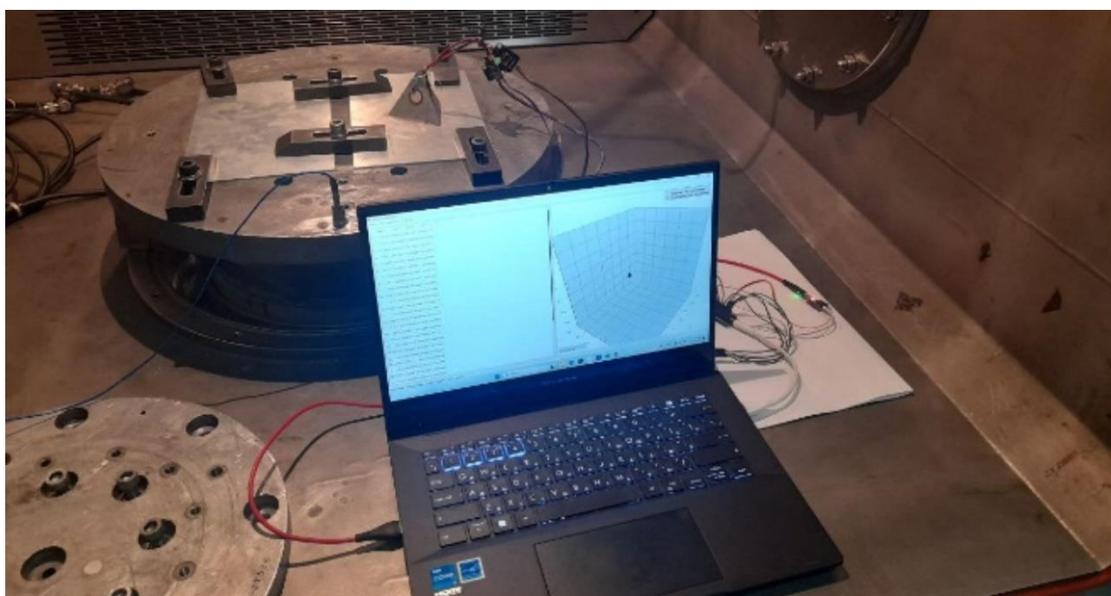
Table 1. Requirements regarding the spectral density of vibration acceleration power by categories D1 and E1 (KT-160G/14G)

Показатели	Спектральная плотность мощности виброускорения, g <sup>2</sup> /Гц						
	10	28	40	100	200	250	500
Частоты, Гц							
Категория D1	0,040	0,040	0,080	0,080	0,080	0,080	0,160
Категория E1	0,040	0,040	0,080	0,080	0,160	0,160	0,160

В соответствии с разделом 8 КТ-160G/14G категория D (D1) соответствует расположению объекта на мотогондоле или пилоне, категория E (E1) – хвостовому оперению и хвостовому обтеканию самолетов (как дозвуковых, так и сверхзвуковых) с турбореактивными и турбовентиляторными двигателями, что обеспечивает задание максимально жесткого соотношения частоты и спектральной плотности мощности виброускорения.

Необходимо отметить, что исследования в диапазоне частот 500–2000 Гц не проводились преднамеренно, поскольку экспериментальными данными подтвержден эффект скорейшего развития трещин и утраты упругих свойств конструкционных материалов именно в области низких частот [19].

Рассмотрим стенд экспериментальных исследований процессов НДС (рис. 2).



**Рис. 2.** Стенд экспериментальных исследований процессов НДС

**Fig. 2.** A stand for experimental studies of SSS-processes

При организации стенда экспериментальных исследований процессов НДС был принят ряд допущений.

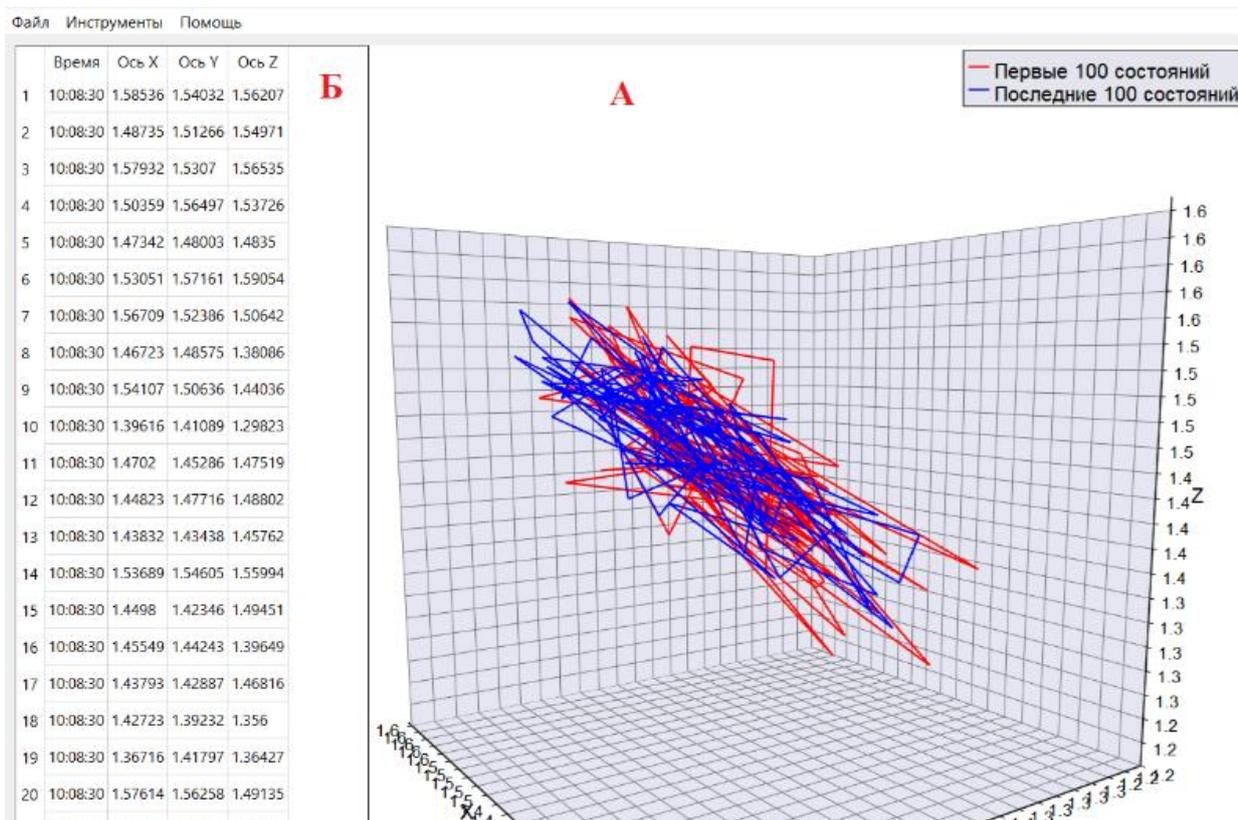
Во-первых, имеется допущение, заключающееся в том, что влияние массы конструктивного элемента в виде металлической пирамиды на процессы, протекающие внутри второй пластины, по сравнению с процессами, протекающими в первой пластине, отсутствует.

Во-вторых, возможна ситуация, когда происходит не плавная и равномерная деградация структуры обеих пластин, связанная с утратой упругих свойств металла, а развитие в одной из пластин микротрещины во внутренних слоях материала, что может привести к неадекватной трактовке полученного результата. Купировать эту вероятность можно просветом второй пластины

(с пирамидой) по истечении цикла исследований с целью подтверждения идентичности процессов, протекавших в обеих пластинах.

Также следует отметить, что стенд экспериментальных исследований процессов НДС должен в первую очередь наглядно подтвердить теорию о том, что годограф вектора виброускорения точек материала в НДС имеет значительно меньший угол с горизонтальной плоскостью, в отличие от годографа вектора виброускорения точек материала без

НДС, угол для которого составляет  $45^{\circ}$ <sup>1</sup>, однако по истечении 34 ч исследований никаких изменений угла наклона не зафиксировано, что может объясняться недостаточностью объема проведенных исследований. При этом начальные результаты подтверждают исходную теорию в части того, что угол наклона годографа вектора виброускорения точек материала без НДС составляет  $45^{\circ}$  (рис. 3). Рентгеноскопия пластины какие-либо дефекты также не выявила (рис. 4).

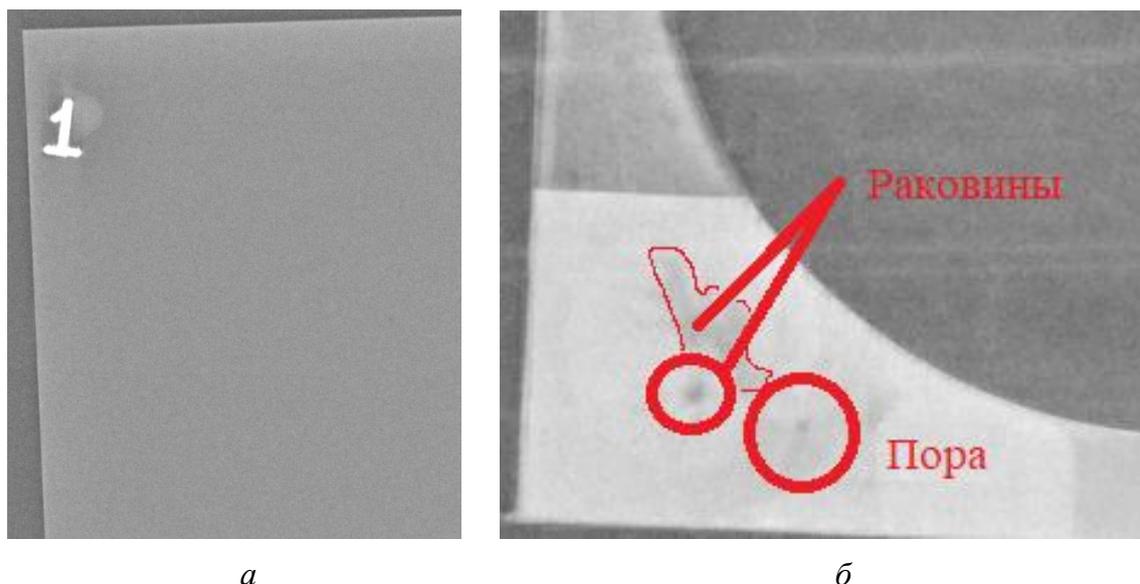


**Рис. 3.** Годограф вектора виброускорения точки материала с напряженно-деформированным состоянием

**Fig. 3.** Hodograph of the vibration acceleration vector of a point of a material with a stress-strain state

<sup>1</sup> Пат. 2820426 С1 Российская Федерация, МПК G01B 11/16, G01L 1/24. Устройство измерения деформации / Мухин И. Е., Сизонов И. И., Аб-рамзон С. С.; заявитель Акционерное общество

«Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова». № 2023122885; заявл. 01.09.23; опубл. 03.06.24. EDN XKKAMN



**Рис. 4.** Результаты рентгеноскопии исследуемой пластины в зоне 1: а – образец; б – пример раковин и поры

**Fig. 4.** X-ray results of the examined plate in zone 1: а – sample; б – an example of shells and pores

Изменение угла наклона эллипса (или, скорее, «облака», полученного при воздействии широкополосной вибрации), образованного годографом вектора виброускорений точки материала, который, в свою очередь, является результатом сложения проекций векторов виброускорений по каждой из трех взаимно ортогональных осей, фиксируется средствами разработанного ПО (рис. 3, зона Б). Вычисляя среднее значений по каждой из трех осей для каждой итерации эксперимента, можно сначала математически, а затем и визуально выявить изменение контролируемого угла.

## Выводы

Средства разработанного программного обеспечения позволяют, кроме визуального контроля, фиксировать координаты точек годографа, которые затем

с помощью стандартных офисных приложений можно анализировать (в части автоматизированного расчета среднего, поиска минимального и максимального значений). Привлечение математических методов, например метода контрольных карт Шухарта, позволит выявить наметившийся тренд уменьшения угла наклона годографа к горизонтальной плоскости.

Также нужно отметить возможность модернизации объекта исследования: в текущей конфигурации применяются изотропные пластины без концентраторов напряжений. Предлагается доработка пластин в части отрезания квадратного элемента в одном из углов каждой пластины и дальнейшего восстановления целостности путем клёпки. Предполагается, что клёпанное соединение существенно сократит время,

необходимое для проведения исследований, т. к. это спровоцирует деградацию внутренних структур материала и, возможно, появление микротрещин, что, в

свою очередь, как ожидается, отобразится на угле наклона годографа и будет выявлено на рентгеноскопии.

### Список литературы

1. Гафаров Г. А., Седьмова А. Г. Возможности и проблемы импортозамещения авиационной техники в современных условиях // Научный аспект. 2024. Т. 53, № 6. С. 6893–6901. EDN PPSDDB

2. Аспекты импортозамещения радиоэлектронных компонентов в авиационной отрасли / Л. Л. Гончар, И. Н. Абрамова, Е. Г. Спиридонов, О. В. Абрамов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2023. № 25. С. 63–72. EDN XIAIEY

3. Фролова Е. К. Актуальные проблемы правового регулирования развития авиационной промышленности в условиях трансформации глобальных рынков // Вестник университета имени О. Е. Кутафина (МГЮА). 2023. № 8. С. 40–50. EDN WPZQIU. <https://doi.org/10.17803/2311-5998.2023.108.8.040-050>

4. Куртаев С. Ж. Теория и практика контроля и диагностики систем воздушных судов гражданской авиации // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. Т. 2. С. 242–244.

5. Сизонов И. И., Мухин И. Е., Барабушка А. С. Подходы к определению остаточного ресурса основных узлов вертолёта с учётом выполненных профилей полёта // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 1, № 3. С. 61–73.

6. Гаврильев И. М., Корольков Д. И., Гравит М. В. Модифицированная методика расчета остаточного ресурса с использованием экспоненциального распределения // Вестник Евразийской науки. 2019. № 2. С. 89–103.

7. Review of Railway Operation Tunnel Inspection System and Condition Assessment Method / G. Song, Ya. Huang, Zh. Wang [et al.] // Acta Polytechnica Hungarica. 2024. Vol. 21, N 1. P. 259–279. EDN IPMXOI. <https://doi.org/10.12700/aph.21.1.2024.1.16>

8. An RDF-based Approach for Implementing Industry 4.0 Components with Administration Shells / I. Grangel-González, L. Halilaj, S. Auer, S. Lohmann, C. Lange, D. Collarana // 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Berlin, Germany: IEEE, 2016. P. 89–102. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733503>

9. Giustozzi F., Saunier J., Zanni-Merk C. Context Modeling for Industry 4.0: an Ontology-Based Proposal // Procedia Computer Science. 2018. N 126. P. 675–684.

10. Белый А. А., Герасиди В. В., Лисаченко В. В. Неразрушающий вибрационный контроль элементов судовых двигателей в эксплуатации // Эксплуатация морского транспорта. 2024. № 2 (111). С. 167–174. EDN GQLEFQ. <https://doi.org/10.34046/aumsuomtl11/28>
11. Николаев Н. И., Мышинский Э. Л., Гриценко М. В. К вопросу оценки технического состояния судовых технических средств морских судов по параметрам вибрации // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60-61. С. 84–90. EDN ХАJJMX
12. Чистоклетов А. А., Пугин К. Г. Использование вибродиагностики для определения технического состояния гидравлического оборудования // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 3. С. 54–62. EDN TUVIHN. <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.03.07>
13. Соколова А. Г., Балицкий Ф. Я. Виброконтроль и диагностика сложного машинного оборудования роторного типа с применением нестандартного подхода // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 1. С. 62–73. EDN HGIQWU. [https://doi.org/10.52261/02346206\\_2023\\_1\\_62](https://doi.org/10.52261/02346206_2023_1_62)
14. Система определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания на основе измерения и анализа вибрации / А. Г. Садриев, Д. М. Шамсутдинов, С. А. Вильцын [и др.] // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14, № 2. С. 32–50. EDN FVPORY. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-286>
15. Сизонов И. И., Барабушка А. С., Мухин И. Е. Двухэтапная математическая модель оценки режимов вынужденных вибраций элемента обшивки летательного аппарата с применением оптоволоконных технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 52–64.
16. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Практические результаты расчетно-экспериментальных исследований по определению диапазонов изменения основных контролируемых параметров перспективных авиационных комплексов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 1, № 3. С. 39–60.
17. Бобров В. Т., Бобренко В. М., Гульшин А. В. Акустический экспресс-способ измерения упругих констант металла высоконагруженных конструкций, работающих в экстремальных условиях. Часть 1. Проблемы эксплуатации авиационных и космических систем // Контроль. Диагностика. 2020. № 6. С. 46–63.
18. Можаровский В. В., Киргинцева С. В. Расчет напряженно-деформированного состояния зубьев зубчатых колес из композиционных и функционально-градиентных материалов // Проблемы физики, математики и техники. 2023. № 1(54). С. 31–37. EDN GTXFSB. [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_1\\_54\\_31](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_1_54_31)

19. Исследование воздействия концентратора механических напряжений на процессы возникновения и развития трещин в конструкционных элементах авиационной техники / И. И. Сизонов, Е. Л. Лебедев, А. Н. Попов, И. Е. Мухин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 36–49.

## Reference

1. Gafarov G.A., Sedmova A.G. Possibilities and problems of import substitution of aviation equipment in modern conditions. *Nauchnyi aspekt = Scientific Aspect*. 2024;53(6):6893-6901. (In Russ.) EDN PPSDDDB

2. Gonchar L.L., Abramova I.N., Spiridonov E.G., Abramov O.V. Aspects of import substitution of radioelectronic components in the aviation industry. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and Practice*. 2023;(25):63–72. (In Russ.) EDN XIAIEY

3. Frolova E.K. Actual problems of legal regulation of the aviation industry development in the context of global market transformation. *Vestnik universiteta imeni O.E. Kutafina (MGYuA) = Bulletin of the O.E. Kutafin University (MGUA)*. 2023;(8):40–50. (In Russ.) EDN WPZQIU. <https://doi.org/10.17803/2311-5998.2023.108.8.040-050>

4. Kurtaev S.J. Theory and practice of control and diagnostics of civil aviation aircraft systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2016;2:242–244. (In Russ.)

5. Sizonov I.I., Mukhin I.E., Barabushka A.S. Approaches to determining the residual resource of the main helicopter components, taking into account the flight profiles performed. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;1(3):61–73. (In Russ.)

6. Gavrilyev I.M., Korolkov D.I., Gravit M.V. Modified method of calculating residual resource using exponential distribution. *Vestnik Evraziiskoi nauki = Bulletin of Eurasian Science*. 2019;(2):89–103. (In Russ.)

7. Song G., Huang Ya., Wang Zh., et al. Review of Railway Operation Tunnel Inspection System and Condition Assessment Method. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2024;21(1):259–279. EDN IPMXOI. <https://doi.org/10.12700 / aph.21.1.2024.1.16>

8. Grangel-González I., Halilaj L., Auer S., Lohmann S., Lange C., Collarana D. An RDF-based Approach for Implementing Industry 4.0 Components with Administration Shells. In: *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Berlin, Germany: IEEE; 2016. P. 89–102. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733503>

9. Giustozzi F., Saunier J., Zanni-Merk C. Context Modeling for Industry 4.0: an Ontology-Based Proposal. *Procedia Computer Science*. 2018;(126):675–684.

10. Bely A.A., Gerasidi V.V., Lisachenko V.V. Non-destructive vibration control of marine engine elements in operation. *Ekspluatatsiya mor-skogo transporta = Operation of Marine Transport*. 2024;(2):167–174. (In Russ.) EDN GQLEFQ. <https://doi.org/10.34046/aumsuomtl11/28>

11. Nikolaev N.I., Myshinsky E.L., Gritsenko M.V. On the issue of assessing the technical condition of marine equipment by vibration parameters. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva = Scientific and Technical Collection of the Russian Maritime Register of Shipping*. 2020;(60–61):84–90. (In Russ.) EDN XAJJMX

12. Chistokletov A.A., Pugin K.G. The use of vibration diagnostics to determine the technical condition of hydraulic equipment. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya = Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2021;(3):54–62. (In Russ.) EDN TUVIHN. <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.03.07>

13. Sokolova A.G., Balitsky F.Ya. Vibration control and diagnostics of complex rotary-type machinery using a non-standard approach. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of Mechanical Engineering and Automation*. 2023;(1):62–73. (In Russ.) EDN HGIQWU. [https://doi.org/10.52261/02346206\\_2023\\_1\\_62](https://doi.org/10.52261/02346206_2023_1_62)

14. Sadriev A.G., Shamsutdinov D.M., Viltsyn S.A. [et al.]. The system for determining the technical condition of an internal combustion engine based on vibration measurement and analysis. *International Journal of Advanced Studies*. 2024;14(2):32–50. (In Russ.) EDN FVPORY. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-286>

15. Sizonov I.I., Barabushka A.S., Mukhin I.E. A two-stage mathematical model for estimating the modes of forced vibrations of an aircraft skin element using fiber-optic technologies. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(3):52–64. (In Russ.)

16. Koptev D.S., Mukhin I.E. Practical results of computational and experimental studies to determine the ranges of change in the main controlled parameters of promising aviation complexes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;1(3):39–60. (In Russ.)

17. Bobrov V.T., Bobrenko V.M., Gulshin A.V. Acoustic express method for measuring elastic constants of metal of highly loaded structures operating under extreme conditions. Part 1. Problems of operation of aviation and space systems. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2020;(6):46–63. (In Russ.)

18. Mozharovsky V.V., Kirgintseva S.V. Calculation of the stress-strain state of gear teeth made of composite and functionally gradient materials. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki = Problems of Physics, Mathematics and Technology*. 2023;(1):31–37. (In Russ.) EDN GTXFSB. [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_1\\_54\\_31](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_1_54_31)

19. Sizonov I.I., Lebedev E. L., Popov A. N., Mukhin I. E. Investigation of the effect of a mechanical stress concentrator on the processes of occurrence and development of cracks in structural elements of aviation equipment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(1):36–49. (In Russ.)

### Информация об авторе / Information about the Author

**Сизонов Иван Игоревич**, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-0697-091X

**Ivan I. Sizonov**, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communications, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-0697-091X

### Оценка возможности применения канала радиосвязи для передачи видеoinформации между беспилотным подводным аппаратом и пультом дистанционного управления

М. Ю. Алемпьев<sup>1</sup>, А. Е. Семенова<sup>1</sup>, Д. С. Коптев<sup>1</sup> ✉, В. Г. Довбня<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

#### Резюме

**Цель исследования.** За последние годы беспилотные подводные аппараты стали более доступными и эффективными, что привело к их широкому распространению и внедрению в различных отраслях, в том числе для решения задач Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Технологичность данных устройств позволяет выполнять задачи под водой без прямого участия человека за счет использования датчиков, камер и ряда других приборов с высокими тактико-техническими характеристиками.

Целью исследования является оценка максимальной дальности передачи видеoinформации качества FullHD с беспилотного подводного аппарата для идентификации подводных объектов при мониторинге спасателями в условиях чрезвычайной ситуации.

**Методы** исследования основаны на основных положениях теории радиосвязи, теории диагностики и методах прогнозирования технического состояния подводных аппаратов. Проанализированы принципы передачи видеoinформации с беспилотных подводных аппаратов, используемых для мониторинга морского дна. Произведена критическая оценка максимального расстояния удаления беспилотного подводного аппарата от оператора в условиях спасательной операции.

**Результаты.** Оценен показатель энергетического запаса в канале связи с частотой 1 ГГц при передаче данных со скоростями, соответствующими плезиохронной цифровой иерархии, который составил 50–70 метров. Оценено затухание сигнала, в котором на расстоянии 100 метров от источника электромагнитные волны ослабевают на 200 дБ. Оценена максимальная дальность радиопередачи в подводном пространстве на частоте 1 ГГц с использованием КАМ-16 и турбокодов 3/4, которая составила 55 метров.

**Заключение.** В качестве перспективных направлений исследований в области использования беспилотных подводных аппаратов в водном пространстве следует рассматривать применение технологии высокоскоростной ближней радиосвязи, способствующее обеспечению скрытности подводной радиосвязи.

**Ключевые слова:** радиосвязь в воде; подводная среда передачи данных; беспилотный подводный аппарат; канал передачи данных; энергетический запас; резонансная радиопрозрачность; пропускная способность канала.

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

**Для цитирования:** Оценка возможности применения канала радиосвязи для передачи видеoinформации между беспилотным подводным аппаратом и пультом дистанционного управления / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 64–78. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-64-78>

Поступила в редакцию 18.01.2025

Подписана в печать 16.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## Evaluation of the possibility of using a radio communication channel to transmit video information between an unmanned underwater vehicle and a remote control

Mikhail Y. Alempiev<sup>1</sup>, Anastasia E. Semenova<sup>1</sup>,  
Dmitry S. Koptev<sup>1</sup> ✉, Vitaly G. Dovbnya<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The relevance of the conducted research is due to the fact that in recent years, unmanned underwater vehicles have become more accessible and effective, which has led to their widespread use and implementation in various industries, including solving the problems of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. The technological advancement of these devices allows performing tasks underwater without direct human participation through the use of sensors, cameras and a number of other devices with high tactical and technical characteristics.

The purpose of the research is to assess the maximum transmission range of FullHD quality video information from an unmanned underwater vehicle for identifying underwater objects during monitoring by rescuers in emergency situations.

**Methods.** The research methods are based on the basic provisions of radio communication theory, diagnostic theory and methods for predicting the technical condition of underwater vehicles. The principles of transmitting video information from unmanned underwater vehicles used to monitor the seabed are analyzed. A critical assessment of the maximum distance of removal of an unmanned underwater vehicle from the operator in a rescue operation is made.

**Results.** The energy reserve indicator in a communication channel with a frequency of 1 GHz during data transmission at speeds corresponding to the plesiochronous digital hierarchy was estimated to be 50–70 meters. The signal attenuation was estimated, in which at a distance of 100 meters from the source electromagnetic waves weaken by 200 dB. The maximum range of radio transmission in underwater space at a frequency of 1 GHz using KAM-16 and turbo codes 3/4 was estimated to be 55 meters.

**Conclusion.** The use of high-speed short-range radio communication technology, which helps ensure the secrecy of underwater radio communication, should be considered as promising areas of research in the field of using unmanned underwater vehicles in water space.

**Keywords:** radio communication in water; underwater data transmission environment; unmanned underwater vehicle; data transmission channel; energy reserve; resonant radio transparency; channel capacity.

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

**For citation:** Alempiev M.Y., Semenova A.E., Koptev D.S., Dovbnaya V.G. Evaluation of the possibility of using a radio communication channel to transmit video information between an unmanned underwater vehicle and a remote control. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(1):64–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-64-78>

Received 18.01.2025

Accepted 16.02.2025

Published 31.03.2025

\*\*\*

## Введение

Беспилотные подводные аппараты (БПА) представляют собой инновационные устройства, которые кардинально меняют подход к исследованию морских и пресноводных глубин [1]. Эти высокотехнологичные устройства позволяют выполнять широкий спектр задач – от научных исследований и мониторинга окружающей среды до аварийно-спасательных операций и инспекций подводных объектов [2]. Благодаря современным системам визуализации, датчикам и манипуляторам, БПА обеспечивают высокую точность и эффективность работы в условиях, где использование традиционных методов затруднено или невозможно [3].

Основные направления использования беспилотных подводных дронов:

1. Научные исследования.
2. Обслуживание морского транспорта и оборудования.
3. Подводная фото- и видеосъемка.
4. Поисково-спасательные работы.
5. Мониторинг подводных объектов различного назначения [4].

Для идентификации объектов в подводном пространстве требуется наличие

съемки фото- и видеоизображения в качестве FullHD от подводного дрона. То, что человеку трудно разглядеть на глубине из-за мутной или загрязненной воды, доступно для беспилотного подводного аппарата. Это достигается благодаря высокопроизводительной видеокамере, оснащенной мощной светодиодной оптикой для улучшения видимости. В качестве примера реализации возможностей рассмотрим беспилотный подводный аппарат Chasing M2 S Advanced Set – дрон с интеллектуальным управлением, который гарантирует высокое качество подводных съёмок и свободу мониторинга в подводном пространстве [5].

Дрон M2 S Advanced Set снабжен камерой с режимом съемки 4K с электронной стабилизацией изображения, которая в совокупности с двумя светодиодными фонарями мощностью 2000 лм и технологией восстановления цвета позволяет получать изображения подводного мира в высокой четкости не только для записи, но и для онлайн-трансляции. Технология восстановления цвета, учитывающая особенности подводного освещения, физические свойства света и

окружение, а также система визуального распознавания и отслеживания обеспечивают изображению высокую чёткость, контрастность и детализацию.

Основные параметры Chasing M2 S Advanced Set:

1. Максимальная грузоподъемность – 1,5 кг.
2. Время автономной работы – до 4 ч на АКБ при работе от бортовой сети судна не ограничено.
3. Максимальная глубина погружения – 100 м.
4. Рабочий радиус передвижения – от 200 до 400 м при передаче 4К изображения при глубине погружения 100 м.
5. Датчик глубины.
6. Датчик температуры [5].

Для создания канала связи между пультом дистанционного управления и дроном Chasing M2 S Advanced Set используется двухсотметровый шнур с соединителями, который входит в состав оборудования дрона. Проводной канал связи содержит как передачу команд управления, так и видеотрансляцию.

Предлагается рассмотреть возможность использования канала распространения радиоволн (РРВ) вместо соединяющего шнура длиной 200 м.

Целью статьи является оценка предельного расстояния передачи видеозображения качества FullHD, необходимого для идентификации подводных объектов, с беспилотного подводного аппарата из подводной среды на пульт управления оператора, находящегося над поверхностью воды.

## Материалы и методы

Для двунаправленной связи (видео 4К 60 FPS и команды управления) между подводным дроном и пультом управления оператора требуется канал связи с пропускной способностью 50 Мбит/с. Для аналогичной связи с видео FullHD 60 FPS достаточно 12 Мбит/с для оптимальной работы, а минимальная пропускная способность для передачи видеопотока FullHD составляет 5 Мбит/с [6].

Современные системы подводной связи полагаются на крайне низкие (КНЧ, 3-30 Гц) и сверхнизкие (СНЧ, 30-300 Гц) диапазоны частот, хорошо распространяющиеся в морской воде. Инфранизкие (ИНЧ, 300 Гц-3 кГц) и очень низких (ОНЧ, 3-30 кГц) диапазоны также используются, но имеют ограниченную глубину проникновения из-за скин-эффекта [7].

Основные недостатки этих подходов – громоздкие антенны, низкий КПД, низкая информационная скорость и плохая помехоустойчивость.

Открытие резонансно-волнового состояния и резонансной радиопрозрачности воды открывает перспективу использования диапазонов сверхвысокочастотных (СВЧ) и крайне высокочастотных (КВЧ) [8].

Так, на сегодняшний день, уже проведены экспериментальные исследования методов амплитудной трансрезонансной радиоспектроскопии. Реализовано пассивное измерение собственного СВЧ-излучения на 1 ГГц и активное

зондирование на частоте 65 ГГц с регистрацией вторичного резонансного СВЧ-излучения (радиоотклика) на резонансной частоте 1 ГГц, с ослаблением сигнала 20-30 дБ [9].

Частота 65 ГГц имеет потенциал для передачи больших объемов данных, использование этой частоты для приемо-передающих беспилотных устройств (дронов) также несет ряд значительных ограничений и недостатков. Основные причины, почему невыгодно использовать частоту 65 ГГц:

1. Атмосферное затухание сигнала:

– поглощение. Как и в случае с мобильными устройствами, сигналы на частоте 65 ГГц подвержены сильному поглощению атмосферными газами (особенно кислородом) и водяным паром. Это приводит к быстрому ослаблению сигнала, что значительно сокращает дальность связи [10];

– погодные условия. Дождь, туман и снег еще больше ухудшают распространение сигнала на этих высоких частотах, что делает связь ненадежной в плохих погодных условиях.

2. Ограниченная дальность связи. Из-за высокого затухания сигнала дальность связи на 65 ГГц сильно ограничена. Это ограничивает применение БППА для задач, требующих связи на большие расстояния (например, мониторинг больших территорий, доставка, поиск и спасение) [11].

3. Требования к мощности и энергопотреблению:

– высокая мощность передатчика.

Для преодоления затухания сигнала и обеспечения надежной связи требуется более мощный передатчик, что приводит к увеличению энергопотребления БППА;

– увеличение массы. Более мощный передатчик и батарея могут увеличить массу БППА, что также отрицательно влияет на его характеристики [12].

4. Технологические сложности и стоимость:

– дорогие компоненты. Оборудование для работы на 65 ГГц (антенны, передатчики, приемники) сложнее и дороже в производстве, чем для более низких частот. Это увеличивает стоимость БППА и их обслуживания;

– сложность интеграции. Интеграция высокочастотного оборудования в компактный корпус БППА представляет собой инженерную задачу, требующую высокой точности и миниатюризации;

– требования к калибровке. Высокочастотные системы требуют точной калибровки и настройки для обеспечения стабильной связи, что усложняет эксплуатацию [12].

5. Требования к точной ориентации антенны. Для обеспечения оптимального сигнала на 65 ГГц требуется точная ориентация антенн БППА и пульта управления оператора, что может быть сложной задачей при активном маневрировании.

6. Ограничения нормативно-правового характера. Регулирование частотного диапазона: использование

диапазона 65 ГГц может быть ограничено нормативными актами в разных странах, что может создавать проблемы с применением БПЛА в различных регионах [13].

Следует отметить, что частота 65 ГГц потенциально и может обеспечить высокую пропускную способность, однако она не является оптимальным выбором для приемопередающих беспилотных устройств из-за значительного затухания сигнала, ограниченной дальности, высоких требований к мощности, стоимости, технологических сложностей и проблем с мобильностью [14].

Для беспилотных устройств в настоящее время более предпочтительными являются более низкие частоты, обеспечивающие лучшую дальность связи, проникающую способность и более стабильную работу при различных внешних условиях.

Частоты, используемые в сетях Wi-Fi, а также специализированные диапазоны для БПЛА (например, 2,4 ГГц, 5,8 ГГц и др.) предоставляют более практичное и эффективное решение для большинства задач. Для специальных задач с высокими требованиями к скорости передачи данных и малой дальностью могут использоваться и миллиметровые волны (например, 28–39 ГГц). Однако применение данных частот для БПЛА также невозможно. Wi-Fi-частоты абсолютно непригодны для связи с беспилотными подводными аппаратами из-за сильного поглощения в воде, ограниченной дальности, сложностей с

технической реализацией антенных систем и несовместимости с подводными условиями [15].

Для связи и управления подводными аппаратами применяются акустические волны, низкочастотные радиоволны или проводные каналы связи в зависимости от требований к дальности, пропускной способности и автономности.

Канал связи с частотой 1 ГГц для подводных аппаратов представляет собой компромиссное решение. Он может быть полезен в некоторых специфических сценариях, где требуется баланс между дальностью связи, пропускной способностью и размерами оборудования. Однако ограничения, связанные с поглощением сигнала в воде, требуют тщательного анализа и выбора оптимального решения в зависимости от конкретных требований к условиям применения. Часто 1 ГГц используют как часть гибридной системы связи, дополняя другие методы, такие как акустическая или проводная связь [16].

Рассмотрим возможность применения канала связи 1 ГГц для беспилотного подводного устройства, рассчитав потенциальную дальность подводной радиосвязи.

Мощность сигнала  $P_R$  на входе приемника линии связи может быть записана в виде

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L}, \quad (1)$$

где  $P_T$  – мощность, подводимая к антенне передатчика, Вт;  $G_T$ ,  $G_R$  –

коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно;  $L$  – энергетические потери сигнала в непрерывном канале связи ( $L > 1$ ) [17].

Мощность шума  $P_N$ , приведенная к входу приемника линии связи, может быть определена из следующего выражения:

$$P_N = N_0 B, \quad (2)$$

где  $N_0 = kT_R$  – односторонняя спектральная плотность мощности шума, дБВт/Гц;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T_R$  – шумовая температура приемника, К;  $B = 1/T$  – ширина полосы пропускания приемника при согласованной фильтрации, Гц;  $T$  – длительность символа, с [18].

Шумовая температура приемника определяется, прежде всего, шумовой температурой антенны  $T_A$  и шумовой температурой входного малошумящего усилителя  $T_{\text{мшУ}}$ :

$$T_R \approx T_A + T_{\text{мшУ}} = T_0 \left[ \frac{T_A}{T_0} + (F - 1) \right], \quad (3)$$

где  $T_0 = 290$  К – эталонная температура;  $F$  – коэффициент шума малошумящего усилителя.

В пределе шумовая температура приемника равна шумовой температуре антенны, которая в случае подводной связи в  $L$ -диапазоне составляет порядка 93 К [19].

Длительность передаваемого символа определяется выражением

$$T = r_{FEC} \log_2 M / R, \quad (4)$$

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

Тогда с учетом выражений (1) – (4) отношение сигнал / шум, приведенное к входу приемника линии связи, можно записать в следующем виде:

$$h^2 = \frac{P_R}{P_N} = \frac{E_S}{N_0} = P_T G_T G_R \frac{r_{FEC} \log_2 M}{k T_R R L}, \quad (5)$$

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

В большинстве практических случаев расчет отношения сигнал / шум удобнее производить в децибелах по следующей формуле:

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

Очевидно, что для обеспечения приема с вероятностью ошибки не выше заданной  $P_{b0}$  ( $10^{-6}$  для передачи данных) необходимо, чтобы энергетический запас в линии связи

$$\Delta = h^2 - h_0^2 > 0, \quad (7)$$

где  $h_0^2$  – отношение сигнал / шум, обеспечивающее в потенциале заданную вероятность битовой ошибки (пороговое отношение сигнал / шум), дБ.

Для сигнала КАМ-16 (QAM-16) пороговое отношение сигнал/шум составляет 20,6 дБ. В случае применения помехоустойчивого кодирования эта величина может быть существенно снижена. Так, например, при использовании

мощных корректирующих кодов – турбокодов – пороговое отношение сигнал/шум может быть снижено до 10,3 дБ (Turbo 3/4,  $r_{FEC} = 0,75$ ).

Энергетические потери в непрерывном канале связи складываются из двух составляющих:

$$L = L_0 + L_{cp}, \quad (8)$$

где  $L_0$  – энергетические потери в свободном пространстве, дБ;  $L_{cp}$  – энергетические потери в среде распространения, дБ.

Энергетические потери в свободном пространстве

$$L_0 = 20 \lg \frac{4\pi r}{\lambda_{cp}} = 22 + 20 \lg r - 20 \lg \lambda_{cp}, \quad (9)$$

где  $r$  – протяженность линии связи, м;  $\lambda_{cp} = \frac{0,3}{f \sqrt{\epsilon}}$  – длина волны в среде распространения, м;  $\epsilon$  – относительная

диэлектрическая проницаемость среды. Для воды на частоте трансрезонанса 1 ГГц, как показали результаты экспериментальных исследований [20], относительная диэлектрическая проницаемость равна 36.

Энергетические потери в среде распространения

$$L_{cp} = \gamma_W r, \quad (10)$$

где  $\gamma_W$  – погонные затухания в среде, дБ/м. Погонные потери в морской воде на частоте трансрезонанса 1 ГГц составляют 1,1 дБ/м [20].

### Результаты и их обсуждение

Результаты расчета зависимости энергетических потерь в свободном пространстве, в среде распространения и в непрерывном канале связи на частоте трансрезонанса 1 ГГц от расстояния с использованием выражений (8) – (10) приведены ниже (рис. 1).

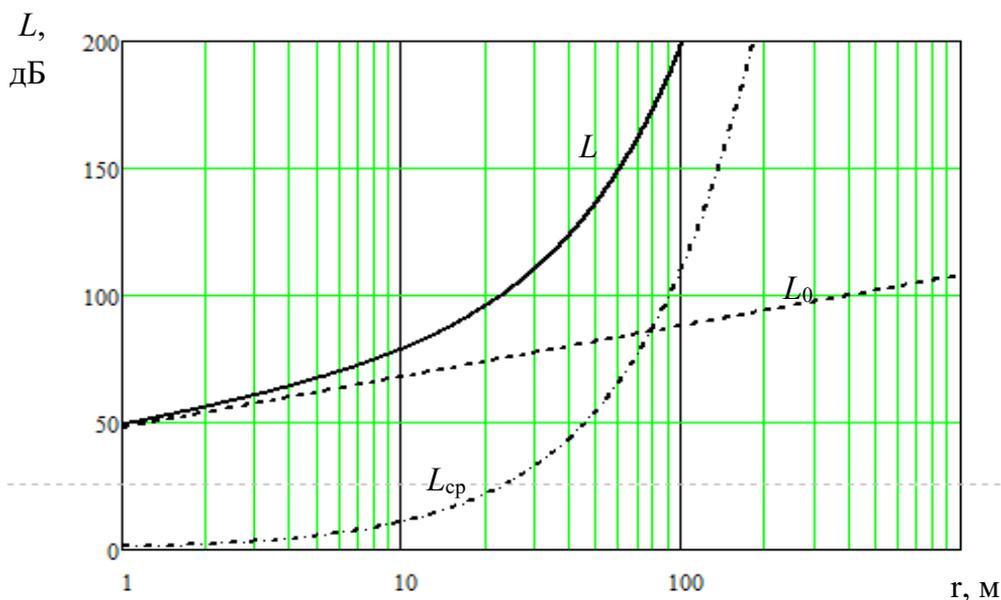


Рис. 1. Зависимость от расстояния энергетических потерь в свободном пространстве, среде распространения и общих потерь в непрерывном канале связи, для частоты 1 ГГц, соответствующей трансрезонансу

Fig. 1. Dependence on the distance of energy losses in free space, propagation medium and total losses in a continuous communication channel for a frequency of 1 GHz corresponding to transresonance

Результаты моделирования, представленные на графиках (рис. 1), демонстрируют, что на расстоянии 100 м от источника электромагнитные волны ослабевают на 200 дБ. В области до 60 м затухание в основном вызвано потерями в свободном пространстве, в то время как на более дальних расстояниях (свыше 100 м) преобладают потери, связанные со свойствами среды распространения.

Рассмотрим в качестве передающей и приемной антенн штыревую всенаправленную (в горизонтальной плоскости) антенну с коэффициентом усиления 8 дБ. Ширина диаграммы направленности такой антенны в вертикальной плоскости составляет порядка 20 град [21].

Подводимую к антенне мощность на основании принципа взаимности положим равной

$$P_T = 10 \cdot \Pi \cdot S_e, \quad (11)$$

где  $\Pi = 10 \text{ мВт/см}^2$  – максимальная плотность потока мощности, при которой

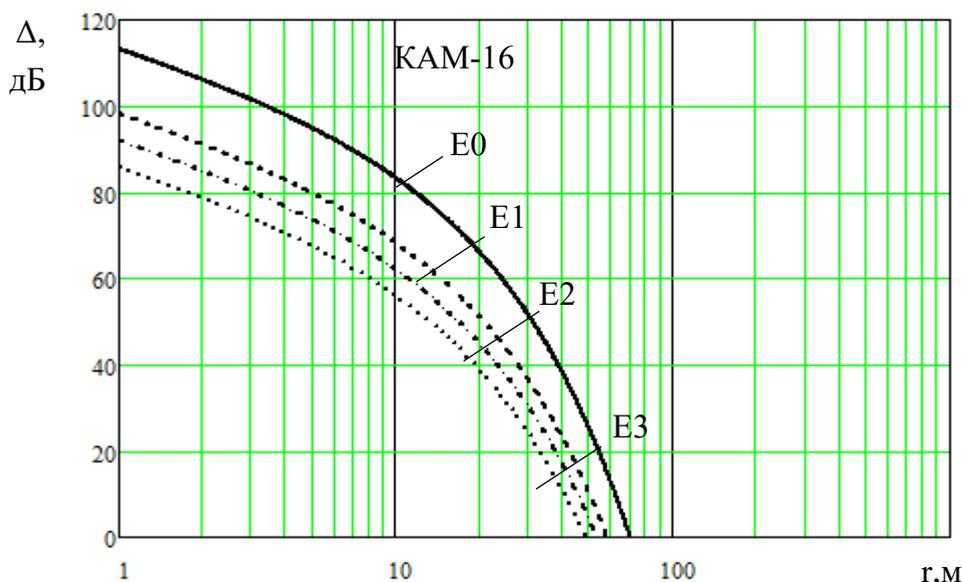
проявляется явление трансрезонанса;  $S_e$  – эффективная площадь антенны,  $\text{м}^2$ .

Эффективная площадь антенны связана с коэффициентом усиления антенны следующим выражением:

$$S_e = \frac{\lambda_{\text{ср}}^2}{4\pi} G. \quad (12)$$

Для рассматриваемого случая эффективная площадь антенны и подводимая к антенне мощность соответственно равны  $S_e = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  и  $P_T = 0,126 \text{ Вт}$ .

Результаты расчета зависимости энергетического запаса в непрерывном канале связи при передаче данных со скоростями, соответствующими плезиохронной цифровой иерархии (E0 – 64 кБит/с, E1 – 2,048 Мбит/с, E2 – 8,448 Мбит/с и E3 – 34,368 Мбит/с), методом КАМ-16 на частоте трансрезонанса 1 ГГц от расстояния между передающим и приемным устройствами с использованием выражений (6) – (10) приведены ниже (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимости энергетического запаса в канале связи от расстояния между передатчиком и приемником при передаче данных на частоте 1 ГГц, соответствующей трансрезонансу

**Fig. 2.** Dependences of the energy reserve in the communication channel on the distance between the transmitter and receiver when transmitting data at a frequency of 1 GHz, corresponding to transresonance

Анализ графической информации (рис. 2) свидетельствует о том, что потенциальная дальность подводной радиосвязи с применением резонансно-волнового состояния и резонансной радиопрозрачности составляет 50–70 м.

Для передачи видеопотока качества FullHD потребуется канал связи с минимальной скоростью 5 Мбит/с, что соответствует потоку Е2 и Е3 с дальностью радиопередачи – 55 м и 50 м соответственно.

### Выводы

Таким образом, обобщая вышеизложенное, в данной статье:

– оценен показатель энергетического запаса в канале связи с частотой 1 ГГц при передаче данных со скоростями, соответствующими плезиохронной цифровой иерархии, который составил 50–70 м;

– оценено затухание сигнала, в котором на расстоянии 100 м от источника электромагнитные волны ослабевают на

200 дБ, до 60 м затухание в основном вызвано потерями в свободном пространстве, в то время как на более дальних расстояниях (свыше 100 м) преобладают потери, связанные со свойствами среды распространения;

– оценена эффективная площадь антенны и подводимая к ней мощность –  $1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  и 0,126 Вт соответственно;

– оценена максимальная дальность радиопередачи в подводном пространстве на частоте 1 ГГц с использованием КАМ-16 и турбокодов 3/4, которая составила 55 м.

Полученные результаты исследований указывают на перспективу применения технологии высокоскоростной ближней радиосвязи между подводными объектами. Важно отметить, что использование резонансно-волнового состояния и резонансной радиопрозрачности, ограничивающее дальность передачи, способствует обеспечению скрытности подводной низкоинтенсивной резонансной СВЧ-радиосвязи.

### Список литературы

1. Джаныбеков Р. Ю., Аббасов И. Б. Проблемы в проектировании морских робототехнических комплексов // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 11(137). С. 1–10. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.21>

2. Жантуреев Ж. Ж. К проблеме применения беспилотных подводных аппаратов в практике раскрытия, расследования и предупреждения преступлений // *Расследование преступлений: проблемы и пути их решения*. 2023. № 1(39). С. 152–158. <https://doi.org/10.54217/2411-1627.2023.39.1.019>

3. Дмитриев В. И., Каретников В. В. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2017. Т. 9, № 6. С. 1151–1152.

4. Спиридонов А. А., Фадеев А. М. Стратегические приоритеты применения беспилотных технологий при реализации энергетических проектов в Арктике // Стратегирование: теория и практика. 2023. Т. 3, № 3(9). С. 322–335. <https://doi.org/10.21603/2782-2435-2023-3-3-322-335>
5. CHASING M2 S Underwater Drone\_Industrial-Grade Underwater ROV. URL: <https://www.chasing.com/en/chasing-m2s-overview.html> (дата обращения: 29.12.2024).
6. Оценка дальности передачи видеоинформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44.
7. Катавараян Б., Сантанам Ш. Особенности подводной системы оптической беспроводной связи в условиях различных типов морской воды // Светотехника. 2021. № 5. С. 68–76.
8. Мкртчян Ф. А. СВЧ-радиометрия в мониторинге геофизических характеристик земной поверхности // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2024. № 4. С. 173–186. <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2024-04-3>
9. Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов: монография / В. П. Федосов, С. П. Тарасов, П. П. Пивнев, В. В. Воронин, С. В. Кучерявенко, А. А. Легин, А. В. Ломакина, В.А. Франц. Ростов н/Д: Издательство Южного федерального университета, 2018. 178 с.
10. Гранков А. Г., Мильшин А. А. О факторах, влияющих на прохождение радиоволн по трассе «спутник-Земля» в СВЧ- и УВЧ-диапазонах в телекоммуникационных системах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2022. № 5. С. 47–58. <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2022-05-5>
11. Колосов П. Удалённый мониторинг водных ресурсов с помощью ИИ и БПЛА // Control Engineering Россия. 2022. № 1 (97). С. 58–59.
12. Шкинёв В. М., Сапрыкин О. А., Носов В. Н. Об увеличении ресурсов автономных подводных аппаратов путем применения источников морской среды и изменения конструкции // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 5(770). С. 66–77.
13. Джурицкий К. Современная отечественная база коаксиальных радиокомпонентов для модулей и блоков СВЧ // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 7(228). С. 122–131. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2023.228.7.122.131>
14. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприемных систем цифровых линий связи: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2017. 175 с.

15. Результаты апробации прототипа платформы морского Интернета вещей для обеспечения взаимодействия и цифровой навигации морских роботизированных агентов / А. А. Кабанов, Ю. Д. Черемухин, В. А. Крамарь [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 1(51). С. 53–63. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2023-1-53-63>

16. Андрюшечкин Ю. Н., Прохоренков А. А., Лукин А. И. Создание действующей модели специального плавучего средства навигационного ограждения для информационного обеспечения безопасности судоходства // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2021. Т. 13, № 1. С. 45–51. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-1-45-51>

17. Каштанов В. В., Немтинов В. А. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2022. Т. 28, № 4. С. 606–614. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.04.pp.606-614>

18. Оценка дальности полёта и передачи видеоинформации при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 21–39. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>

19. P.372: Radio noise. URL: [itu.int/rec/R-REC-P.372/en](http://itu.int/rec/R-REC-P.372/en) (дата обращения: 12.12.2024).

20. Сиражуудинов С. М. Организация качественной и безопасной передачи данных в системах связи и радиодоступа морских робототехнических комплексов // Вопросы безопасности. 2023. № 1. С. 32–40. <https://doi.org/10.25136/2409-7543.2023.1.39686>

21. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Основные направления повышения помехозащищенности радиоприёмных систем на основе пространственно-временной обработки сложных сигналов в антенном устройстве // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 36–50.

## References

1. Dzhanybekov R.Y., Abbasov I. B. Problems in the design of marine robotic complexes. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2023;(11):1–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.21>

2. Zhantureev Zh.Zh. On the problem of the use of unmanned underwater vehicles in the practice of disclosure, investigation and prevention of crimes. *Rassledovanie prestuplenii: problemy i puti ikh resheniya = Crime Prevention: Problems and Ways to Solve Them*. 2023;(1):152–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.54217/2411-1627.2023.39.1.019>

3. Dmitriev V.I., Karetnikov V.V. Methods of ensuring the safety of navigation in the implementation of unmanned technologies. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova = Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2017;9(6):1151–1152. (In Russ.)
4. Spiridonov A.A., Fadeev A.M. Strategic priorities of the use of unmanned technologies in the implementation of energy projects in the Arctic. *Strategirovanie: teoriya i praktika = Strategizing: Theory and Practice*. 2023;(3):322–335. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2782-2435-2023-3-3-322-335>
5. CHASING M2 S Underwater Drone\_Industrial-Grade Underwater ROV. Available at: <https://www.chasing.com/en/chasing-m2s-overview.html> (accessed 12.09.2024).
6. Alempyev M.Y., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality during emergency monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)
7. Katavarayan B., Santanam S. Features of an underwater optical wireless communication system in conditions of various types of seawater. *Svetotekhnika = Lighting Engineering*. 2021;(5):68–76. (In Russ.)
8. Mkrtchyan F.A. Microwave radiometry in monitoring the geophysical characteristics of the Earth's surface. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov = Problems of the Environment and Natural Resources*. 2024;(4):173–186. (In Russ.) <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2024-04-3>
9. Fedosov V.P., Tarasov S.P., Pivnev P.P., Voronin V.V., Kucheravenko S.V., Legin A.A., Lomakina A.V., Frants V.A. Communication networks for underwater autonomous robotic complexes. Rostov-on-Don: Izdatel'stvo Yuzhnogo federal'nogo universiteta; 2018. 178 p. (In Russ.)
10. Grankov A.G., Milshin A.A. On the factors influencing the passage of radio waves along the satellite-Earth highway in the microwave and UHF bands in telecommunication systems. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov = Problems of the Environment and Natural Resources*. 2022;(5):47–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2022-05-5>
11. Kolosov P. Remote monitoring of water resources using AI and UAVs. *Control Engineering Russia*. 2022;(1):58–59. (In Russ.)
12. Shkinev V.M., Saprykin O.A., Nosov V.N. On increasing the resources of autonomous underwater vehicles through the use of marine sources and design changes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024;(5):66–77. (In Russ.)

13. Dzhurinsky K. Modern domestic base of coaxial radio components for microwave modules and units. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2023;(7):122–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2023.228.7.122.131>

14. Dovbnya V.G., Asiantsev V.E., Mikhailov S.N. Noise immunity of radio receiving systems of digital communication lines. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2017. 175 p. (In Russ.)

15. Kabanov A.A., Cheremukhin Y.D., Kramar V.A., et al. Results of testing the prototype of the marine Internet of Things platform for ensuring interaction and digital navigation of marine robotic agents. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy = Environmental Monitoring Systems*. 2023;(1):53–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2023-1-53-63>

16. Andryushechkin Y.N., Prokhorenkov A.A., Lukin A.I. Creation of an operational model of a special floating navigation barrier for information security of navigation. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova = Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of the Marine and River Fleet*. 2021;13(1):45–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-1-45-51>

17. Kashtanov V.V., Nemtinov V.A. Analysis of communication organization using short-range unmanned aerial vehicles. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2022;28(4):606–614. (In Russ.) <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.04.pp.606-614>

18. Alempyev M.Y., Semenova A.E., Koptev D.S., Dovbnya V.G. Evaluation of flight range and transmission of video information during emergency monitoring from an unmanned aerial vehicle in difficult meteorological conditions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(2):21–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>

19. P.372: Radio noise. Available at: [itu.int>rec/R-REC-P.372/en](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372/en) (accessed 12.12.2024).

20. Sirazhudinov S.M. Organization of high-quality and safe data transmission in communication systems and radio access of marine robotic complexes. *Voprosy bezopasnosti = Security Issues*. 2023;(1):32–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.25136/2409-7543.2023.1.39686>

21. Dovbnya V.G., Koptev D.S. The main directions of increasing the noise immunity of radio receiving systems based on spatiotemporal processing of complex signals in an antenna device. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(1):36–50. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the Authors**

**Алемпьев Михаил Юрьевич**, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

**Mikhail Y. Alimpiev**, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

**Семёнова Анастасия Евгеньевна**, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nastiasemenova2512@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6462-8574

**Anastasia E. Semenova**, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nastiasemenova2512@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6462-8574

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

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

**Довбня Виталий Георгиевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vit\_georg@mail.ru

**Vitaly G. Dovbnya**, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vit\_georg@mail

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-79-90>



УДК 004.932

## Применение алгоритмов обработки изображений для улучшения визуализации структур поджелудочной железы

Д. В. Сергеев<sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: [sdv583@mail.ru](mailto:sdv583@mail.ru)

### Резюме

**Целью исследования** является разработка и сравнительный анализ различных методов обработки медицинских изображений с целью оптимизации визуализации структур поджелудочной железы. Основной задачей является выявление наиболее эффективного метода обработки изображений для достижения наилучшего качества визуализации, что, в свою очередь, имеет важное значение для точной диагностики и лечения пациентов с патологиями поджелудочной железы.

**Методы.** В рамках нашего исследования были применены различные методы, включая анализ огромного библиографического материала, использование разнообразных инструментов для сбора данных и привлечение экспертных знаний и подходов.

**Результаты.** Полученные результаты обсуждаются с учетом практической значимости для медицины. Оптимизация визуализации поджелудочной железы с помощью различных методов обработки изображений может существенно улучшить точность диагностики ее заболеваний. Улучшенная визуализация позволяет более точно выявлять и анализировать патологические изменения, что способствует раннему выявлению заболеваний и более эффективному лечению пациентов. Это может способствовать дальнейшему улучшению методов диагностики и лечения заболеваний поджелудочной железы, повышая качество медицинского обслуживания.

**Заключение.** Разные методы сегментации, такие как пороговая обработка, машинное обучение и активные контуры, имеют свои преимущества и ограничения в визуализации структур поджелудочной железы. Выбор оптимального метода зависит от конкретной задачи и требований к точности и скорости обработки изображений. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на разработке более эффективных алгоритмов сегментации и их применимости в клинической практике для улучшения диагностики и лечения заболеваний поджелудочной железы.

**Ключевые слова:** медицинские изображения; сегментация; поджелудочная железа; методы обработки изображений; качественный анализ; количественный анализ; статистическая обработка.

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

**Для цитирования:** Сергеев Д. В. Применение алгоритмов обработки изображений для улучшения визуализации структур поджелудочной железы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 79–90. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-79-90>

Поступила в редакцию 19.01.2025

Подписана в печать 17.01.2025

Опубликована 31.03.2025

© Сергеев Д. В., 2025

## Application of image processing algorithms to improve visualization of pancreatic structures

Dmitry V. Sergeev<sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: sdv583@mail.ru

### Abstract

**The purpose of the research** is to develop and compare various methods of processing medical images in order to optimize visualization of pancreatic structures. The main task is to identify the most effective image processing method to achieve the best visualization quality, which, in turn, is important for the accurate diagnosis and treatment of patients with pancreatic pathologies.

**Methods.** As part of our research, various methods were applied, including the analysis of a huge bibliographic material, the use of various tools for data collection, and the involvement of expert knowledge and approaches.

**Results.** The results obtained are discussed taking into account their practical significance for medicine. Optimization of visualization of the pancreas using various image processing methods can significantly improve the accuracy of diagnosis of its diseases. Improved visualization makes it possible to more accurately identify and analyze pathological changes, which contributes to the early detection of diseases and more effective treatment of patients. This can contribute to further improvement of methods of diagnosis and treatment of pancreatic diseases, improving the quality of medical care.

**Conclusion.** Different segmentation methods, such as threshold processing, machine learning, and active contours, have their advantages and limitations in visualizing pancreatic structures. The choice of the optimal method depends on the specific task and the requirements for the accuracy and speed of image processing. Further research should focus on developing more efficient segmentation algorithms and their applicability in clinical practice to improve diagnosis and treatment of pancreatic diseases.

**Keywords:** medical images; segmentation; pancreas; image processing methods; qualitative analysis; quantitative analysis; statistical processing.

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

**For citation:** Sergeev D.V. Application of image processing algorithms to improve visualization of pancreatic structures. *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.* 2025;15(1):79–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-79-90>

Received 19.01.2025

Accepted 14.01.2025

Published 31.03.2025

\*\*\*

### Введение

Исследование методов обработки медицинских изображений представляет собой важный этап в современной медицинской диагностике и лечении. Структуры поджелудочной железы играют ключевую роль в патофизиологии

многих заболеваний, и точное определение их контуров имеет принципиальное значение для диагностики и планирования лечения. С целью повышения эффективности и точности сегментации структур поджелудочной железы в данной работе проводится сравнительный

анализ различных методов обработки изображений.

Алгоритмы обработки изображений играют ключевую роль в улучшении визуализации структур поджелудочной железы, позволяя повысить точность диагностики и планирования лечения. Исследования в этой области охватывают различные методы и технологии. М. Ю. Юкина с коллегами [1] исследовали применение диффузионно-взвешенной МРТ для диагностики инсулиномы поджелудочной железы. Н. Б. Губергиц и соавторы [2] изучали структурные особенности поджелудочной железы при хроническом панкреатите. В. А. Белозеров с коллегами [3] предложили модели и алгоритмы для дифференциальной диагностики очаговых образований поджелудочной железы на основе данных эндосонографии с мягкими вычислениями. А. А. Максимова [4] анализировала методы обработки медицинских данных, а Д. В. Нестеров с соавторами [5] провели сравнительную оценку качества изображения поджелудочной железы с помощью спиральной и динамической КТ. И. В. Николаева с коллегами [6] изучили возможности ультразвуковой диагностики рака поджелудочной железы. К. Ю. Кандурова и соавторы [7] исследовали перспективы оптической биопсии для интраоперационного анализа тканевого метаболизма. А. В. Барзенков [8] разработал гибридную интеллектуальную систему с когнитивным моделированием для диагностики болезней поджелудочной железы. Б. В. Кожухарь [9] предложил основы

обработки медицинских изображений, а Г. Г. Кармазановский с коллегами [10] исследовали диагностическую значимость трехмерных реконструкций КТ-изображений при протоковой аденокарциноме поджелудочной железы. С. А. Хоружик [11] рассматривал основы КТ-визуализации, включая пост-процессинговую обработку изображений, а Г. М. Кондратова с коллегами [12] изучили технологию трехмерного ультразвукового исследования желчного пузыря. Д. А. Бойко с соавторами [13] предложили метод визуализации патологических структур на маммограммах. А. В. Дубровин [14] исследовал переход от PACS к телерадиологии, а А. С. Коваленко [15] подготовку медицинских изображений для обработки в больших информационных хранилищах. А. А. Холлева [16] оценили возможность компьютерной томографии в определении качества хирургического лечения у пациентов правой половины ободочной кишки. А. А. Литвин [17] рассмотрел радиомикру и анализ текстур цифровых изображений в онкологии. Н. А. Обухова [18] изучала методы обработки медицинских ТВ-изображений. А. В. Святненко, А. Е. Демко, Д. А. Суров [19] исследовали аспекты технологии дополненной цифровой реальности (AR) в реконструктивной хирургии желчных протоков, а Р. В. Козарь [20] предложил методы распознавания медицинских изображений для задач компьютерной диагностики.

Нами была проанализирована эффективность методов обработки изобра-

жений для сегментации структур поджелудочной железы (рис. 1). В своих исследованиях сосредотачивались на сравнении классических подходов, таких как метод пороговой обработки, с современными методами, основанными на машинном обучении. Эти исследования вносят важный вклад в понимание оптимальных подходов к обработке медицинских изображений и их влияния на точность диагностики и лечения заболеваний поджелудочной железы.

Применение алгоритмов обработки изображений значительно улучшает визуализацию структур поджелудочной железы, что способствует повышению точности диагностики и эффективности лечения различных заболеваний. Исследования показывают, что диффузионно-взвешенная МРТ является эффективным методом для выявления инсулиномы поджелудочной железы [1]. Алгоритмы для дифференциальной диагностики очаговых образований, разработанные на основе данных эндосонографии, позволяют повысить точность анализа и улучшить процесс диагностики [3]. Использование технологий трехмерной реконструкции КТ-изображений повышает диагностическую ценность при исследовании протоковой аденокарциномы [10]. Эти и другие достижения в области обработки медицинских изображений открывают новые перспективы в диагностике и лечении патологий поджелудочной железы.

Алгоритмы обработки изображений продолжают развиваться, предлагая новые возможности для точного анализа и

визуализации сложных анатомических структур поджелудочной железы. Современные методы, такие как радиомика и текстурный анализ изображений, активно применяются в онкологии для улучшения диагностики злокачественных опухолей [17]. Кроме того, внедрение оптических биопсий и технологий интраоперационного анализа тканей усиливает возможности малоинвазивной хирургии и помогает своевременно корректировать тактику лечения [7].

### Материалы и методы

Для проведения исследования был использован набор медицинских изображений, содержащий информацию о структурах поджелудочной железы различных пациентов. Диагнозы пациентов включали такие патологии, как кисты поджелудочной железы, хронический панкреатит, опухоли и конкременты в панкреатическом протоке. Эти изображения были получены с помощью спиральной компьютерной томографии (СКТ) с контрастным усилением и были предварительно обработаны с целью исключения артефактов и шумов.

Для сегментации структур поджелудочной железы были применены различные методы обработки изображений, включая методы пороговой обработки, методы, основанные на машинном обучении, алгоритмы машинного обучения, такие как сверточные нейронные сети (U-Net) и алгоритмы на основе случайных лесов, а также методы активных контуров. Каждый метод был тщательно настроен и применен к набору

изображений с целью определения и выделения структур поджелудочной железы с высокой точностью и надежностью.

После сегментации структур поджелудочной железы были проведены качественные и количественные анализы полученных результатов. Качественный анализ включал визуальную оценку точности сегментации экспертами в области радиологии, а также проверку соответствия формы и контуров сегментированных структур анатомическим характеристикам поджелудочной железы.

Количественный анализ включал вычисление метрик, таких как индекс Дайса (Dice coefficient) и коэффициент Жаккара (Jaccard index), которые оценивали сходство сегментированных структур с эталонными данными. В качестве эталонных объектов были выбраны вручную аннотированные изображения, созданные радиологами. Также была произведена оценка времени и вычислительных ресурсов, затраченных на проведение сегментации для каждого метода, чтобы оценить их эффективность и применимость в клинической практике.

## Результаты и их обсуждение

Разнообразие методов сегментации включает в себя как классические подходы, такие как методы пороговой обработки, так и более современные методы, основанные на машинном обучении, а также методы активных контуров и другие:

1. Метод пороговой обработки основан на определении порогового

значения яркости пикселей, при котором объекты на изображении разделяются от фона. Этот метод отлично подходит для сегментации объектов с ярко выраженными контурами и хорошим контрастом с фоном. Величина порогового значения в каждом конкретном случае устанавливалась эмпирически на основе анализа гистограммы яркости изображений [1; 7; 20]. Для изображений с высоким контрастом применялись стандартные значения, в то время как для изображений с низким контрастом пороговое значение адаптировалось в зависимости от характеристик каждого изображения.

2. Методы, основанные на машинном обучении, включают в себя различные алгоритмы, такие как сверточные нейронные сети и методы глубокого обучения. Для реализации сегментации использовалась архитектура сверточных нейронных сетей на базе U-Net, которая включает в себя симметричный кодировщик-декодировщик с блоками свертки и деконволюции для извлечения признаков и восстановления точной формы объектов. Эти сети позволяют автоматически изучать признаки объектов на изображении и выделять их с высокой точностью, даже в условиях низкого контраста и размытости.

3. Методы активных контуров, или затравочных линий, представляют собой алгоритмы, которые используют информацию о контурах объектов на изображении для их сегментации. Эти методы особенно эффективны в случаях, когда объекты имеют сложные формы или неровные контуры [1; 3; 20].

Кроме того, существует ряд других методов, таких как методы, основанные на геометрических характеристиках объектов, методы, использующие информацию о текстуре и цвете, а также комбинированные методы, сочетающие

различные подходы для достижения наилучших результатов сегментации.

Важно отметить, что не существует универсального метода сегментации, который был бы идеальным для всех случаев (табл. 1).

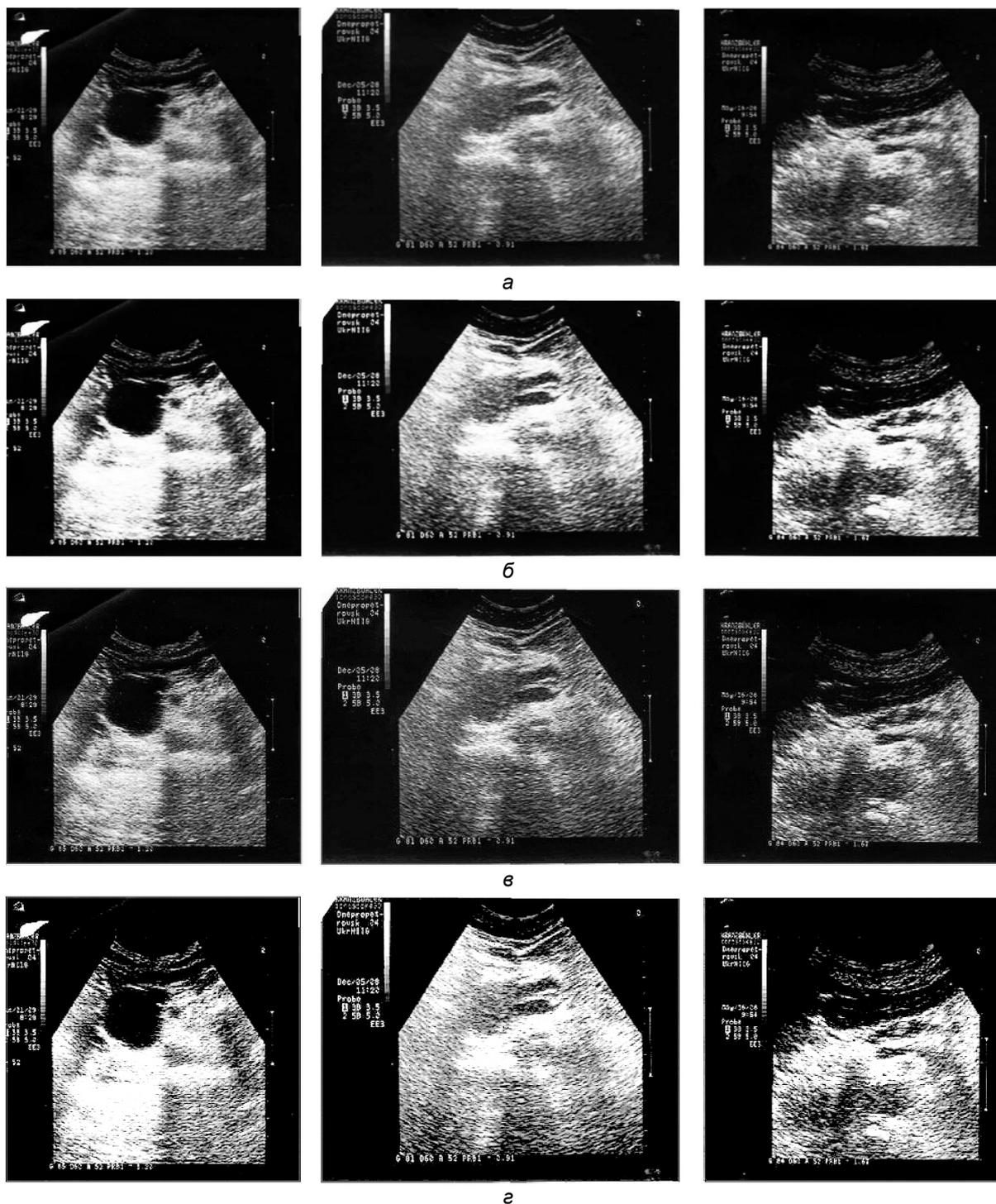
**Таблица 1.** Сравнение методов сегментации изображений

**Table 1.** Comparison of image segmentation methods

Метод	Достоинства	Недостатки
Пороговая обработка	Простой и быстрый метод	Чувствителен к шуму и неоднородности освещения
	Не требует сложных вычислений	Не подходит для объектов со сложными формами или нечеткими границами
	Эффективен для изображений с высоким контрастом	Может приводить к образованию «дыр» в сегментированных областях
Методы машинного обучения	Высокая точность сегментации	Требуют больших объемов обучающих данных
	Способность работать в условиях низкого контраста и размытости	Могут быть сложными для реализации и обучения
	Автоматическое обучение на основе данных	Не всегда интерпретируемы
Методы активных контуров	Эффективны для сегментации объектов со сложными формами	Требуют ручной инициализации контуров
	Учитывают информацию о контурах объектов	Чувствительны к шуму и неоднородности освещения
	Могут быть интерактивными	Могут быть вычислительно затратными

В ходе сравнительного анализа результатов различных методов обработки изображений было обнаружено, что применение корректировок яркости и контрастности значительно улучшает визуализацию структур поджелудочной

железы (рис. 1). Этот метод позволяет более четко выделить контуры объектов на изображении и повысить их контрастность, что делает даже мелкие детали более различимыми.



**Рис. 1.** Применение различных методов обработки изображений для оптимизации визуализации структур поджелудочной железы (киста головки поджелудочной железы, формирующаяся киста головки поджелудочной железы, конкременты в главном панкреатическом протоке): а – исходное изображение; б – изображение с применением корректировок яркости и контрастности; в – изображение с применением фильтрации шума; г – изображение с улучшением и изменением уровней [2]

**Fig. 1.** Application of various image processing methods to optimize visualization of pancreatic structures (Pancreatic head cyst, emerging pancreatic head cyst, concretions in the main pancreatic duct): а – the original image; б – the image using brightness and contrast adjustments; в – image with noise filtering; г – image with improvement and change of levels [2]

Одновременно с этим использование фильтрации шума также оказывает положительное воздействие на качество изображений поджелудочной железы. Заметно уменьшается количество артефактов и мелких помех на изображении, что способствует более точной интерпретации и анализу структур.

Важным результатом является также применение улучшения и изменения уровней, что позволяет более детально выделить различные элементы на изображении и обеспечить более точное отображение аномалий и патологических процессов в поджелудочной железе.

Таким образом, сравнение различных методов обработки изображений позволяет выбрать оптимальный подход для достижения наилучшего качества визуализации структур поджелудочной железы, что важно для дальнейшей точной диагностики и лечения пациентов.

## Выводы

1. В ходе сравнительного анализа методов обработки изображений для сегментации структур поджелудочной железы обнаружено, что методы, основанные на машинном обучении, демонстрируют более высокую точность и надежность по сравнению с классическими

подходами, такими как метод пороговой обработки. Например, сверточные нейронные сети позволяют автоматически изучать признаки объектов на изображении и выделять их с высокой точностью, что особенно важно в условиях низкого контраста и размытости.

2. Оптимизация визуализации структур поджелудочной железы путем корректировки яркости, контрастности, фильтрации шума и улучшения уровней демонстрирует значительное улучшение качества изображений. Например, после применения корректировок контуры объектов на изображении становятся более четкими и контрастными, что облегчает их интерпретацию и анализ.

3. После анализа различных методов обработки изображений оптимальным вариантом для дальнейшего применения в медицинской практике являются методы, основанные на машинном обучении, такие как сверточные нейронные сети. Несмотря на более высокие временные и ресурсные затраты, по сравнению с другими методами, эти подходы обеспечивают наивысшую точность сегментации и сохранение формы и контуров структур поджелудочной железы, что является критически важным для точной диагностики и лечения пациентов.

## Список литературы

1. Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография в диагностике инсулиномы поджелудочной железы: клинический случай / М. Ю. Юкина, Н. Ф. Нуралиева, Е. А. Трошина [и др.] // Альманах клинической медицины. 2018. Т. 46, № 3. С. 289–295. EDN XULSYH. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2018-46-3-289-295>

2. Губергиц Н. Б., Крылова Е. А., Гравировская Н. Г. Структурные особенности поджелудочной железы у больных различными клинико-морфологическими формами хронического панкреатита // Медицинский алфавит. 2019. Т. 2, № 13(388). С. 34–38. EDN QTPGGI. [https://doi.org/10.33667/2078-5631-2019-2-13\(388\)-34-38](https://doi.org/10.33667/2078-5631-2019-2-13(388)-34-38)

3. Модели и алгоритмы дифференциальной диагностики очаговых образований поджелудочной железы по результатам эндосонографии с использованием технологии мягких вычислений / В. А. Белозеров, О. И. Охотников, Н. А. Корневский, Н. Н. Григорьев // Диагностическая и интервенционная радиология. 2023. Т. 17, № 1. С. 49–58. EDN OUQVUT. <https://doi.org/10.25512/DIR.2023.17.1.05>

4. Максимова А. А. Анализ методов обработки медицинских данных // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 2(13). С. 5. EDN WHAYLP

5. Нестеров Д. В., Розенгауз Е. В. Сравнительная оценка качества изображения поджелудочной железы при спиральной и динамической компьютерной томографии // Лучевая диагностика и терапия. 2013. № 1(4). С. 58–62. EDN PYZLBN

6. Николаева И. В., Рамазан А. Б., Цой О. Г. Ультразвуковая диагностика рака поджелудочной железы // Медицинский журнал Астана. 2019. № 2(100). С. 154–160. EDN LPSYTM

7. Методы оптической биопсии и их перспективы применения для интраоперационного анализа тканевого метаболизма и микроциркуляции крови в мини-инвазивной хирургии / К. Ю. Кандурова, В. В. Дремин, Е. А. Жеребцов [и др.] // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018. Т. 17, № 3(67). С. 71–79. EDN YAUORV. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2018-17-3-71-79>

8. Барзенков А. В. Гибридная интеллектуальная система с элементами когнитивного моделирования для диагностики болезней поджелудочной железы // Перспективы науки. 2019. № 5(116). С. 191–194. EDN IAFBWC

9. Кожухарь Б. В. Основы обработки медицинских изображений // Новая наука: Современное состояние и пути развития. 2016. № 5-2. С. 189–192. EDN VVVPPB

10. Диагностическая значимость трехмерных реконструкций КТ-изображений у пациентов с протоковой аденокарциномой поджелудочной железы / Г. Г. Кармазановский, Я. И. Нерестюк, А. Г. Кригер, А. В. Хайриева // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2017. Т. 7, № 1. С. 69–76. EDN YMFRXX. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2017-7-1-69-76>

11. Хоружик С. А., Михайлов А. Н. Основы КТ-визуализации Часть 2. Постпроцессинговая обработка изображений // Радиология – практика. 2011. № 4. С. 52–65. EDN NYBQMX

12. Кондратова Г. М., Митьков В. В., Брюховецкий Ю. А. Технология трехмерного ультразвукового исследования желчного пузыря // Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2007. № 3. С. 14–27. EDN JWWSNZ

13. Бойко Д. А., Филатова А. Е. Метод визуализации патологических структур на маммограммах // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. 2013. № 39(1012). С. 9–14. EDN RCNMQJ
14. Дубровин А. В., Кошкаров А. А. От PACS к телерадиологии // Врач и информационные технологии. 2017. № 3. С. 106–111. EDN ZGYVVPN
15. Коваленко А. С., Пезенцали А. А., Царенко Е. К. Подготовка медицинских изображений к обработке в больших информационных хранилищах // Кибернетика и вычислительная техника. 2014. № 2(176). С. 46–53. EDN QRQXTB
16. Возможности компьютерной томографии в оценке качества хирургического лечения у пациентов с опухолями правой половины ободочной кишки / А. А. Холева, Т. А. Агабабян, А. А. Невольских [и др.] // Колопроктология. 2024. Т. 23, № 3(89). С. 87–99. EDN YLQXDK. <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2024-23-3-87-99>
17. Радиомика и анализ текстур цифровых изображений в онкологии (обзор) / А. А. Литвин, Д. А. Буркин, А. А. Кропинов, Ф. Н. Парамзин // Современные технологии в медицине. 2021. Т. 13, № 2. С. 97–106. EDN AITKVR. <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.2.11>.
18. Обухова Н. А., Мотыко А. А. Методы обработки и анализа медицинских ТВ изображений // Телевидение: передача и обработка изображений. 2016. Т. 1. С. 10–15. EDN XINNSJ
19. Первый опыт применения технологии дополненной цифровой реальности (AR) в реконструктивной хирургии желчных протоков / А. В. Святненко, А. Е. Демко, Д. А. Суров [и др.] // Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н. И. Пирогова. 2024. Т. 19, № 2. С. 159–163. EDN XWMXXS. [https://doi.org/10.25881/20728255\\_2024\\_19\\_2\\_159](https://doi.org/10.25881/20728255_2024_19_2_159)
20. Козарь Р. В., Навроцкий А. А., Гуринович А. Б. Методы распознавания медицинских изображений в задачах компьютерной диагностики // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2020. № 3(120). С. 116–121. EDN HJRPNR

## References

1. Yukina M.Y., Nuralieva N.F., Troshina E.A., et al. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging in the diagnosis of pancreatic insulinoma: a clinical case. *Al'manakh klinicheskoi meditsiny = Almanac of Clinical Medicine*. 2018;46(3):289–295. (In Russ.) EDN XULSYH. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2018-46-3-289-295>
2. Gubergits N.B., Krylova E.A., Gravirovskaya N.G. Structural features of the pancreas in patients with various clinical and morphological forms of chronic pancreatitis. *Meditsinskii alfavit = The Medical Alphabet*. 2019;2(13):34–38. (In Russ.) EDN QTPGGI. [https://doi.org/10.33667/2078-5631-2019-2-13\(388\)-34-38](https://doi.org/10.33667/2078-5631-2019-2-13(388)-34-38)

3. Belozеров V.A., Okhotnikov O.I., Korenevsky N.A., Grigoriev N.N. Models and algorithms of differential diagnosis of pancreatic nodules based on the results of endosonography using soft computing technology. *Diagnosticheskaya i interventsionnaya radiologiya = Diagnostic and Interventional Radiology*. 2023;17(1):49–58. (In Russ.) EDN OUQVUT. <https://doi.org/10.25512/DIR.2023.17.1.05>
4. Maksimova A.A. Analysis of medical data processing methods. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2016;(2):5. (In Russ.) EDN WHAYLP
5. Nesterov D.V., Rozengauz E.V. Comparative assessment of the image quality of the pancreas in spiral and dynamic computed tomography. *Luchevaya diagnostika i terapiya = Radiation Diagnostics and Therapy*. 2013;(1):58–62. (In Russ.) EDN PYZLBN
6. Nikolaeva I.V., Ramazan A B., Tsoi O.G. Ultrasound diagnosis of pancreatic cancer. *Astana Medical Journal*. 2019;(2):154–160. (In Russ.) EDN LPSYTM
7. Kandurova K.Y., Dremin V.V., Zherebtsov E.A., et al. Optical biopsy methods and their application prospects for intraoperative analysis of tissue metabolism and blood microcirculation in minimally invasive surgery. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya = Regional Blood Circulation and Microcirculation*. 2018;17;(3):71–79. (In Russ.) EDN YAUORV. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2018-17-3-71-79>
8. Barzenkov A.V. Hybrid intelligent system with elements of cognitive modeling for the diagnosis of pancreatic diseases. *Perspektivy nauki = Perspectives of Science*. 2019;(5):191–194. (In Russ.) EDN IAFBWC
9. Kozhukhar B.V. Fundamentals of medical image processing. *Novaya nauka: Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya = New Science: Current State and Development Paths*. 2016;(5-2):189–192. (In Russ.) EDN VVVPPB
10. Karmazanovsky G.G., Nrestyuk Y.I., Krieger A.G., Khairieva A.V. Diagnostic significance of three-dimensional CT image reconstructions in patients with ductal adenocarcinoma of the pancreas. *Rossiiskii elektronnyi zhurnal luchevoi diagnostiki = Russian Electronic Journal of Radiation Diagnostics*. 2017;7(1):69–76. (In Russ.) EDN YMFRXX. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2017-7-1-69-76>
11. Khoruzhik S.A., Mikhailov A.N. Fundamentals of CT imaging Part 2. Postprocessing image processing. *Radiologiya – praktika = Radiology – Practice*. 2011;(4):52–65. (In Russ.) EDN NYBQMX
12. Kondratova G.M., Mitkov V.V., Bryukhovetsky Y.A. Technology of three-dimensional ultrasound examination of the gallbladder. *Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika = Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2007;(3):14–27. (In Russ.) EDN JWWSNZ
13. Boyko D.A., Filatova A.E. Method of visualization of pathological structures on mammograms. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Khar'kovskii politekhnicheskii institut. Seriya: Informatika i modelirovanie = Bulletin of the National Technical University*

*Kharkiv Polytechnic Institute. Series: Computer Science and Modeling.* 2013;(39):9–14. (In Russ.) EDN RCNMQJ

14. Dubrovin A.V., Koshkarov A.A. From PACS to teleradiology. *Vrach i informatsionnye tekhnologii = Doctor and Information Technologies.* 2017;(3):106–111. (In Russ.) EDN ZGYVPN

15. Kovalenko A.S., Pesentsali A.A., Tsarenko E.K. Preparation of medical images for processing in large information repositories. *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika = Cybernetics and Computer Engineering.* 2014;(2):46–53. (In Russ.) EDN QRQXTB

16. Holeva A.A., Aghababayan T.A., Nevolskikh A.A., et al. Possibilities of computed tomography in assessing the quality of surgical treatment in patients with tumors of the right half of the colon. *Koloproktologiya = Coloproctology.* 2024;23(3):87–99. (In Russ.) EDN YLQXDK. <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2024-23-3-87-99>

17. Litvin A.A., Burkin D.A., Kropinov A.A., Paramzin F.N. Radiomics and texture analysis of digital images in oncology (review). *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine.* 2021;13(2):97–106. (In Russ.) EDN AITKVR. <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.2.11>

18. Obukhova N.A., Motyko A.A. Methods of processing and analyzing medical TV images. *Televidenie: peredacha i obrabotka izobrazhenii = Television: Transmission and Image Processing.* 2016;(1):10–15. (In Russ.) EDN XINNSJ

19. Svyatnenko A.V., Demko A.E., Surov D.A., et al. The first experience of using augmented digital reality (AR) technology in reconstructive surgery of the bile ducts. *Vestnik Natsional'nogo mediko-khirurgicheskogo tsentra im. N.I. Pirogova = Bulletin of the National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov.* 2024;19(2):159–163. (In Russ.) EDN XWMXXS. [https://doi.org/10.25881/20728255\\_2024\\_19\\_2\\_159](https://doi.org/10.25881/20728255_2024_19_2_159)

20. Kozar R.V., Navrotsky A.A., Gurinovich A.B. Methods of recognition of medical images in computer diagnostics problems. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny = Proceedings of Gomel State University named after F. Skoriny.* 2020;(3):116–121. EDN HJRPNR

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Сергеев Дмитрий Викторович**, аспирант,  
Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: [sdv583@mail.ru](mailto:sdv583@mail.ru),  
ORCID: 0009-0001-2236-3449

**Dmitry V. Sergeev**, Post-Graduate  
Student, Southwest State University,  
Kursk, Russian Federation,  
e-mail: [sdv583@mail.ru](mailto:sdv583@mail.ru),  
ORCID: 0009-0001-2236-3449

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-91-116>



УДК 004.89:621.317.616

## Методы и алгоритмы идентификации особых точек на снимках, полученных с бортового фотовидеорегастратора беспилотного летательного аппарата

И. Н. Горбачев<sup>1</sup>, Р. А. Томакова<sup>1</sup>✉, С. В. Коробков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования** – развитие методов управления беспилотными летательными аппаратами на основе анализа данных, поступающих из видеопотока.

**Методы.** Беспилотный летательный аппарат может потерять связь со спутниковой системой навигации, поэтому актуальной становится задача обеспечения его ориентирования с помощью бортового фотовидеорегастратора с обработкой данных на борту. Для этого используют особые точки на местности, при идентификации которых на снимке можно восстановить ориентирование летательного аппарата. Для поиска особых точек типа блоб на снимке предложен метод трансформации исходного изображения в изображение критериев, после пороговой обработки которого получают координаты блобов. Разработан метод трансформации исходного изображения в изображение критериев, заключающийся в определении корреляционных изображений. Для каждого корреляционного изображения определяется скалярный критерий идентификации блоба, позволяющий определять координаты особой точки на снимках, полученных с бортового фотовидеорегастратора.

**Результаты.** Для повышения точности определения координат блобов на снимках использовался агрегированный блоб из трех особых точек. Исследован алгоритм двухступенчатой идентификации координат агрегированного блоба, на первой ступени которого определяются координаты особых точек, наиболее близкие координатам вершин агрегированного блоба, а на второй ступени определяются координаты вершин треугольника, центр тяжести которого наиболее близок к центру тяжести агрегированного блоба. Алгоритмы поиска особых точек показали свою работоспособность при высоком уровне помех, моделируемых на изображении посредством гауссова шума и помех, связанных с отклонением летательного аппарата от заданного курса.

**Заключение.** Формирование агрегированного блоба с последующей многоступенчатой идентификацией позволяет повысить точность определения его координат, а также дает возможность фиксировать отклонение от курса летательного аппарата на участке двух смежных снимков и вводить соответствующие поправки в систему навигации.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; особые точки типа блоб; алгоритм поиска особых точек на снимке с бортового фотовидеорегастратора; критерий уникальности пикселя изображения.

© Горбачев И. Н., Томакова Р. А., Коробков С. В., 2025

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

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

**Для цитирования:** Горбачев И. Н., Томакова Р. А., Коробков С. В. Методы и алгоритмы идентификации особых точек на снимках, полученных с бортового фотовидеорегастратора беспилотного летательного аппарата // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 91–116. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-91-116>

Поступила в редакцию 11.01.2025

Подписана в печать 07.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## Methods and algorithms for identifying special points in images obtained from an onboard photo video recorder of an unmanned aerial vehicle

Igor N. Gorbachev<sup>1</sup>, Rimma A. Tomakova<sup>1</sup> ✉,  
Sergey V. Korobkov<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: [rtomakova@mail.ru](mailto:rtomakova@mail.ru)

### Abstract

**The purpose of the research** is to develop methods for controlling unmanned aerial vehicles based on the analysis of data coming from a video stream.

**Methods.** An unmanned aerial vehicle can lose contact with the satellite navigation system, so the task of ensuring its orientation using an onboard photo video recorder with onboard data processing becomes relevant. For this purpose, special points on the terrain are used, the identification of which in the picture allows restoring the orientation of the aircraft. To search for special points of the blob type in the picture, a method is proposed for transforming the original image into a criterion image, after threshold processing of which the coordinates of the blobs are obtained. A method has been developed for transforming the original image into a criterion image, which consists in determining correlation images. For each correlation image, a scalar blob identification criterion is determined, which allows determining the coordinates of a special point in pictures obtained from an onboard photo video recorder.

**Results.** To improve the accuracy of determining the coordinates of blobs in pictures, an aggregated blob of three special points was used. An algorithm for two-stage identification of coordinates of an aggregated blob is investigated. At the first stage, the coordinates of special points closest to the coordinates of the vertices of the aggregated blob are determined, and at the second stage, the coordinates of the vertices of the triangle whose center of gravity is closest to the center of gravity of the aggregated blob are determined. The algorithms for searching for special points have shown their efficiency at a high level of interference modeled in the image by means of Gaussian noise, as well as interference associated with the deviation of the aircraft from the specified course.

**Conclusion.** The formation of an aggregated blob with subsequent multi-stage identification allows for increasing the accuracy of determining its coordinates, and also makes it possible to record the deviation from the course of the aircraft in the area of two adjacent images and introduce appropriate corrections into the navigation system.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; special points of the blob type; algorithm for searching for special points on a photo from an onboard photo video recorder; criterion for the uniqueness of an image pixel.

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

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

**For citation:** Gorbachev I.N., Tomakova R.A., Korobkov S.V. Methods and algorithms for identifying special points in images obtained from an onboard photo video recorder of an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(1):91–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-91-116>

Received 11.01.2025

Accepted 07.02.2025

Published 31.03.2025

\*\*\*

## Введение

Мониторинг наземной обстановки посредством видеосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является важным этапом обследования мест чрезвычайных ситуаций. Для ориентирования БПЛА в полете используются системы спутниковой связи, а также инерциальная система, в которую входят высотомер, гироскоп, акселерометр и магнитометр [1]. Однако модуль системы связи может потерять сигнал, в результате чего БПЛА теряет свою ориентацию в пространстве. Поэтому актуальной становится задача обеспечения ориентирования БПЛА с помощью бортового фотовидеорежистратора с обработкой данных на борту. Такой подход предполагает, что проведена аэроразведка территории предполагаемого полета БПЛА, в результате чего выделены на местности характерные объекты с привязкой их к карте местности и составлены таблицы азимутов для направлений от одного выделенного объекта к другому [2]. Характерные объекты, координаты которых используются для

системы навигации БПЛА, принято называть особыми точками или реперными точками. Таким образом, для обеспечения ориентировки БПЛА при отсутствии спутниковой связи необходимы алгоритмы поиска особых точек на снимках под углом 90 градусов к поверхности земли, поступающих от фотовидеорежистратора [3].

В настоящее время известно множество различных подходов к поиску объектов при мониторинге местности. Современные технологии, а также классические методы обработки изображений, обеспечивающие их улучшение и информативность, позволяют распознать объект интереса на достаточно большом расстоянии. Обнаружение аномальных объектов или особых точек на изображениях и видеопоследовательностях – это очень важная и востребованная область компьютерного зрения. Задачи такого плана возникают при поиске реперных точек в системе управления БПЛА или наземными роботами, при анализе видеоряда изображений анатомического органа в медицинской диагностике, поиске источника возгорания на спут-

никовых снимках, обнаружении лиц в системах контроля и наблюдения и т. д. [4; 5].

Считается, что фундаментальные исследования в этой области были начаты в 1981 г. с выходом работы Моравца [6]. Особые точки каждый метод определяет по-своему, поэтому особой точкой будет считаться та точка, которую относит к особой алгоритм, реализующий соответствующий метод. Известно множество методов и алгоритмов для определения особых точек: методы, основанные на интенсивности изображения, методы, использующие контурный анализ, и методы, основанные на использовании модели с интенсивностью в качестве параметров. Среди множества методов поиска особых точек выделим два подхода [6; 7]. Методы, относящиеся к первому подходу, сначала применяют детектор признаков [8] для определения набора особых точек, а затем представляют фрагменты изображения вокруг этих точек, т. е. этот подход следует принципу «обнаружить, затем описать». Но этот подход имеет ряд недостатков, основным из которых является то, что претенденты на особые точки определяются на основе анализа локальных фрагментов изображения, что не позволяет сопоставлять изображения при различных масштабах и освещенности. В настоящее время чаще используют подход «описать и обнаружить». Методы, построенные на его основе, вычисляют

набор карт признаков, а затем эти карты признаков используются для вычисления дескрипторов, которые используются в качестве входного вектора обучаемого классификатора [9].

Для обнаружения особых точек используют детекторы, а для их описания используют дескрипторы, которые оценивают их позиции через описание окрестностей особых точек. В качестве окрестности особой точки изображения для большинства алгоритмов берётся прямоугольное окно, составляющее размер  $5 \times 5$  пикселей. В качестве методов обнаружения особых точек наиболее известными являются детектор Моравца, детектор Харриса, Фёрстнера и Гёлча, алгоритм SUSAN, алгоритм FAST, оператор Тряковица.

Входными данными дескриптора является изображение и набор особых точек, выделенных на заданном изображении. Выходом дескриптора является множество векторов – признаков для исходного набора особых точек. Необходимо отметить, что какие-то дескрипторы решают одновременно две задачи – поиск особых точек и построение описателей этих точек. Например, дескриптор SURF решает две задачи – поиск особых точек изображения и создание их дескрипторов. Обнаружение особых точек в SURF основано на вычислении детерминанта матрицы Гессе (гессиана) [10]:

$$H(f(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\det(H) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2.$$

Дескриптор представляет собой набор из 64 (либо 128) чисел в окрестности каждой особой точки. Эти числа отображают флуктуации градиента вокруг этой точки. Теоретически вычисление матрицы Гессе сводится к

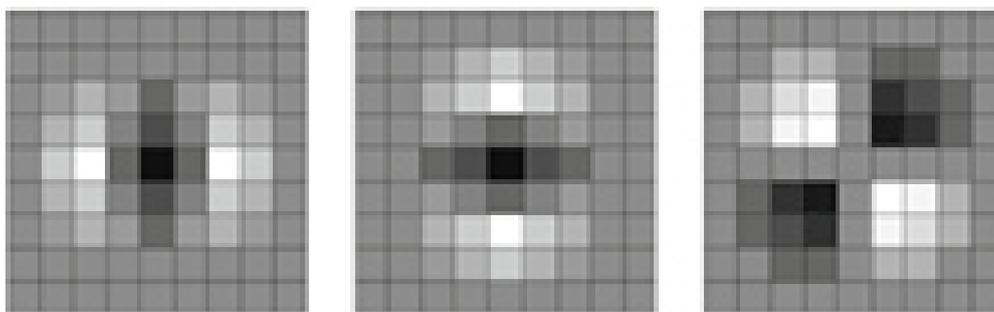


Рис. 1. Дискретизированные фильтры для нахождения элементов матрицы Гессе

Fig. 1. Discretized filters for finding the elements of the Hessian matrix

Для нахождения особых точек SURF ищет максимум гессиана в каждом пикселе изображения. Метод распознает как светлые точки на темном фоне, так и темные точки на светлом фоне. Гессиан инвариантен относительно вращения, но не инвариантен к масштабу. Поэтому SURF поочередно применяет различные масштабы фильтров к данному пикселу. Дополнительно к дескриптору заносится след матрицы Гессе. Эти компоненты необходимы, чтобы различать темные и светлые пятна. Для светлых точек на темном

нахождению фильтра Лапласиана-Гауссиана (свёртка фильтра с изображением). Дискретизированные фильтры для нахождения четырех элементов матрицы Гессе представлены на рисунке 1 (изображено только три фильтра, так как матрица Гессе симметрична и третий фильтр совпадает с четвертым). Фильтры имеют пространственный масштаб – 9×9 пикселей. Темные участки соответствуют отрицательным значениям фильтра, светлые – положительным.

фоне след отрицателен, для темных точек на светлом фоне – положителен. Гессиан не инвариантен относительно масштаба. Это значит, что для одного и того же пиксела гессиан может меняться при изменении масштаба фильтра. Решение этой проблемы только одно – перебирать различные масштабы фильтров и поочередно их применять к данному пикселу.

Для автоматического обнаружения блоков разных (неизвестных) размеров необходим многомасштабный подход [11; 12]. Согласно теории масштабного

пространства, обычный многомасштабный детектор пятен LoG может обнаруживать пятна разных масштабов, обнаруживая локальные экстремумы представления масштабного пространства LoG после операции LoG, нормализованной по масштабу, где масштаб обнаруженного пятна определяется выбором того, при котором предполагается максимальный отклик фильтра. Однако необходима постобработка обрезки пятен из-за того, что обнаруживается большое количество перекрывающихся пятен [13; 14]. Если размер (масштаб) Лапласиана «соответствует» размеру особой точки в виде пятна (блоба), то величина отклика Лапласиана достигает максимума в центре блоба. Характеристический размер блоба определяют путем свертки с Лапласианом в нескольких масштабах и нахождения максимального отклика.

Для обнаружения блобов, подверженных аффинному преобразованию, в [15] предложили аффинно-адаптированный двумерный детектор пятен для трехмерного поверхностного вывода на основе многомасштабного дескриптора структуры изображения, называемого оконной матрицей второго момента, которая вычисляется с адаптивным выбором как масштабных уровней, так и пространственных положений.

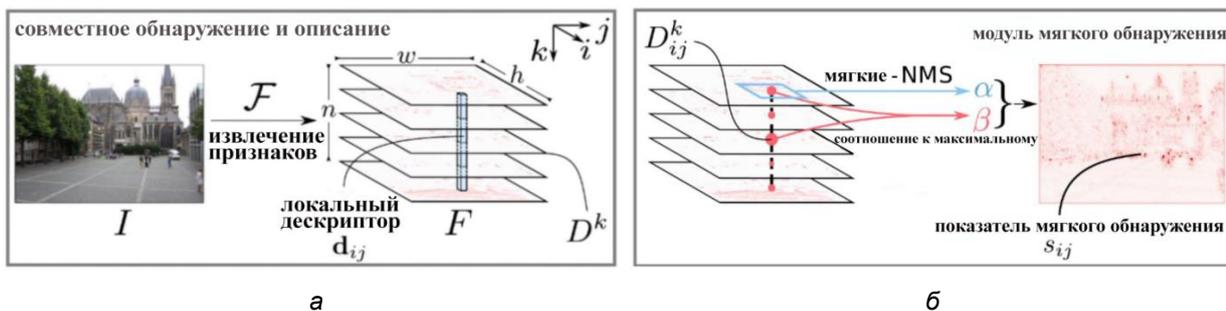
Еще одним широко используемым детектором-дескриптором, устойчивым к изменениям освещения и небольшим сдвигам, является дескриптор SIFT [16].

В этом детекторе-дескрипторе для достижения инвариантности дескрипторов относительно ориентации особой точки определяется основное (доминантное) направление градиентов пикселей окрестности. Вклад каждого пикселя взвешивается по гауссиану с центром в центре окрестности. После определения доминирующего направления в фрагменте изображения его поворачивают так, чтобы доминирующее направление градиентов градиента было направлено вверх. Обычно – сетка  $4 \times 4$  пикселя, в каждой гистограмме восемь интервалов. Получим стандартную длину вектора-дескриптора –  $128 = (4 \times 4 \times 8)$ . Если локальных максимумов несколько, считают, что несколько точек с разной ориентацией.

В настоящее время для обработки и классификации изображений широко используются сверточные нейронные сети (СНС). Рассмотрим структуру СНС, выполняющую функции как детектора, так и дескриптора (рис. 2). Первым шагом метода является применение СНС с архитектурой CNN  $F$  к входному изображению  $I$  для получения трехмерного тензора  $F = F(I), F \in R^{h \times w \times n}$ , где  $h \times w$  – пространственное разрешение карт признаков, а  $n$  – количество каналов (количество ядер фильтров). Тензор  $F$  интерпретируется как набор векторов-дескрипторов:

$$d_{ij} = F_{ij}, d \in R^n, \quad (2)$$

где  $i = 1, \dots, h$  и  $j = 1, \dots, w$ .



**Рис. 2.** Структура совмещенного детектора и дескриптора, выполненного на сверточной нейронной сети: *а* – локальные дескрипторы  $d_{ij}$ , получаемые путем обхода всех  $n$  карт признаков  $D^k$  в пространственной координате  $(i, j)$ ; *б* – работа детектора особой точки осуществляется путем выполнения нелокального максимального подавления на карте признаков с последующим немаксимальным подавлением по каждому дескриптору (во время обучения оценки обнаружения ключевых точек  $s_{ij}$  вычисляются из мягкой оценки локального максимального значения  $\alpha$  и оценки отношения к максимуму на дескриптор  $\beta$ ) [17]

**Fig. 2.** Structure of the combined detector and descriptor implemented on a convolutional neural network: *a* – local descriptors  $d_{ij}$  obtained by traversing all  $n$  feature maps  $D^k$  in the spatial coordinate  $(i, j)$ ; *b* – the keypoint detector operates by performing non-local maximum suppression on the feature map followed by non-maximum suppression for each descriptor (during training, keypoint detection scores  $s_{ij}$  are calculated from a soft estimate of the local maximum value  $\alpha$  and an estimate of the ratio to the maximum per descriptor  $\beta$ ) [17]

Эти векторы дескрипторов можно легко сравнить между изображениями, чтобы установить соответствия между особыми точками с использованием евклидова расстояния. На этапе обучения эти дескрипторы будут скорректированы таким образом, чтобы одни и те же точки на сцене создавали похожие дескрипторы, даже если изображения содержат сильные изменения внешнего вида.

Другая интерпретация 3D-тензора  $F$  – это набор 2D-дескрипторов  $D$ :

$$D^k = F_{:,k}, D^k \in R^{h \times w}, \quad (3)$$

где  $k = 1, \dots, n$ .

В жесткой процедуре обнаружения признаков функция извлечения признаков  $F$  может рассматриваться как  $n$  различных функций детектора признаков  $D^k$ , каждая из которых создает 2D-карту детекторов  $D^k$ . Эти карты детекторов аналогичны картам детекторов SIFT или картам детектора углов Харриса [13].

В данном методе существует несколько карт детекторов  $D^k$  ( $k = 1, \dots, n$ ), и обнаружение может происходить на любой из них. Поэтому условие обнаружения особой точки записывается:

$(i, j)$  – обнаружена  $\Leftrightarrow D^k_{ij}$  – это локальный максимум в  $D^k$ ,

$$k = \arg \max_t D^t_{ij}. \quad (4)$$

Интуитивно понятно, что для каждого пикселя  $(i, j)$  это соответствует выбору наиболее предпочтительного детектора  $D^k$  (выбор канала), а затем проверке, есть ли локальный максимум в позиции  $(i, j)$  на карте отклика этого конкретного детектора  $D^k$ .

Во время обучения жесткая процедура обнаружения, описанная выше, смягчается, чтобы быть пригодной для обратного распространения. Сначала определяют мягкую локальную максимальную оценку:

$$\alpha^k_{ij} = \frac{\exp(D^k_{ij})}{\sum_{i', j' \in N(i, j)} \exp(D^k_{i', j'})}, \quad (5)$$

где  $N(i, j)$  – это набор из 9 соседних пикселей  $(i, j)$  (включая себя).

Затем определяют мягкий выбор канала, который вычисляет отношение к максимуму на дескриптор, который эмулирует подавление немаксимума по каналам:

$$\beta_{ij}^k = D_{ij}^k / \max_t D_{ij}^t. \quad (6)$$

Далее, чтобы учесть оба критерия, максимизируют произведение обеих оценок по всем картам признаков  $k$ , чтобы получить единую карту оценок:

$$\gamma_{ij} = \max(\alpha_{ij}^k \beta_{ij}^k). \quad (7)$$

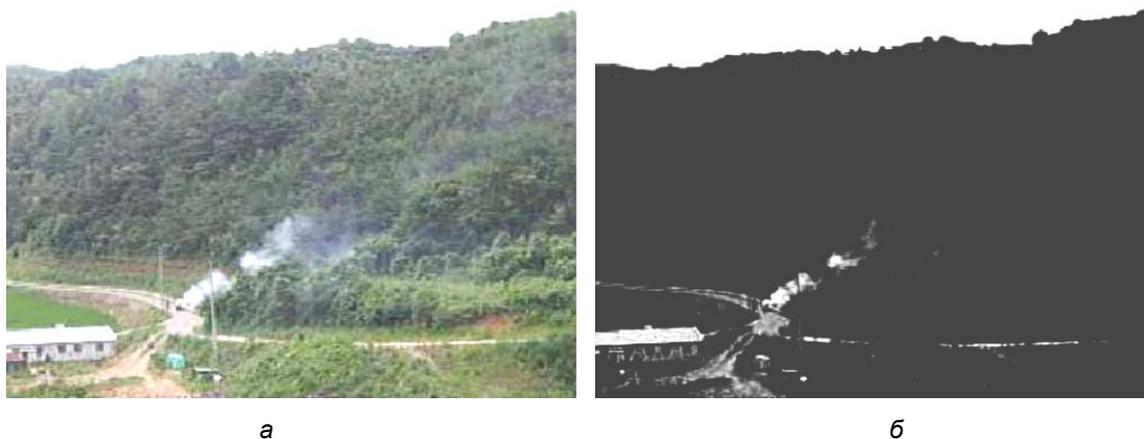
Если резюмировать этот подход, то мы должны иметь дескриптор особой точки для ее обнаружения этим методом, а также датасет особой точки, чтобы обучить СНС для ее обнаружения. Выбор же особой точки, как и соответствующий алгоритм ее обнаружения, остается за ЛПР.

### Материалы и методы

Проблема поиска на изображении особых точек включает две задачи,

которые можно решать совместно или по отдельности. Первая задача связана с детектором особых точек. Она включает процедуры выбора особых точек и процедуру селекции особых точек. В такой постановке этой задачи особую точку можно не описывать, т. е. не искать ее дескрипторы, а удовлетвориться только ее координатами. Но чаще всего дескрипторы находить все-таки приходится, так как после определения особой точки необходимо либо ее классифицировать, либо определить ее статус в качестве реперной, что тоже требует ее описание с целью поиска ее на других снимках видеопотока.

Вторая задача, вытекающая из этой проблемы, – это поиск на изображении области или фрагмента заданного класса. Обычно в особые точки делят на «углы», «капли», «блобы». В настоящем исследовании рассматриваются особые точки только класса «блоб», под которыми понимают области определенного размера, которые выделяются на снимке своей яркостью или формой. На рисунке 3 представлены примеры блобов на снимке из видеоряда.



**Рис. 3.** Пример снимка из видеоряда с особыми точками класса «блоб»: а – исходное цветное изображение; б – полутоновое изображение

**Fig. 3.** Example of a snapshot from a video sequence with special points of the “blob” class: а – the original color image; б – grayscale image

На первом снимке (а) представлен исходный снимок. В качестве блобов здесь можно выделить крышу здания, дорогу и дым, (б) – показаны эти особые точки в формате полутонового изображения.

При работе с блобами необходимо решить две задачи. Первая задача – это выбор самого блоба. Эту задачу часто возлагают на лицо, принимающее решение (ЛПР). Однако очень часто реперную точку приходится выбирать в автоматическом режиме при переходе БПЛА в автономный режим полета [18]. Вторая задача – поиск блоба на снимках видеоряда. В данной работе мы остановимся на решении второй задачи, полагая, что сам блоб уже выбран.

В качестве примера рассмотрим снимок с видеоряда, полученного от

видеокамеры БПЛА при мониторинге распространения ландшафтного пожара (рис. 4, а). Анализ снимка показывает, что выбор реперной точки весьма сложен. Здесь стоит обратить внимание на объекты, остающиеся после на выжженном участке поверхности. Они достаточно крупные, что позволяет использовать их в качестве блобов, однако на снимке их много, и они расположены в хаотическом порядке, что затрудняет их идентификацию на других снимках видеоряда. Поэтому целесообразно выбрать несколько близко отстоящих объектов и связать их геометрической фигурой. На рисунке 4, б показан фрагмент снимка, на котором выделены три объекта, которые можно рассматривать как вершины треугольника.



**Рис. 4.** Обнаружение блоба на снимке видеоряда мониторинга распространения ландшафтного пожара: а – исходный снимок из видеоряда мониторинга распространения ландшафтного пожара; б – фрагмент с блобом, определенным по этому снимку

**Fig. 4.** Blob detection in a snapshot of a landscape fire propagation video sequence: а – the original snapshot from a landscape fire propagation video sequence; б – a fragment with a blob identified from this snapshot

Получив блоб в виде треугольника, мы автоматически получаем алгоритм описания его дескрипторов, а также упрощаем поиск его на соседних снимках. При поиске блоба на снимке

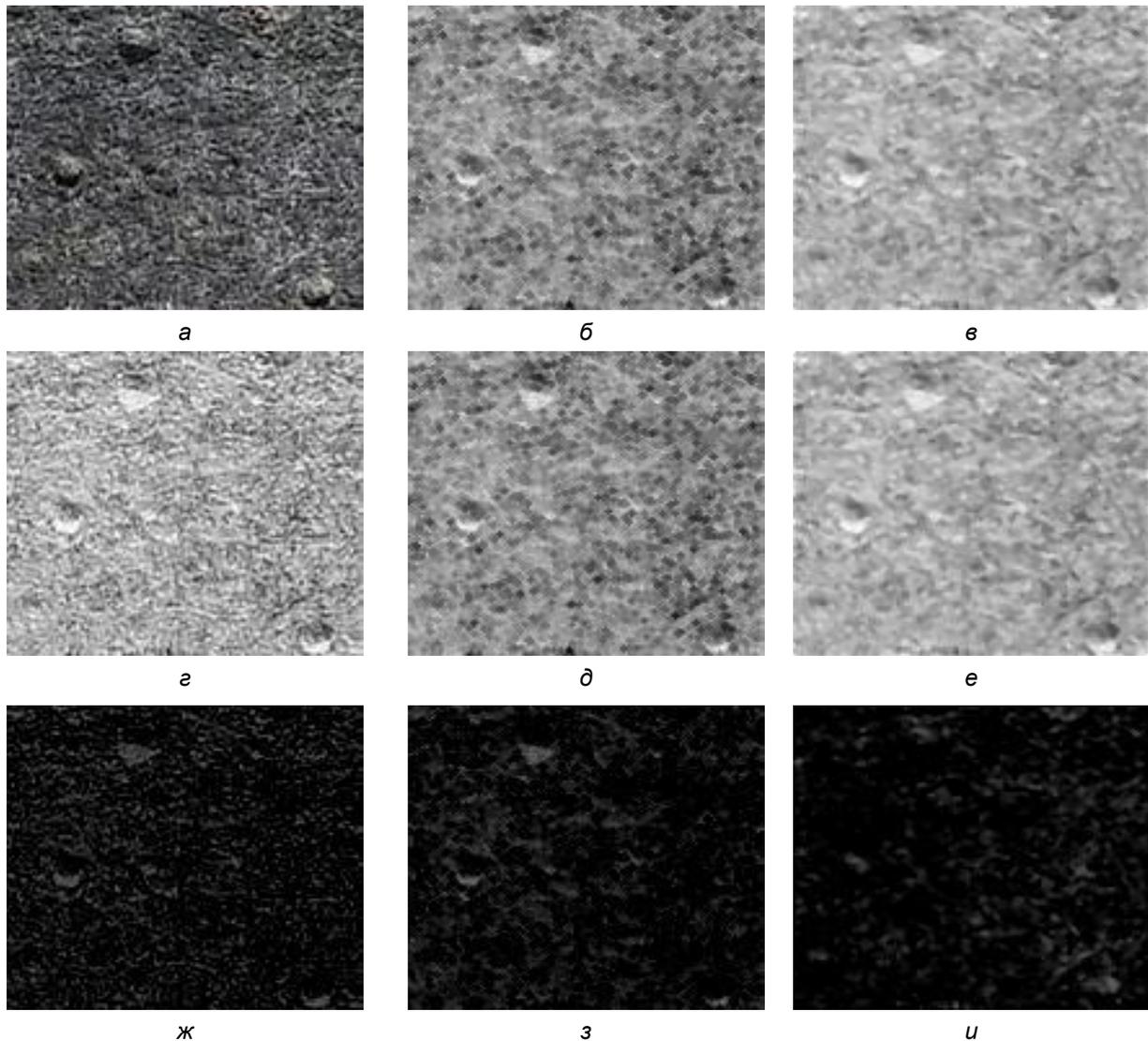
обратим внимание на особенность блобов на снимках данного ландшафтного пожара. Все они имеют тень, которая имеет хорошо выраженное темное пятно у всех объектов, входящих в блоб.

Поэтому целесообразно иметь дело с дополненным изображением, матрица которого вычисляется согласно формуле

$$AI = B - A, \quad (8)$$

где  $A$  – матрица исходного изображения;  $AI$  – матрица дополненного изображения,  $b_{i,j} = 255 \quad \forall i, j$ .

Результаты обработки изображения (рис. 4, б) представлены ниже (рис. 5).



**Рис. 5.** Последовательность формирования дополненных изображений после различных видов предварительной обработки: *а* – исходное изображение, полученное на рисунке 4, *б*; *б* – результат применения операции дилатации к исходному изображению; *в* – результат медианной фильтрации изображения с морфологической операцией дилатация; *г* – результат дополнения к изображению *а*; *д* – результат дополнения к изображению *б*; *е* – результат дополнения к изображению *в*; *ж* – результат после удаления постоянной составляющей для изображения *д*; *з* – результат после удаления постоянной составляющей для изображения *е*; *и* – результат после удаления постоянной составляющей для изображения *е*

**Fig. 5.** The sequence of augmented images formation after various types of preprocessing: *a* – the original image obtained in figure 4, *б*; *б* – the result of applying the dilation operation to the original image; *в* – the result of median filtering of the image with the morphological operation dilation; *г* – the result of addition to image *а*; *д* – the result of addition to image *б*; *е* – the result of additions to image *в*; *ж* – the result after removing the constant component for image *д*; *з* – the result after removing the constant component for image *е*; *и* – the result after removing the constant component for image *е*

Верхний ряд из трех изображений показывает, слева направо, само изображение (рис. 4, б) и его изображения после дилатации и медианной фильтрации. Дополненное изображение для изображений верхнего ряда показаны в среднем ряду. В нижнем ряду показаны изображения среднего ряда после удаления постоянной составляющей.

Анализируя изображения в двух последних рядах рисунка 5, можем сделать заключение, что зрительный анализатор может выделить блок на всех изображениях в соответствии с априорной информацией о структуре блока. Но для компьютерной программы обнаружения блока нужен критерий, в соответствии с которым она отнесет точку (пиксель)-претендент к классу блок / не блок. Отметим, что такая же проблема стоит и при выборе блока на изображении.

Чтобы найти особую точку на снимке, необходимо априорно определить характеристику ее уникальности, а также ее размеры. По определению

$$\vartheta_{i1,j1} = \frac{\sum_{\xi1 \in n, \zeta1 \in m} SS_{i1,j1}^2(\xi1, \zeta1)}{2 \cdot \sum_{\xi1 \in (N-K), \xi1 \in (M-L)} SS_{i1,j1}^2(\xi1, \zeta1) - \sum_{\xi1 \in n, \zeta1 \in m} SS_{i1,j1}^2(\xi1, \zeta1) + 1}, \quad (9)$$

где  $\sum_{\xi1 \in (N-K), \zeta1 \in (M-L)} SS_{i1,j1}^2(\xi1, \zeta1)$  – энергия изображения  $SS_{i1,j1}$ ;  $\sum_{\xi1 \in n, \zeta1 \in m} SS_{i1,j1}^2(\xi1, \zeta1)$  – энергия изображения  $SS_{i1,j1}$  в окне размером  $n \times m$  с центром в пикселе с координатами  $(i1, j1)$ ;  $SS(i1, j1)$  – яркость пикселя изображения  $SS$  в координате  $(i1, j1)$ .

особая точка должна выделяться на снимке своими уникальными характеристиками. Основная характеристика – это ее яркость. Однако на снимке может быть множество сегментов с высокой яркостью, что вызывает необходимость выбора или оптимизации.

Для принятия решений по выбору особой точки примем следующее правило. Выберем на изображении  $S$  размером  $N \times M$  в координате  $(i, j)$  окно размером  $K \times L$ . Определим свертку этого окна с исходным изображением  $S$ . В результате получим новое изображение  $SS$ . Учитывая, что, по существу, мы определяем корреляционную функцию в окне, то наиболее ярким пикселем на изображении  $SS_{i1,j1}$  будет пиксель с координатами  $(i1, j1)$ . Однако возможна ситуация, когда таких пикселей будет много, или будут пиксели, в которых яркость выше, чем у пикселя  $(i1, j1)$ . В качестве критерия уникальности пикселя  $(i1, j1)$  вводим следующий критерий:

Размер окна  $n \times m$  на изображении  $SS$ , а также его соотношение с размером окна  $K \times L$  на изображении  $S$  подбирается для каждой конкретной задачи. В частном случае область  $n \times m$  может быть уменьшена до одного пикселя и тогда формула (8) примет вид

$$\vartheta_{i1,j1} = \frac{SS_{i1,j1}^2(i1, j1)}{2 \cdot \sum_{\xi1 \in (N-K), \xi1 \in (M-L)} SS_{i1,j1}^2(\xi1, \zeta1) - SS_{i1,j1}^2(i1, j1) + 1}. \quad (10)$$

Множитель 2 перед первым слагаемым в знаменателях (9) и (10) позволяет установить верхнее предельное значение критерия равным единице, при его нижнем значении равном нулю.

Учитывая, что особая точка может характеризоваться не только максимальной яркостью, но и минимальной яркостью, то для того, чтобы критерий (9) работал и в этом случае, необходимо из исходного изображения вычесть постоянную составляющую яркости и работать как с положительными, так и с отрицательными отсчетами яркости.

На рисунке 6 представлена схема алгоритма формирования критерия (9) для выделения особой точки в виде блоба. Перед поиском блоба на изображении  $S$  из этого изображения вычитается среднее значение яркости. В итоге мы получаем отрицательные отсчеты яркости, и тогда критерий (9) не зависит от того, каким образом представлен блоб: либо светлым пятном, либо темным пятном. Процедура смещения уровня яркости изображения  $S$  выполняется в блоках 1 и 2. В блоке 3 задаются размеры ядра фильтра свертки. Ядро размером  $K \times L$  используется для определения корреляции элементов изображения, попавших в маску ядра  $G$ , с элементами самого ядра  $G$ . Таким образом, цель алгоритма состоит в определении изображения  $SS$ , элементами которого являются свертки изображения  $S$  с ядрами  $G_{i1,j1}$ , полученными в  $K \times L$  – окрестности пикселя  $(i1,j1)$  изображения  $S$ , т. е., для  $(i1,j1)$ -го пикселя изображения  $SS$  можем записать

$$SS_{i1,j1} = S * G_{i1,j1}. \quad (11)$$

Для формирования ядер  $G_{i1,j1}$  в схеме алгоритма используются блоки 6,

7, 8. В общем случае формируется  $(N-K)(M-L)$  ядер, что обеспечивается циклами, организованными блоками 4 и 5.

В циклах, организованных блоками 9 и 10, формируются элементы изображения  $SS$  согласно формуле (9). Непосредственно свертка (11) вычисляется в блоке 11, а в блоке 12 осуществляется ее нормирование по размеру окна. После вычисления всех свертки ядра  $G_{i1,j1}$  с изображением  $S$  вычисляется по формуле (9) элемент  $(i1,j1)$  изображения критериев  $\Theta$  (блок 13).

Таким образом, элементами изображения  $\Theta$  являются критерии (9), вычисленные для изображений, полученных в результате свертки изображения  $S$  с ядрами  $G$ , полученными на том же изображении. После получения изображения  $\Theta$  оно бинаризуется на уровне порога, который задается в блоке 14. Перевод изображения  $\Theta$  в бинарное осуществляется в блоке 15. ЛПП может сам анализировать полученное в блоке вывода 16 бинарное изображение или направить его на очередную ступень интеллектуальной обработки.

Для получения изображения критериев (блок 13, рис. 6) предлагается алгоритм, представленный ниже (рис. 7). Алгоритм иллюстрирует только вычисление одного пикселя (координаты  $i1,j1$ ) изображения критериев. Остальные пиксели определяются по тому же алгоритму, меняются только корреляционные изображения в блоке 1, который осуществляет ввод изображения, на основе которого вычисляется критерий (9). В блоке 2 вводится размер окна для вычисления критерия, а блоки 3–6 вычисляют «энергию» корреляционной матрицы, которая является слагаемым в знаменателе формулы (9) и (10).

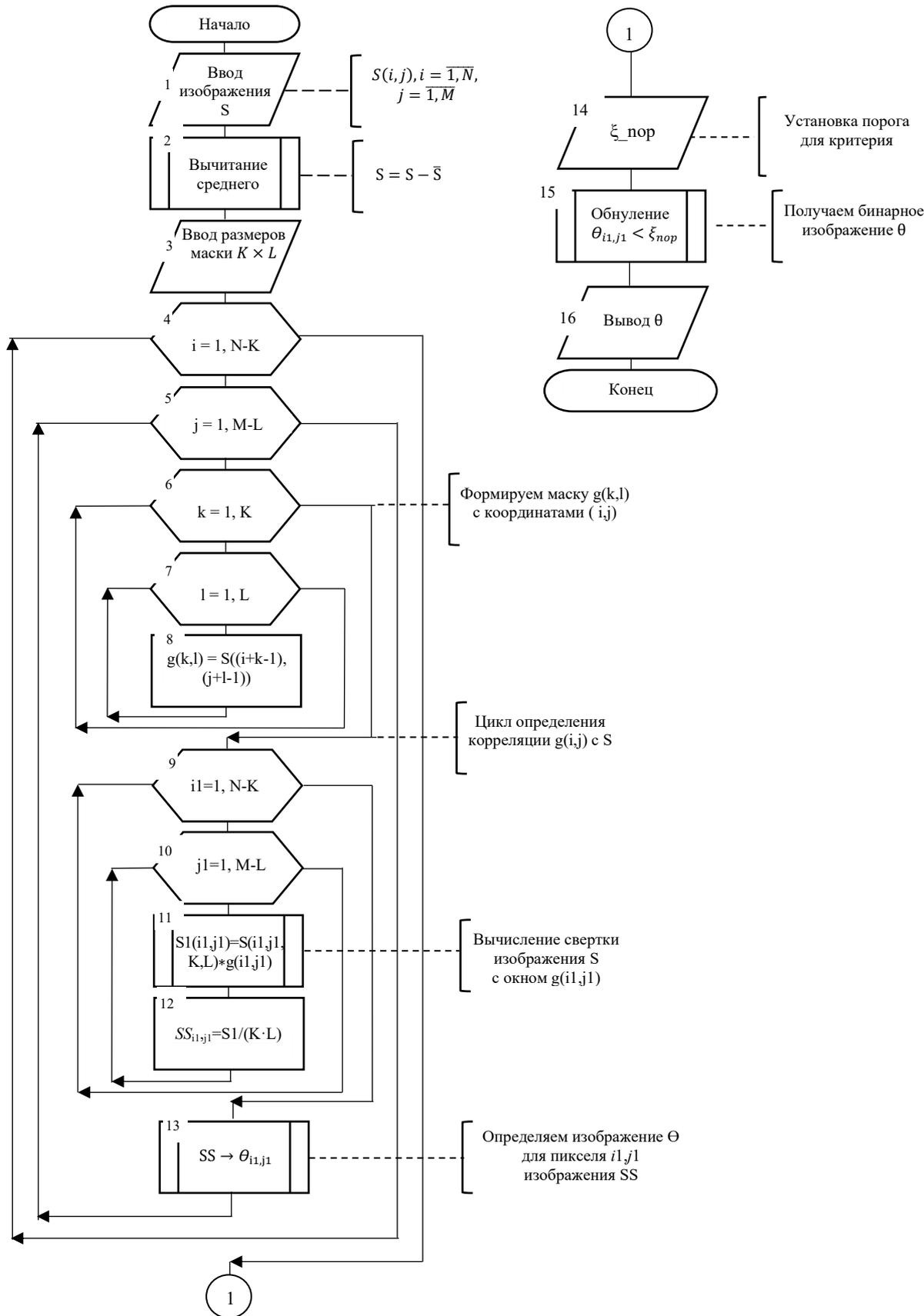


Рис. 6. Схема алгоритма формирования критериев блобов

Fig. 6. Scheme of the algorithm for forming blob criteria

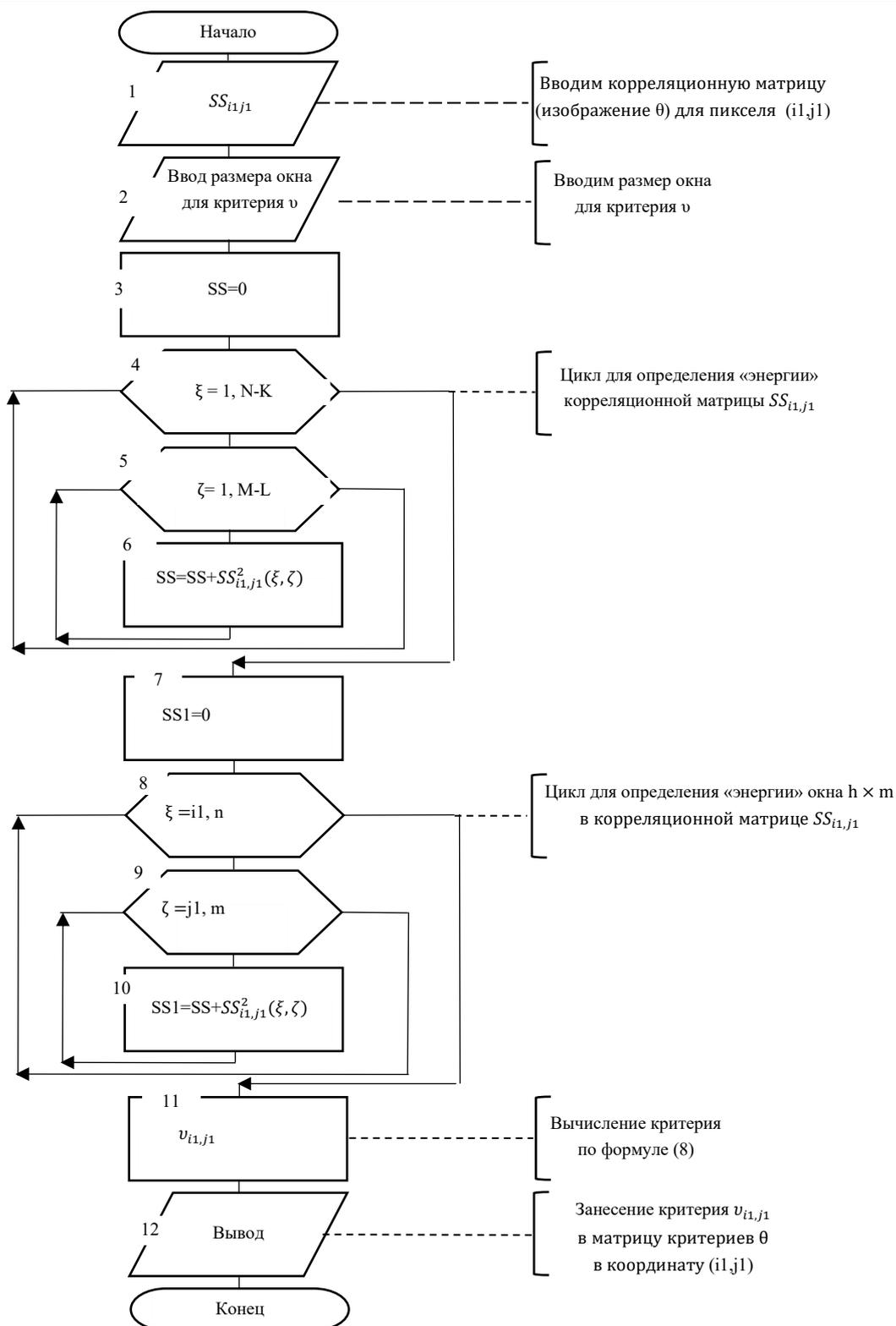


Рис. 7. Схема алгоритма вычисления отсчета матрицы критериев

Fig. 7. Scheme of the algorithm for calculating the matrix of criteria

Для вычисления «энергии» в окне с координатами  $i1, j1$  используем блоки 7–11. Циклы в блоках 8 и 9 организуют

сканирование окна  $n \times m$  с центром в координате  $i1, j1$ , а в блоке 10 осуществляется накопление квадратов отсчетов

изображения, попавших в окно. В блоке 11 вычисляется отсчет матрицы-критериев в координате  $i1, j1$  по формуле (8).

### Результаты и их обсуждение

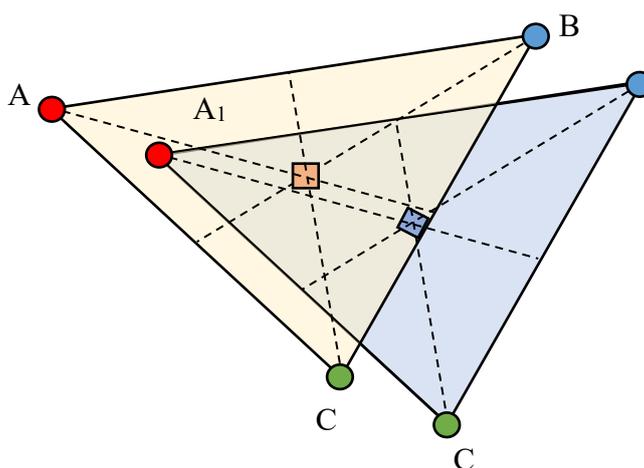
В качестве примера рассмотрим поиск блоба на перекрывающихся изображениях, полученных с бортового фото-видеорегистратора БПЛА. Пример таких изображений представлен ниже (рис. 8).

Будем полагать, что блоб-эталон уже выделен и его координаты представлены в виде координат вершин его образующего треугольника:  $A$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 9). Задача состоит в нахождении координаты блоба на следующем снимке из примера смежных снимков, представленных на рисунке 8, полагая, что БПЛА пролетел расстояние  $d$ .



**Рис. 8.** Смежные снимки видеоряда мониторинга пожарной обстановки

**Fig. 8.** Adjacent images of the video sequence of fire situation monitoring



**Рис. 9.** Схемы блоба-эталона, представленного в виде трех особых точек на двух смежных снимках

**Fig. 9.** Schemes of the blob-standard, presented as three special points on two adjacent images

Для определения допустимого расстояния  $d$  между центрами проекций рассмотрим схему формирования проекций агрегированного блока, представленную ниже (рис. 10). Полагаем, что БПЛА перемещается вдоль отрезка  $SS_1$  с постоянной скоростью  $v$  на постоянной высоте  $H$ . Угол зрения видеокамеры равен  $60^\circ$ .

Рассматриваем все координаты точек в одномерном пространстве на оси  $x$ , которая лежит на подстилающей поверхности. Полагаем, что высота особых

точек агрегированного блока равна нулю. Согласно схеме (рис. 10), отрезок  $M_1M_2 = d_1 - O_1M_2$  определяет размер области перекрытия снимков. Размер снимка  $2d_1 = 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg}30^\circ$ , откуда можем определить время на обработку снимка:  $t = d/v$ , и расстояние  $OM_1$ , которое определяет размер неперекрывающейся области двух снимков.

Рассмотрим схему алгоритма определения координат агрегированного блока (рис. 11).

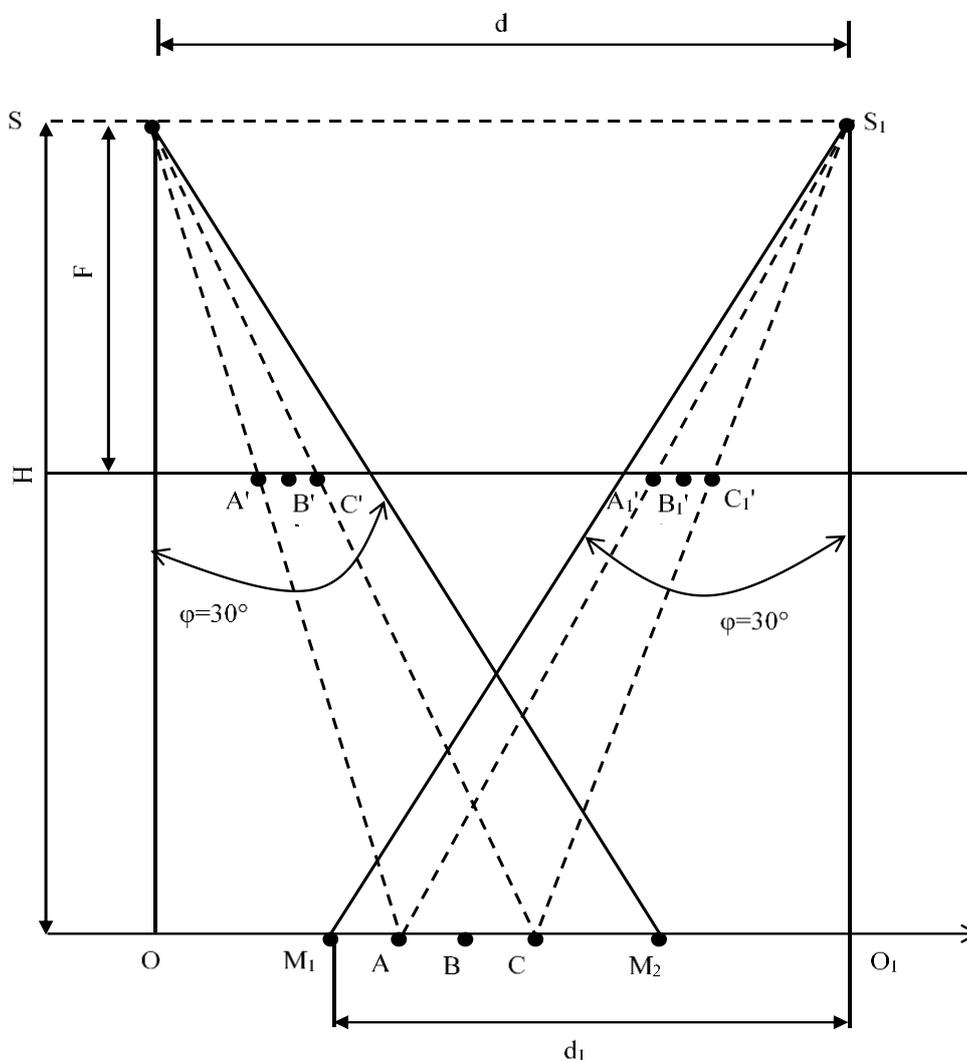


Рис. 10. Схема для определения минимального расстояния  $d$  между центрами проекций  $S$  и  $S_1$  на смежных снимках

Fig. 10. Scheme for determining the minimum distance  $d$  between the centers of projections  $S$  and  $S_1$  on adjacent images

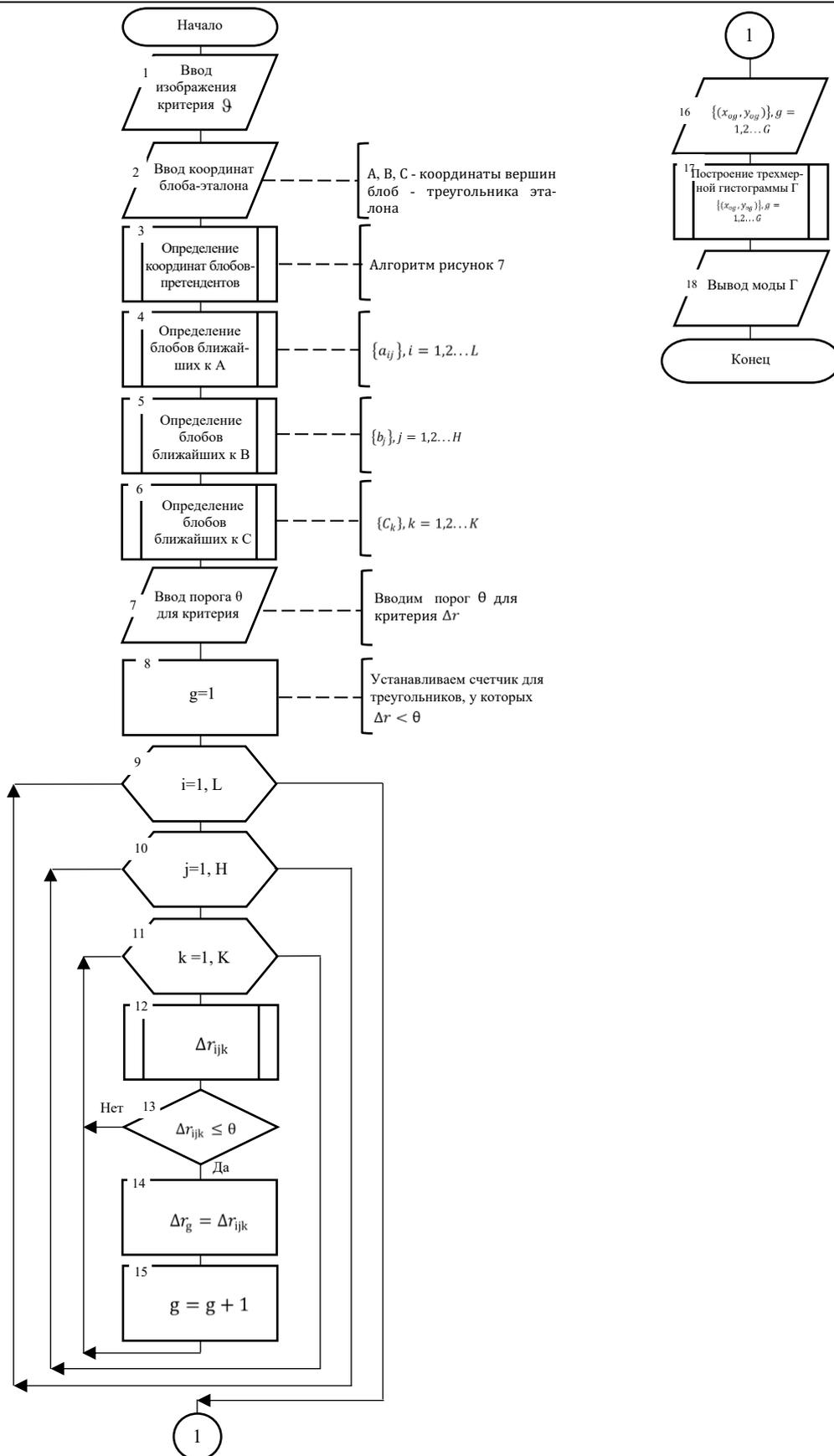
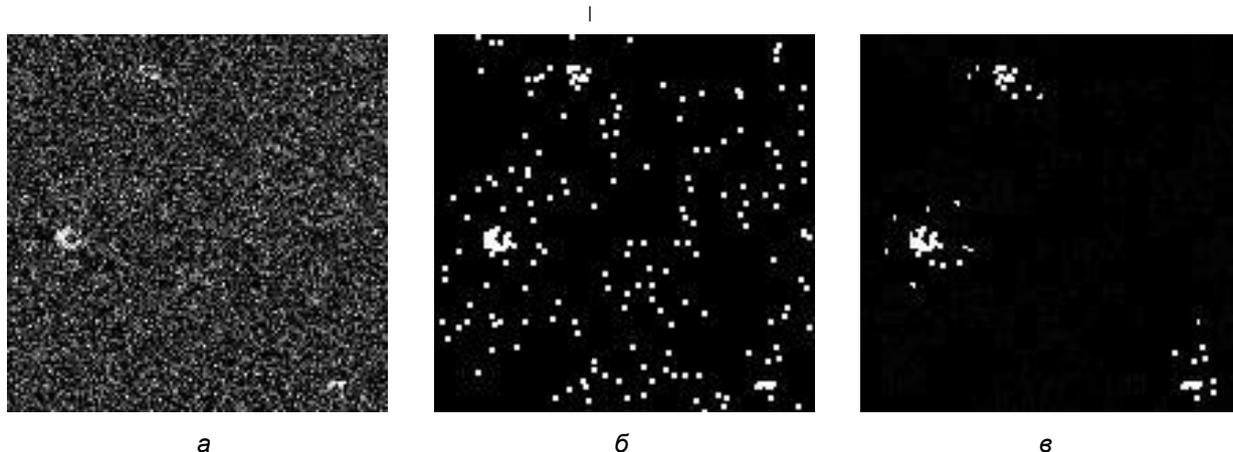


Рис. 11. Схема алгоритма поиска координат агрегированного блока

Fig. 11. Scheme of the algorithm for searching the coordinates of an aggregated blob

В качестве исходной информации для этого алгоритма используют изображение критериев, определенное согласно алгоритму, схема которого представлена на рисунке 6. Последовательность этапов выполнения алгоритма рисунок 11 проиллюстрируем фрагментами изображений, формируемых из изображения на рисунке 4, б.

На рисунке 12, а показан фрагмент с агрегированным блобом, представленным на рисунке 4, а. Изображение искусственно зашумлено гауссовским шумом, среднее квадратическое отклонение (СКО) этого фрагмента составляет 50 [19]. На рисунке 12, б показано изображение критериев, соответствующее этому фрагменту.



**Рис. 12.** Иллюстрация этапов поиска координат агрегированного блоба: а – фрагмент зашумленного изображения с агрегированным блобом; б – промежуточный результат применения критериев, соответствующего фрагменту; в – окончательный результат применения критериев, соответствующего фрагменту изображения

**Fig. 12.** Illustration of the stages of searching for the coordinates of an aggregated blob: а – a fragment of a noisy image with an aggregated blob; б – the intermediate result of applying the criteria corresponding to the fragment; в – the final result of applying the criteria corresponding to the image fragment

Как видно из этого изображения (рис. 12), имеет место достаточно много точек-пикселей, претендующих на координаты особых точек агрегированного блоба. Для их фильтрации воспользуемся тем, что координаты агрегированного блоба выбраны на предшествующем снимке. Если известно расстояние

$d$ , которое пролетел БПЛА между этими двумя снимками, и агрегированный блоб еще «виден» на текущем снимке, то, учитывая, что координаты на местности агрегированного блоба и высота полета не изменялись, можем вычислить координаты агрегированного блоба на текущем снимке [20]:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 - f \frac{a_{11}(X - X_S) + a_{21}(Y - Y_S) + a_{31}(Z - Z_S)}{a_{13}(X - X_S) + a_{23}(Y - Y_S) + a_{33}(Z - Z_S)} \\ y &= y_0 - f \frac{a_{12}(X - X_S) + a_{22}(Y - Y_S) + a_{32}(Z - Z_S)}{a_{13}(X - X_S) + a_{23}(Y - Y_S) + a_{33}(Z - Z_S)} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где  $(XYZ)$  – координаты центра треугольника на местности;  $(xy)$  – координаты центра треугольника на снимке,  $(x_0y_0)$  – координаты центра проекции на снимке;  $(X_S Y_S Z_S)$  – координаты центра проекции на местности;  $f$  – фокусное расстояние съёмочной камеры;  $a_{ij}$  – направляющих косинусов, которые при съёмке в надир принимают значения:  $a_{11} = 1$ ,  $a_{12} = 0$ ,  $a_{13} = 0$ ,  $a_{21} = 0$ ,  $a_{22} = 1$ ,  $a_{23} = 0$ ,  $a_{31} = 0$ ,  $a_{32} = 0$ ,  $a_{33} = 1$ .

Полагая, что высота блока на местности равна нулю, то в этом простейшем случае система уравнений (12) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + f \frac{(X - X_S)}{Z_S} \\ y &= y_0 + f \frac{(Y - Y_S)}{Z_S} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Эти расчеты осуществляются в блоке 3 алгоритма рисунок 9. Отметим, что вычисление этих координат предполагает прямолинейный полет БПЛА. Наличие ветра и воздушных ям приводит к отклонению БПЛА от заданного курса, что вносит дополнительные погрешности при определении координат особых точек.

Если предположить, что полет происходит строго вдоль координаты  $X$ , а  $(X_{S0} Y_{S0})$  – координаты центра проекции на местности на предшествующем снимке, причем  $Y_{S0} = Y_S$ , то (12) примет вид

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + f \frac{(X - X_{S0} + d)}{Z_S} \\ y &= y_0 + f \frac{(Y - Y_S)}{Z_S} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

а предшествующие значения координаты  $X$  определяем по формуле

$$\left. \begin{aligned} X &= X_{S0} + Z_S \frac{(x - x_0)}{f} \\ Y &= Y_{S0} + Z_S \frac{(y - y_0)}{f} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Учитывая вышеприведенные факты, в блоках 4, 5 и 6 алгоритма (рис. 11) для каждого блока, входящего в состав агрегированного блока, определяют множество координат. Для их селекции используют вычисленные ожидаемые координаты блоков и ожидаемые погрешности их определения. Результат такой селекции представлен на рисунке 12, в. В результате селекции получаем множества координат особых точек, которые определяют вершины треугольника ABC, соответствующего агрегированному блоку:

$$\left. \begin{aligned} \{a_i\}, \quad i = 1, 2 \dots L; \quad \{b_j\}, \quad j = 1, 2 \dots H; \\ \{c_k\}, \quad k = 1, 2 \dots K. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

На этом заканчивается первый этап селекции координат агрегированного блока. Второй этап селекции основан на том, что блоки, входящие в агрегированный блок, жестко связаны между собой. Поэтому мы можем зафиксировать точку внутри периметра треугольника ABC, координаты которой также априорно известны, и из всех формируемых множествами (16) треугольников выбрать наиболее подходящий по определенному критерию. В качестве такой точки можно использовать либо координаты центра вписанной в треугольник окружности, либо координаты центра тяжести треугольника. В данной работе

использовались координаты центра тяжести треугольника.

Для определения критерия воспользуемся формулой, определяющей расстояние между прогнозируемым центром тяжести и центром тяжести треугольников, построенным по множествам координат вершин (16):

$$\Delta r_g = \sqrt{(x_u - x_{ug})^2 + (y_u - y_{ug})^2}, \quad (17)$$

где  $(x_u, y_u)$  – координаты центра тяжести агрегированного блока-эталона;  $(x_{ug}, y_{ug})$  – координаты центров тяжести треугольников, образованных из множества вершин (16).

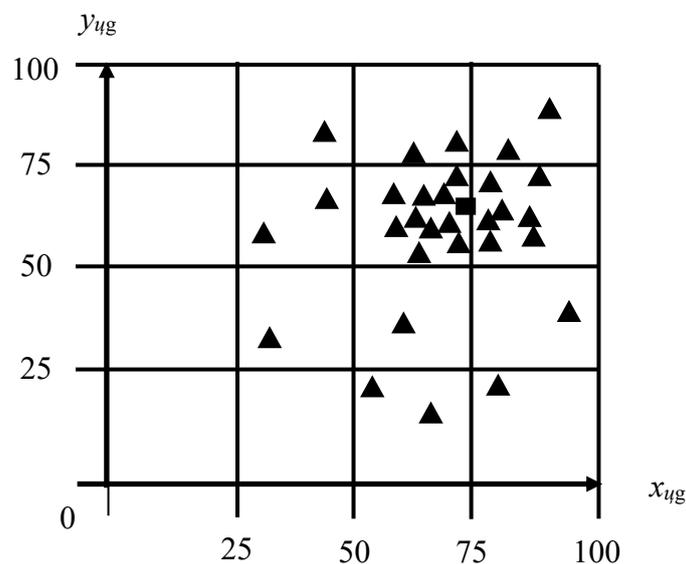
Если (17) не превышает значение порога  $\theta$ , то данная триада остается в качестве претендента на координаты агрегированного блока. Величина порога вводится в блоке 7. В блоке 8 устанавливаем счетчик триад, которые прошли пороговую отсечку  $\theta$ . Формирование

треугольников из множеств (16) осуществляют блоки 9, 10 и 11. В блоке 12 определяется критерий (17). Критерий (17) определяется по правилу определения центра тяжести треугольника, т. е.

$$x_{ug} = \frac{x_i + x_j + x_k}{3}, \quad y_{ug} = \frac{y_i + y_j + y_k}{3}, \quad (18)$$

где векторы  $a(x_i, y_i)$ ,  $b(x_j, y_j)$ ,  $c(x_k, y_k)$  определяют соответствующие координаты вершин треугольников.

Если критерий (17) не превышает пороговый, то соответствующая триада вершин треугольника попадает в пул координат-претендентов агрегированного блока и ей присваивается соответствующий индекс  $g$  (блок 15). В блоке 16 можем вывести это множество и построить по нему трехмерную гистограмму (блок 17) [21]. На рисунке 13 представлена такая гистограмма, построенная для изображения рисунок 12, в.



**Рис. 13.** Гистограмма распределения координат претендентов на центр агрегированного блока:  
 ▲ – координаты претендентов на центр блока по результатам анализа критерия (9);  
 ■ – координата центра блока, определенная по формулам (13) и (15)

**Fig. 13.** Histogram of the distribution of coordinates of candidates for the center of the aggregated blob:  
 ▲ – coordinates of candidates for the center of the blob based on the results of the analysis of criterion (9); ■ – coordinate of the center of the blob, determined by formulas (13) and (15)

Чтобы определить координаты центра агрегированного блока (на рис. 13 он отмечен символом ■) необходимо выполнить следующие процедуры:

1) определить на снимке координаты трех особых точек для агрегированного блока;

2) определить на снимке координаты центра блока;

3) определить координаты на местности особых точек агрегированного блока и его центра [см. формула (15)];

4) получить следующий снимок из видеопотока, на котором еще виден агрегированный блок предыдущего снимка;

5) определить на текущем снимке координаты и центр агрегированного блока [см. формула (14)].

Координаты особых точек агрегированного блока, помеченные на гистограмме символом ▲, вычислялись согласно алгоритму, схема которого представлена на рисунке 11.

1. Для поиска особых точек типа блок на снимках, полученных с бортового фотовидеорегастратора БПЛА, предложен метод трансформации исходного изображения в изображение критериев, после пороговой обработки которого получают координаты блоков.

2. Разработан метод трансформации исходного изображения в изображение критериев, заключающийся в определении корреляционных изображений, число которых соответствует числу пикселей в исходном изображении. Корреляционное изображение определяется

для каждого текущего пикселя исходного изображения путем его свертки с ядром, с центром в текущем пикселе исходного изображения и весами, определяемыми пикселями исходного изображения, попавшими в ядро. Для каждого корреляционного изображения определяется скалярный критерий, который определяет величину пикселя изображения критериев в координате, определяемой индексом корреляционного изображения, на основе которого получен этот критерий.

3. Предложен скалярный критерий идентификации блока, позволяющий определять координаты особой точки на снимках, полученных с бортового фотовидеорегастратора БПЛА.

4. Для повышения точности определения координат блоков на снимках, полученных с бортового фотовидеорегастратора БПЛА, предложено формировать агрегированный блок из трех особых точек, являющихся координатами вершин треугольника.

5. Предложен алгоритм двухступенчатой идентификации координат агрегированного блока, на первой ступени которого определяются координаты особых точек, наиболее близкие координатам вершин агрегированного блока, а на второй ступени определяются координаты вершин треугольника, центр тяжести которого наиболее близок к центру тяжести агрегированного блока.

6. В среде Матлаб осуществлено моделирование предложенных алгоритмов поиска особых точек. Алгоритмы

показали свою работоспособность при высоком уровне помех, моделируемых на изображении посредством гауссова шума, и помех, связанных с отклонением БПЛА от заданного курса.

### Выводы

1. Наличие теней на изображении упрощает процесс обработки изображений и не требует сложных операторов, таких как первые и вторые производные Гауссиана, для выделения блоков на изображении.

2. Формирование агрегированного блока позволяет повысить точность определения его координат, а также дает возможность фиксировать отклонение от курса БПЛА на участке двух смежных снимков и вводить соответствующие поправки в инерциальную систему навигации.

3. Использование двухэтапного обнаружения координат агрегированного блока позволяет повысить качество автономной навигационной системы БПЛА.

### Список литературы

1. Лунев Е. М. Исследование сходимости нового алгоритма определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения // Труды МАИ. 2011. № 45. С. 46.

2. Автоматические классификаторы сложно структурируемых изображений на основе мультиметодных технологий многокритериального выбора / М. В. Дюдин, И. В. Зуев, С. А. Филист, С. М. Чудинов // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 130–140.

3. Automated system for classifying images of video streams for timely detection of fires / S. M. Filist, Riad Taha Al-Kasasbeh, R. A. Tomakova, Osama M. Al-Habahbeh, A'kif Al-Fugara, O. Shatalova, N. A. Korenevskiy, I. N. Gorbachev, A. Shaqadan, M. Ilyash // International Journal of Remote Sensing. 2024. Vol. 45, P. 8157–8180. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2398818>

4. Khan A., Gupta S., Gupta S. K. Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2020. N 47(4). P.101642.

5. Клеточные процессоры в классификаторах многоканальных изображений / С. А. Филист, Р. А. Томакова, А. Н. Брежнева, И. А. Малютина, В. А. Алексеев // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 1. С. 45–52.

6. Горитов А. Н., Бодрухин А. А. Сравнение методов выделения особых точек объектов на изображениях рабочей сцены робота-манипулятора // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 3. С. 61–66.

7. Андриянов Н. А., Дементьев В. Е., Ташлинский А. Г. Обнаружение объектов на изображении: от критериев Байеса и Неймана – Пирсона к детекторам на базе

нейронных сетей EfficientDet // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 1. С. 139–159. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-922>

8. Метод каскадной сегментации рентгенограмм молочной железы / С. А. Филист, А. Р. Дабагов, Р. А. Томакова, И. А. Малютина, Д. С. Кондрашов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1. С. 49–61.

9. Зубов И. Г. Метод автоматического определения ключевых точек объекта на изображении // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 6–16. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-6-16>

10. Kumar A. SURF feature descriptor for image analysis // Imaging and Radiation Research. 2023. Vol. 6, is. 1. P. 5643. <https://doi.org/10.24294/irr.v6i1.5643>

11. David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. N 60 (2). P. 91–110.

12. Метод классификации сложноструктурируемых изображений на основе самоорганизующихся нейросетевых структур / С. А. Филист, Р. А. Томакова, О. В. Шаталова, А. А. Кузьмин, К. Д. А. Кассим // Радиопромышленность. 2016. № 4. С. 57–65.

13. Hui Kong, Hatice Cinar Akakin, Sanjay E. Sarma. A Generalized Laplacian of Gaussian Filter for Blob Detection and Its Applications // IEEE Transactions on Cybernetics. 2013. Vol. 43 (6). P. 1719–1733.

14. Многослойные морфологические операторы для сегментации сложноструктурируемых растровых полутоновых изображений / С. А. Филист, А. Р. Дабагов, Р. А. Томакова, И. А. Малютина, Д. С. Кондрашов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3. С. 44–63.

15. Lindeberg T., Garding J. Shape-adapted smoothing in estimation of 3-D shape cues from affine deformations of local 2-D brightness structure // Image Vis. Comput. 1997. Vol. 15, N 6. P. 415–434.

16. Денисов А. А., Новиков А. И. Анализ методов детектирования, описания и сопоставления ключевых точек изображений // Вестник РГРТУ. 2024. № 89. С. 104–116. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2024-89-104-116>

17. D2-Net: A Trainable CNN for Joint Description and Detection of Local Features / M. Dusmanu, I. Rocco, T. Pajdla, M. Pollefeys, J. Sivic, A. Torii, T. Sattler. URL: <https://arXiv:1905.03561v1> (дата обращения: 17.12.2024).

18. An unmanned aerial vehicle autonomous flight trajectory planning method and algorithm for the early detection of the ignition source during fire monitoring, International / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, R. A. Tomakova, A'kif Al-Fugara, O. M. Al-Habahbeh, O. Shatalova, N. A. Korenevskiy, I. N. Gorbachev, A. Shaqadan, M. Ilyash // Journal of Remote Sensing. 2024. N 45(12). P. 4178–4197. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2358451>

19. Краснобаев Е. А., Чистобаев Д. В., Малышев А. Л. Сравнение бинарных дескрипторов особых точек изображений в условиях искажений // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 3. С. 434–445. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-434-445>
20. Михайлов А. П., Чибуничев А. Г. Фотограмметрия / под общей редакцией А. Г. Чибуничева. М.: Издательство МИИГаик, 2016. 294 с.
21. Автоматизированная система для классификации снимков видеопотоков / С. А. Филист, М. В. Шевцов, В. А. Белозеров, Д. С. Кондрашов, И. Н. Горбачев, Н. А. Корсунский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 85–105.

## References

1. Lunev E.M. Convergence study of a new algorithm for determining navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on a photographic image. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2011;(45):46. (In Russ.)
2. Dyudin M.V., Zuev I.V., Filist S.A., Chudinov S.M. Automatic classifiers of complex structured images based on multimethod technologies of multicriteria selection. *Voprosy radioelektroniki = Issues of Radio Electronics*. 2015;(1):130–140. (In Russ.)
3. Filist S.M., Riad Taha Al-Kasasbeh, Tomakova R.A., Osama M. Al-Habahbeh, A'kif Al-Fugara, Shatalova O., Korenevsky N.A., Gorbachev I.N., Ashraf Shaqadan, Ilyash M. Automated system for classifying images of video streams for timely detection of fires. *International Journal of Remote Sensing*. 2024;45:8157–8180. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2398818>
4. Khan A., Gupta S., Gupta S.K. Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020;(47):101642.
5. Filist S.A., Tomakova R.A., Brezhneva A.N., Malyutina I.A., Alekseev V.A. Cellular processors in multichannel image classifiers. *Radiopromyshlennost' = Radio Industry*. 2019; 29(1):45–52. (In Russ.)
6. Goritov A.N., Bodrukhin A.A. Comparison of methods for selecting special points of objects in images of the working stage of a robot manipulator. *Doklady TUSUR = Reports of TUSUR*. 2019;22(3):61–66. (In Russ.)
7. Andrianov N.A., Dementiev V.E., Tashlinsky A.G. Detection of objects in the image: from criteria Bayes and Neiman – Pearson on detectors based on EfficientDet neural. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2022;46(1):139–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-922>
8. Filist S.A., Dabagov A.R., Tomakova R.A., Malyutina I.A., Kondrashov D.S. Cascade segmentation method of breast radiographs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie =*

*Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019;9(1):49–61. (In Russ.)

9. Zubov I.G. Method of automatic detection of key points of an object in an image. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2020; 23(6):6–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-6-16>

10. Kumar A. SURF feature descriptor for image analysis. *Imaging and Radiation Research*. 2023; 6:5643. (In Russ.) <https://doi.org/10.24294/irr.v6i1.5643>

11. David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004;(60):91–110.

12. Filist S.A., Tomakova R.A., Shatalova O.V., Kuzmin A.A., Kassim K.D.A. Method of classification of complex structured images based on self-organizing neural network structures. *Radiopromyshlennost' = Radio Industry*. 2016;(4):57–65. (In Russ.)

13. Hui Kong, Hatice Cinar Akakin, Sanjay E. Sarma. A Generalized Laplacian of Gaussian Filter for Blob Detection and Its Applications. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2013;43:1719–1733.

14. Filist S.A., Dabagov A.R., Tomakova R.A., Malyutina I.A., Kondrashov D.S. Multilayer morphological operators for segmentation of complexly structured raster halftone images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019; 9(3):44–63. (In Russ.)

15. Lindeberg T., Garding J. Shape-adapted smoothing in estimation of 3-D shape cues from affine deformations of local 2-D brightness structure. *Image Vis. Comput*. 1997;15(6):415–434.

16. Denisov A.A., Novikov A.I. Analysis of methods for detecting, describing and comparing key image points. *Vestnik RGRTU = Bulletin of the Russian State Technical University*. 2024;(89):104–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2024-89-104-116>

17. D2-Net: A Trainable CNN for Joint Description and Detection of Local Features / M. Dusmanu, I. Rocco, T. Pajdla, M. Pollefeys, J. Sivic, A. Torii, T. Sattler. URL: <https://arXiv:1905.03561v1> (accessed 17.12.2024).

18. Filist S., Al-Kasasbeh R.T., Tomakova R.A., A'kif Al-Fugara, Al-Habahbeh O.M., Shatalova O., Korenevsky N.A., Gorbachev I.N., Shaqadan A., Ilyash M. An unmanned aerial vehicle autonomous flight trajectory planning method and algorithm for the early detection of the ignition source during fire monitoring, International. *Journal of Remote Sensing*. 2024;(45):4178–4197. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2358451>

19. Krasnobaev E.A., Chistobaev D.V., Malyshev A.L. Comparison of binary descriptors of singular image points under distortion conditions. *Computer Optics*. 2019;43(3):434–445. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-434-445>

20. Mikhailov A.P., Chibunichev A.G. Photogrammetry. Moscow: Izdatel'stvo MII Gaik; 2016. 294 p. (In Russ.)

21. Filist S.A., Shevtsov M.V., Belozerov V.A., Kondrashov D.S., Gorbachev I.N., Korsunsky N.A. An automated system for classifying images of video streams. *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;11(4):85–105. (In Russ.)

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

**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**, Doctor of Sciences (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

**Коробков Сергей Васильевич**, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: s.v.korobkov@gmail.com, ORCID: 0009-0007-1910-9259

**Sergey V. Korobkov**, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: s.v.korobkov@gmail.com, ORCID: 0009-0007-1910-9259

### Формирование информативных характеристик импеданса биоматериала для алгоритмов программно-аппаратных комплексов

Н. А. Корсунский<sup>1</sup>, Р. А. Томакова<sup>1</sup> ✉, А. В. Брежнев<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова  
Стремянный пер., д. 36, г. Москва 115054, Российская Федерация

✉ e-mail: [rtomakova@mail.ru](mailto:rtomakova@mail.ru)

#### Резюме

**Цель исследования** заключается в оценке точности и надежности методов измерения импеданса биоматериала и выработке рекомендаций по совершенствованию алгоритмов для разработки программно-аппаратных комплексов в области биомедицинской диагностики. Значительное внимание уделено анализу данных, полученных *in Vivo*.

**Методы.** Проведено 400 измерений на группе из 20 добровольцев с использованием электрических тестовых воздействий для получения амплитудно-фазовых частотных характеристик импеданса биологических тканей. В ходе эксперимента применен метод Коула для определения коэффициентов, отражающих ключевые параметры испытуемой ткани и ее импедансные характеристики. Для генерации тестовых сигналов использовались последовательности одночастотных синусоидальных сигналов, управляемых программным обеспечением на платформе E20-10, специально разработанной для оцифровки данных и анализа переходных процессов в живых тканях.

**Результаты.** На базе системы сбора данных E20-10, произведенной ЗАО «L-Card», был разработан комплекс для получения и обработки данных импеданса, включая программное обеспечение, реализованное на языке Delphi, предназначенное для генерации и обработки тестовых сигналов. Полученные результаты *in Vivo* показали средние расхождения в пределах 4% между измеренными и ожидаемыми значениями, что подтверждает высокую точность и надежность предложенного подхода к измерению импеданса биологических тканей.

**Заключение.** Реализация ПО для измерения импеданса биоматериала с помощью разработанных алгоритмов и применяемых амплитудно-фазовых частотных характеристик обеспечивает более точную оценку диссипативных свойств биологических тканей. Анализ данных показал возможности и перспективы разработки высокоточных классификаторов для системы поддержки принятия решений ранней диагностики медицинских рисков. Эти классификаторы особенно могут быть полезны для выявления предрасположенности к легочным заболеваниям, таким как пневмония и туберкулез. Дальнейшие исследования в данной области могут привести к значительному прогрессу в создании эффективных программно-аппаратных комплексов для биомедицинской диагностики, способствующих улучшению профилактики и лечения различных патологий с учетом индивидуальных особенностей пациента.

**Ключевые слова:** медицинский риск; фантом; биоимпеданс; программно-аппаратный комплекс; импеданс; амплитудно-фазовая частотная характеристика.

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

**Для цитирования:** Корсунский Н. А., Томакова Р. А., Брежнев А. В. Формирование информативных характеристик импеданса биоматериала для алгоритмов программно-аппаратных комплексов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 117–130. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-117-130>

Поступила в редакцию 21.01.2025

Подписана в печать 18.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## Formation of informative characteristics of biomaterial impedance for algorithms of software and hardware complexes

Nikita A. Korsunsky<sup>1</sup>, Rimma A. Tomakova<sup>1</sup> ✉, Alexey V. Brezhnev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies  
19 Revolution Ave., Voronezh 394036, Russian Federation

<sup>2</sup> Plekhanov Russian University of Economics  
36 Stremyanny side-street, Moscow 115054, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

### Abstract

**The purpose of the research** is to evaluate the accuracy and reliability of methods for measuring the impedance of a biological material and to develop recommendations for improving algorithms for the development of software and hardware complexes in the field of biomedical diagnostics. Considerable attention is paid to the analysis of data obtained in Vivo.

**Methods.** 400 measurements were performed on a group of 20 volunteers using electrical thermal effects to obtain amplitude-phase frequency characteristics of the impedance of biological tissues. During the experiment, the Cole method was used to determine coefficients reflecting the key parameters of the test tissue and its impedance characteristics. To generate the test signals, sequences of single-frequency sinusoidal signals were used, controlled by software on the E20-10 platform, specially designed for digitizing data and analyzing transients in living tissues.

**Results.** Based on the E20-10 data acquisition system manufactured by L-Card CJSC, a complex for receiving and processing impedance data was developed, including software implemented in the Delphi language designed to generate and process test signals. The in Vivo results showed average discrepancies within 4% between the measured and expected values, which confirms the high accuracy and reliability of the proposed approach to measuring the resonance of biological tissues.

**Conclusion.** The implementation of software for measuring biomaterial impedance using the developed algorithms and applied amplitude-phase frequency characteristics provides a more accurate assessment of the dissipative properties of biological tissues. Data analysis has shown the possibilities and prospects of developing high-precision classifiers for a decision support system for early diagnosis of medical risks. These classifiers can be especially useful for identifying predisposition to lung diseases such as pneumonia and tuberculosis. Further research in this field can lead to significant progress in the creation of effective software and hardware complexes for biomedical diagnostics, contributing to the improvement of the prevention and treatment of various pathologies, taking into account the individual characteristics of the patient.

**Keywords:** *medical risk; phantom; bioimpedance; hardware and software complex; impedance; amplitude-phase frequency response.*

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

**For citation:** Kalach A.V., Smolentseva T.E., Akatyev Y.A. Model of an information system for data support of smart home assistants. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(1):117–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-117-130>

Received 21.01.2025

Accepted 18.02.2025

Published 31.03.2025

## Введение

Современная медицинская наука активно ищет новые методы оценки функции внешнего дыхания с целью улучшения диагностики и мониторинга состояния пациентов [1]. Электрический импеданс привлекает внимание исследователей благодаря своим многочисленным преимуществам, включая неинвазивность, высокую чувствительность и возможность быстрого получения данных [2]. Этот метод предоставляет уникальную возможность для изучения базисных физиологических процессов, что особенно важно для выявления ранних признаков патологии, которые могут скрываться при нормальных клинических индикаторах [3].

С увеличением сложности и объема медицинской информации становится актуальным внедрение систем поддержки принятия решений в медицинскую практику [4]. Интеграция биоимпедансных технологий с такими системами может значительно улучшить качество медицинской помощи [5]. Благодаря биоимпедансометрии возможно не только проведение эффективной оценки общего состояния организма, но и изучение состава тканей в различных

областях тела, включая труднодоступные для исследования зоны. Это делает методику незаменимой для ранней диагностики и мониторинга эффективности терапевтического вмешательства [6].

Несмотря на все преимущества, процесс измерения биоэлектрического импеданса остается сложным [7]. Ряд исследований показывает, что высокая точность измерений требует учета морфологической однородности тканей и корректной интерпретации данных на широком диапазоне частот [8]. Современные технологические решения стремятся сократить время измерений и повысить точность результатов, что критично для их успешного внедрения в клиническую практику [9].

Разработка специализированного оборудования, например комплекса на базе устройства E20-10 компании «L-Card», позволяет преодолевать существующие ограничения и предоставляет более точные и надежные данные для анализа [10]. Внедрение таких инновационных технологий открывает новые перспективы для диагностики и лечения социально значимых заболеваний, что делает актуальным дальнейшее изучение и совершенствование методов биоимпедансных исследований в медицине [11].

Цель настоящего исследования заключалась в разработке и апробации методики использования электрического импеданса для неинвазивной оценки вентиляционно-перфузионного соотношения в легких. Планируется определить оптимальные частотные диапазоны для максимальной информативности импедансных измерений, а также оценить потенциал интеграции полученных данных в системы поддержки принятия решений для улучшения диагностики и мониторинга легочных заболеваний.

Для обеспечения своевременной диагностики медицинских рисков важно внедрение систем поддержки принятия решений (СППР) в медицинские информационные системы [12]. Это позволит улучшить процесс принятия решений в медицине и повысить эффективность диагностики [13]. Методика биоимпедансных исследований является одним из инструментов, который может быть использован для достижения этих целей. Применение методов биоимпедансометрии позволяет не только оценить общие показатели организма, но и изучить параметры состава тканей различных частей тела [14], таких как конечности, туловище, молочные железы и местные ткани, включая те, которые находятся близко к коже и слизистым оболочкам.

### Материалы и методы

Следует отметить, что биоимпедансная диагностика становится все более востребованной в медицине благодаря своей неинвазивности и возможности

получения детальной информации о состоянии тканей пациента [15]. Этот метод позволяет выявлять даже незначительные изменения в составе тканей, что особенно важно при раннем выявлении заболеваний. Кроме того, биоимпедансные исследования могут быть полезны не только для диагностики, но и для мониторинга эффективности лечения и коррекции пациентов с различными патологиями [16]. Внедрение СППР в медицинские информационные системы с использованием данных биоимпедансных исследований позволит значительно улучшить качество медицинской помощи и оптимизировать процессы принятия решений в здравоохранении [17].

Процесс измерения проводимости осуществляется путем анализа слабых зондирующих токов. Одним из наиболее эффективных методов измерения является биоимпедансная спектроскопия, которая основана на построении графика Коула. Этот метод позволяет анализировать амплитуду, фазу и частоту (АФЧХ) импеданса биоматериала, включенного в цепь источника зондирующего тока. При проведении биоимпедансных исследований необходимо обеспечивать морфологическую однородность и целостность биоматериала [18]. Это может быть сложной задачей, так как процесс измерения требует учета широкого диапазона частот зондирующего тока и маленького шага для полного охвата этого диапазона и учета диссипативных свойств импеданса биоматериала [19]. В результате процесс измерения может

занимать значительное время, что может представлять проблему при выполнении перечисленных требований. Однако современные технологии исследований в области биоимпедансной спектроскопии направлены на сокращение времени проведения измерений и повышение точности результатов [20].

Для проведения биоимпедансных исследований был создан специальный комплекс, который включает в себя как аппаратную, так и программную части. Этот комплекс использует технологию биоимпеданса для измерения электрической проводимости тканей организма. Он состоит из нескольких ключевых компонентов, включая ЦАП (цифроаналоговый преобразователь) для формирования импульсов, АЦП (аналого-цифровой преобразователь) для интерпретации результатов и вычислительную систему с программным обеспечением для визуализации полученных значений. Для выполнения данных функций было решено использовать устройство E20-10, произведенное компанией ЗАО «L-Card». Оно обладает способностью не только формировать импульсы, но и интерпретировать результаты, что делает его идеальным выбором для нашего комплекса.

Однако модуль E20-10 имеет ограничения по величине входящего и исходящего сигнала, поэтому было необходимо разработать устройства, предназначенные для усиления этих сигналов. С этой целью было разработано специальное устройство, которое увеличивает

выходной сигнал в три раза. Входной сигнал с биообъекта проходит через инструментальный усилитель, где он преобразуется до 3 В и затем поступает на модуль АЦП модуля L-Card. Это позволяет получить более точные и надежные данные для дальнейшего анализа.

В нашем исследовании мы разработали приложение для визуализации полученных значений с использованием программного обеспечения RAD Studio XE8 и библиотек L-Card (Lisbari и LCome). Это приложение позволяет нам работать с АЦП и ЦАП, а также визуализировать информационные данные и масштабировать их. Была выбрана среда RAD Studio XE8, так как она предоставляет готовые приложения для работы с АЦП, ЦАП и визуализации данных. Это упрощает работу и позволяет сосредоточиться на разработке основного функционала нашего приложения.

Интерфейс ПО (программного обеспечения) позволяет пользователям управлять настройками и параметрами приложения, а также отображать полученные данные в удобном виде. Разработанное приложение обладает широкими возможностями визуализации данных, включая масштабирование. Это позволяет пользователям более детально изучать полученные значения и анализировать их. Таким образом, разработанное приложение представляет собой мощный инструмент для работы с данными, полученными с помощью АЦП и ЦАП.

Для расчета реальной и мнимой составляющих биоимпеданса осуществля-

лось проецирование вектора комплексного биоимпеданса на соответствующие оси. Метод вычисления предусматривает определение реальной и мнимой составляющих напряжения на токовом резисторе, и на их основе выполняется расчет разности фаз. Токовый резистор  $R$  подбирается так, чтобы на нем возникало как можно меньше напряжения. Ток в образцовом резисторе  $R$  равен току в биообъекте. Для вычисления реальной и мнимой составляющих биоимпеданса необходимо определить угол  $\phi$  или проекцию вектора на вектор.

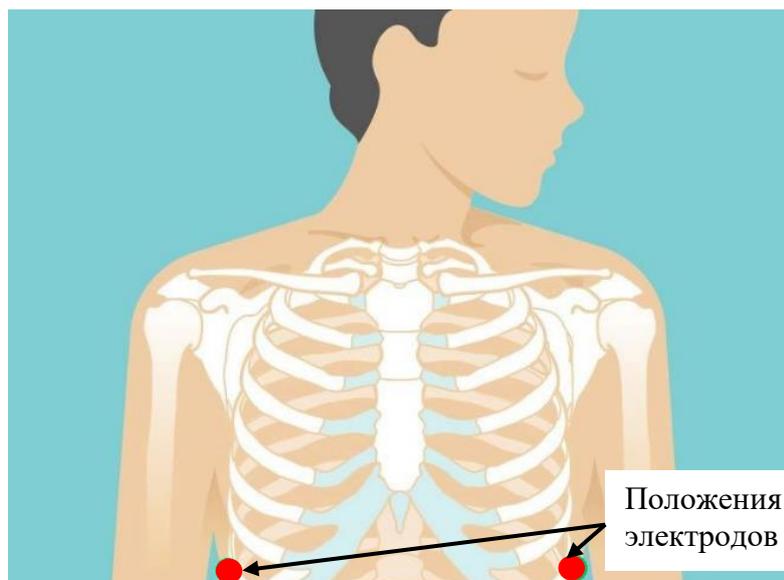
Для оценки метрологических характеристик ПАКАБИ был разработан специальный фантом. Этот фантом представляет собой пассивный RC-двухполюсник, который моделирует биоимпеданс. Кроме того, была создана аналогичная схема в среде Matlab Simulink для сравнения результатов. Это исследование позволило оценить точность и надежность ПАКАБИ в измерении биоимпеданса. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений позволило выявить возможные расхождения и уточнить параметры ПАКАБИ для достижения более точных результатов.

Дополнительно были проведены измерения на реальных биообъектах, чтобы протестировать работу ПАК в реальных условиях. Для доказательства эффективности и точности разрабатываемой системы в реальных условиях были

проведены дополнительные измерения с использованием биоимпедансной аппаратуры на реальных биообъектах. В экспериментах особое внимание уделялось подбору испытуемых, чтобы результаты были репрезентативными и надежными. Для проведения исследования была сформирована группа, состоящая из 30 человек: 15 мужчин и 15 женщин в возрастном диапазоне от 18 до 40 лет. Каждый участник исследования прошел предварительное медицинское обследование, чтобы подтвердить их общее хорошее состояние здоровья. Особое внимание уделялось отсутствию заболеваний, влияющих на дыхательную систему, таких как астма или хронические обструктивные болезни легких, поскольку размещение электродов планировалось на грудной клетке. Эти предварительные проверки были необходимы для исключения влияния факторов, которые могли бы исказить результаты эксперимента.

Проведенные исследования позволили охватить широкий возрастной контингент и учесть возможные различия в биоимпедансных характеристиках, обусловленные возрастными изменениями организма.

Электроды для биоимпедансного исследования были аккуратно размещены на определенных участках грудной клетки каждого испытуемого (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема размещения электродов на участках грудной клетки участников эксперимента

**Fig. 1.** Diagram of the placement of electrodes on the chest areas of the participants in the experiment

Процедура установки и последующих измерений была стандартизирована для всех участников, чтобы обеспечить сопоставимость и точность получаемых данных. В результате было собрано значительное количество информации, позволяющей оценить работу программно-

аппаратного комплекса (ПАК) в условиях, приближенных к реальной клинической практике.

Сводные результаты экспериментов приведены в таблице 1 для реальной составляющей импеданса, а в таблице 2 – для мнимой.

**Таблица 1.** Сводные результаты эксперимента реальной составляющей биоимпеданса

**Table 1.** Summary results of the experiment of the real component of bioimpedance

Частота сигнала	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Доверительный интервал
1	500,806203	0,289166398	0,035609228
2	501,3672796	0,426155126	0,052478625
3	501,9156316	0,518300693	0,063825837
4	502,6231437	0,846459856	0,104236805
5	502,440884	0,646829613	0,079653456
6	504,1782117	0,688572946	0,084793914
7	504,3454083	1,081684502	0,133203407
8	504,5492398	0,898666879	0,110665809
9	504,2082441	0,807467475	0,099435111
10	504,2683858	0,815245612	0,100392946

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Частота сигнала	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Доверительный интервал
11	504,6326966	0,904293743	0,111358726
12	505,0229638	0,920153638	0,113311783
13	505,3668281	0,955746355	0,117694828
14	505,6646951	0,935864883	0,115246535
15	506,3917394	1,048538047	0,129121606
16	506,612805	1,071738829	0,131978653
17	507,1352746	1,085598338	0,133685374
18	507,5784901	1,03263283	0,127162968
19	507,8899478	1,077533517	0,132692237
20	508,2396133	1,075276314	0,132414275

**Таблица 2.** Сводные результаты эксперимента мнимой составляющей биоимпеданса**Table 2.** Summary results of the experiment of the imaginary component of bioimpedance

Частота сигнала ЦАП	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Доверительный интервал
1	500,806203	0,289166398	0,035609228
2	501,3672796	0,426155126	0,052478625
3	501,9156316	0,518300693	0,063825837
4	502,6231437	0,846459856	0,104236805
5	502,440884	0,646829613	0,079653456
6	504,1782117	0,688572946	0,084793914
7	504,3454083	1,081684502	0,133203407
8	504,5492398	0,898666879	0,110665809
9	504,2082441	0,807467475	0,099435111
10	504,2683858	0,815245612	0,100392946
11	504,6326966	0,904293743	0,111358726
12	505,0229638	0,920153638	0,113311783
13	505,3668281	0,955746355	0,117694828
14	505,6646951	0,935864883	0,115246535
15	506,3917394	1,048538047	0,129121606
16	506,612805	1,071738829	0,131978653
17	507,1352746	1,085598338	0,133685374
18	507,5784901	1,03263283	0,127162968
19	507,8899478	1,077533517	0,132692237
20	508,2396133	1,075276314	0,132414275

## Результаты и их обсуждение

1. Тенденция увеличения математического ожидания: от первой до двадцатой измеренной частоты сигнала мы наблюдаем стабильное увеличение математического ожидания. Оно возрастает с 500,81 до 508,24 для частотных значений. Это может говорить о пропорциональном увеличении реальной / мнимой составляющей биоимпеданса с увеличением частоты сигнала, что может отражать изменение свойств испытуемого объекта с изменением частоты.

2. Рост среднеквадратического отклонения: среднеквадратическое отклонение показывает, насколько результаты измерений разнятся от математического ожидания. На протяжении эксперимента наблюдается увеличение этого отклонения с 0,29 до 1,08. Это может свидетельствовать о возрастании вариабельности в измерениях при росте частоты.

3. Увеличение доверительного интервала: доверительный интервал также возрастает от 0,036 до 0,133 с увеличением частоты. Более широкий интервал на более высоких частотах может указывать на большее колебание точности измерений, что следует учитывать при интерпретации данных.

4. Анализ специфических точек: на определенных частотах, таких как 7 Гц и 16 Гц, наблюдаются скачки в математическом ожидании. Это может являться результатом присутствия специфических резонансных характеристик или устойчивых изменений в поведении

материала или компонента, через который измеряется биоимпеданс.

5. Полнота данных: данные из обеих составляющих (реальной и мнимой) биоимпеданса крайне схожи, что может свидетельствовать о хорошей калибровке и точности измерительных инструментов, однако также это может указывать на возможное недопонимание различий между ними, которые стоит учесть при последующих исследованиях.

## Выводы

В ходе эксперимента, в рамках которого производилось 20 измерений на фантоме, представляющем реальную и проектную модели, были получены замечательные результаты, демонстрирующие потенциал и точность применяемых методов:

1. Высокая точность и стабильность данных: получена средняя ошибка менее 4% для проектных данных, которая свидетельствует о высокой точности и надежности проведенных измерений и о том, что применяемый ПАК весьма перспективен при проведении точных биоимпедансных исследований.

2. Прогрессивный потенциал в интеграции: повышение математического ожидания и стабильный рост параметров на протяжении всего спектра частот указывают на то, что предлагаемый подход не только эффективен для применяемых моделей, но и может быть применен для интеграции в более сложные интеллектуальные системы диагностики и мониторинга.

3. Область применения и оптимизация: возможность оптимизации параметров измерений для снижения влияния на кожу пользователя определяет перспективы более широкого внедрения данной технологии, включая долгосрочные медицинские исследования и мониторинг состояния здоровья. При этом отмечается важность установления периодических пауз во время проведения измерений для обеспечения оптимальной точности без искажения данных.

4. Расширение сферы применения: дальнейшее усовершенствование мето-

дов и разработка новых подходов к измерению биоимпеданса предоставляет новые возможности для реализации технологии, включая инновационные решения в медицине и смежных областях науки.

Таким образом, результаты настоящего эксперимента подтверждают перспективность использования данной методики в биоимпедансных исследованиях, что, в свою очередь, открывает возможности для разработки и совершенствования различных полезных технологий.

### Список литературы

1. Анализ нормы ст. 41 УК РФ об обоснованном риске с точки зрения теоретической обоснованности. URL: [http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy\\_risk\\_obosnovannogo\\_riska](http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_riska) (дата обращения: 11.12.2024).

2. Ростовцев В. Н. Классификация медицинских рисков. URL: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (дата обращения: 11.12.2024).

3. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 356 с.

4. Гибридные нечеткие модели для прогнозирования возникновения и осложнений артериальной гипертензии с учетом энергетических характеристик биоактивных точек / М. А. Ефремов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, Е. А. Старцев, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 104–119.

5. Katherine J. Wu There are more viruses than stars in the universe. URL: <https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus> (дата обращения: 12.12.2024).

6. Shatalova O. V., Burmaka A. A., Korovin E. N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic // International Russian Automation Conference. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501668>

7. Вясничев Я. А., Пилюсян Э. А. Нейронные сети в медицине // Актуальные задачи математического моделирования информационных технологий. 2018. Т. 1, № 1. С. 30–39.

8. Зонова Я. А., Пилюсян А. С. Применение искусственных нейронных сетей в медицине // Лучшая студенческая статья. 2018. Т. 1, № 1. С. 59–61.

9. Bai Z., Gong Y., Tian X. The Rapid Assessment and Early Warning Models for COVID-19 // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 21, N 4. P. 272–279. <https://doi.org/10.26577/ijbch-2018-1-313>

10. Корсунский Н. А., Томакова Р. А., Брежнев А. В. Программное обеспечение, предназначенное для оцифровки переходной характеристики, при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. № 1. С. 50–67.

11. Программно-аппаратный комплекс для формирования дескрипторов в системе поддержки принятия решений по диагностике медицинских рисков / Н. А. Корсунский, А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, А. В. Серебровский // Лазеры. Измерения. Информация. 2021. № 1. С. 43–54.

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

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

14. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин [и др.] // Приборы, системы и изделия медицинского назначения. 2020. № 3 (33). С. 78–84.

15. Sarvamangala D. R., Raghavendra V. K. Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey // Evolutionary Intelligence. 2022. Vol. 15(1). P. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00540-3>

16. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин [и др.] // Приборы, системы и изделия медицинского назначения. 2020. № 3 (33). С. 78–84.

17. Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Киселев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, С. А. Филист, Н. С. Стадниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия:

Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 114–133.

18. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey / I. A. Oludare, A. Jantan, V. D. Kemi, H. Asrshad // *Heliyon*. 2018. Vol. 4, N 11. P. 160–204. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

19. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases // *Medical Decision Making*. 2020. Vol. 6, N 3. P. 415–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5>

20. Begoli E., Bhattacharya T., Kusnezov D. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making // *Nature Machine Intelligence*. 2019. N 1. P. 20–23. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0004-1>

### References

1. Analysis of the norm of Article 41 of the Criminal Code of the Russian Federation on reasonable risk from the point of view of theoretical validity. Available at: [http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy\\_risk\\_obosnovannogo\\_risk](http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_risk) (accessed 12.11.2024).

2. Rostovtsev V.N. Classification of medical risks. Available at: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (accessed 12.11.2024).

3. Shatalova O.V. Intelligent monitoring systems for medical risks based on bioimpedance research. Kursk: *Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet*; 2020. 356 p. (In Russ.)

4. Efremov M.A., Filist C.A., Shatalova O.V., Startsev E.A., Shulga L.V. Hybrid fuzzy models for predicting the occurrence and complications of arterial hypertension, taking into account the energy characteristics of bioactive points. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(4):104–119. (In Russ.)

5. Katherine J. Wu There are more viruses than stars in the universe. Available at: <https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus> (accessed 12.12.2024).

6. Shatalova O.V., Burmaka A.A., Korovin E.N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic. In: *International Russian Automation Conference*. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501668>

7. Vyasnichev Y.A., Pilosyan E.A. Neural networks in medicine. *Aktual'nye zadachi matematicheskogo modelirovaniya informatsionnykh tekhnologii = Actual Problems of Mathematical Modeling of Information Technologies*. 2018;1(1):30–39. (In Russ.)

8. Zonova Y.A., Pilosyan A.S. Application of artificial neural networks in medicine. *Luchshaya studentcheskaya stat'ya = The Best Student Article*. 2018;1(1):59–61. (In Russ.)

9. Bai Z., Gong Y., Tian X. The Rapid Assessment and Early Warning Models for COVID-19. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;21(4):272–279. <https://doi.org/10.26577/ijbch-2018-1-313>

10. Korsunsky N.A., Tomakova R.A., Brezhnev A.V. Software designed to digitize a transient characteristic during bioimpedance research at a biological facility. *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;(1):50–67. (In Russ.)

11. Korsunsky N.A., Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Serebrovsky A.V. A software and hardware complex for the formation of descriptors in the decision support system for the diagnosis of medical risks. *Lazery. Izmereniya. Informatsiya = Lasers. Measurements. Information*. 2021;(1):43–54.

12. Miroshnikov A.V., Shatalova O. V., Stadnichenko N.S. Classification of biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(3/4):29–49. (In Russ.)

13. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Efremov M.A., Novoselov A.Y., Pavlenko A.V. An algorithm for optimizing the Voit model in classifiers of the functional state of living systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(2):59–75. (In Russ.)

14. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V., et al. Metrological aspects of an automated method for measuring bioimpedance. *Pribory, sistemy i izdeliya meditsinskogo naznacheniya = Devices, Systems and Medical Devices*. 2020;3:78–84. (In Russ.)

15. Sarvamangala D.R., Raghavendra V.K. Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey. *Evolutionary Intelligence*. 2022;15:1–22. <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00540-3>

16. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V., et al. Metrological aspects of an automated method for measuring bioimpedance. *Pribory, sistemy i izdeliya meditsinskogo naznacheniya = Devices, Systems and Medical Devices*. 2020;(3):78–84. (In Russ.)

17. Kiselev A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Filist S.A., Stadnichenko N.S. Models of latent predictors in intelligent systems for predicting the state of living systems. *Izvestiya*

*Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020;10(1):114–133. (In Russ.)

18. Oludare I.A., Jantan A., Kemi V.D., Asrshad H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon.* 2018;4(11):160–204. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

19. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases. *Medical Decision Makin.* 2020;6(3):415–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5>

20. Begoli E., Bhattacharya T., Kusnezov D. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making. *Nature Machine Intelligence.* 2019;(1):20–23. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0004-1>

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Корсунский Никита Александрович**, аспирант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: cor.nick2013@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-4606-5517

**Nikita A. Korsunsky**, Post-Graduate Student of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: cor.nick2013@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-4606-5517

**Томакова Римма Александровна**, доктор технических наук, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-0152-4714, Author ID: 739221

**Rimma A. Tomakova**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-0152-4714, Author ID: 739221

**Брежнев Алексей Викторович**, кандидат технических наук, доцент, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: brezhnev.av@rea.ru, ORCID: 0000-0002-3679-7379

**Alexey V. Brezhnev**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation, e-mail: brezhnev.av@rea.ru, ORCID: 0000-0002-3679-7379

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-131-143>



УДК 534.8+57.087.1

## Исследование нелинейного взаимодействия акустической волны с биотканями для целей акустической эластографии

М. В. Лагута<sup>1</sup>, Д. А. Кравчук<sup>1</sup>, Н. Н. Чернов<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Южный федеральный университет

ул. Шевченко, д. 2, Ростовская область, г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

### Резюме

**Цель исследования** – исследование параметров нелинейного взаимодействия низкочастотного акустического излучения с биотканями для повышения точности определения структурных изменений органов и тканей методом эластографии.

**Методы.** Повышение точности определения степени и характера структурных изменений органов и тканей человека является актуальной задачей на сегодняшний день. Использование нелинейных эффектов взаимодействия мощного низкочастотного акустического излучения с биотканями позволит получить новые информационные характеристики, а также повысить точность дифференциации различных степеней структурных изменений тканей и органов на начальных стадиях заболеваний. В рамках данной работы рассмотрена зависимость между вязкоупругими и нелинейными характеристиками биосред и процессами распространения в них упругих поперечных волн. Также рассмотрены физические основы процессов образования и распространения гармонических составляющих поперечной акустической волны, а также изменение ее соотношения  $N$  с волной основной частоты.

**Результаты.** Получены результаты математического моделирования процессов изменения соотношения между амплитудой волны основной частоты и третьей гармоники, образовавшейся в среде за счет нелинейности взаимодействия акустического излучения с биотканями. Результатами стали графики зависимости изменения  $N$  с расстоянием для тканей печени при различных стадиях фиброза и жирового гепатоза.

**Заключение.** Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что использование нелинейных эффектов взаимодействия низкочастотного акустического излучения с биотканями позволит повысить качество диагностики структурных изменений органов и тканей на ранних стадиях заболеваний, когда стандартные линейные методы являются менее информативными.

**Ключевые слова:** эластография; акустический нелинейный параметр; свойства биоткани.

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

**Для цитирования:** Лагута М. В., Кравчук Д. А., Чернов Н. Н. Исследование нелинейного взаимодействия акустической волны с биотканями для целей акустической эластографии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 131–143. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-131-143>

Поступила в редакцию 14.01.2025

Подписана в печать 10.02.2025

Опубликована 31.03.2025

© Лагута М. В., Кравчук Д. А., Чернов Н. Н., 2025

## Research of the nonlinear interaction of an acoustic wave with biological tissues for the purposes of acoustic elastography

Margarita V. Laguta<sup>1</sup>, Denis A. Kravchuk<sup>1</sup>, Nikolay N. Chernov<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Southern Federal University

2 Schevchenko Str., Rostov region, Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

### Abstract

**The purpose of the research** is investigation of the parameters of nonlinear interaction of low-frequency acoustic radiation with biological tissues to improve the accuracy of determining structural changes in organs and tissues by elastography.

**Methods.** Improving the accuracy of determining the degree and nature of structural changes in human organs and tissues is an urgent task today. The use of nonlinear effects of the interaction of powerful low-frequency acoustic radiation with biological tissues will allow obtaining new information characteristics, as well as improving the accuracy of differentiation of various degrees of structural changes in tissues and organs at the initial stages of diseases. In the framework of this work, the relationship between the viscoelastic and nonlinear characteristics of biological media and the processes of propagation of elastic transverse waves in them is considered. The physical foundations of the processes of formation and propagation of harmonic components of a transverse acoustic wave, as well as the change in its ratio  $N$  to the fundamental frequency wave, are also considered.

**Results.** The results of mathematical modeling of the processes of changing the correlation between the amplitude of the fundamental frequency wave and the third harmonic formed in the medium due to the nonlinearity of the interaction of acoustic radiation with biological tissues are obtained. The results were the graphs of the dependence of the change in  $N$  with distance for liver tissues at various stages of fibrosis and fatty hepatosis.

**Conclusion.** The obtained dependences allow us to conclude that the use of nonlinear effects of the interaction of low-frequency acoustic radiation with biological tissues will improve the quality of diagnostics of structural changes in organs and tissues in the early stages of diseases, when standard linear methods are less informative.

**Keywords:** elastography; acoustic nonlinear parameter; properties of biological tissue.

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

**For citation:** Laguta M.V., Kravchuk D.A., Chernov N.N. Research of the nonlinear interaction of an acoustic wave with biological tissues for the purposes of acoustic elastography. *Serija: Upravljenje, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(1):131–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-131-143>

Received 14.01.2025

Accepted 10.02.2025

Published 31.03.2025

\*\*\*

### Введение

Многие заболевания, протекающие в организме человека, приводят к изменениям структуры органов, такие как

замещение функциональных клеток на жировую или соединительную ткань. К органам, наиболее подверженным замещению клеток, можно отнести печень,

молочную железу. Эти изменения являются как следствием нарушения функционирования систем организма, так и могут быть их причиной. Кроме того, со временем структурные изменения могут приобретать злокачественный характер [1]. Так рак молочной железы входит в тройку самых распространенных типов рака, а гепатоцеллюлярный рак печени (ГЦР) [2] является пятой по частоте встречаемости злокачественной опухолью в мире [3]. Исходя из этого ранняя диагностика структурных изменений тканей является актуальной проблемой на сегодняшний день.

С точки зрения диагностики процессы замещения функциональных клеток органа приводят к изменению их параметров взаимодействия с излучениями различной природы (рентген, ультразвук и т. д.) [4].

Эластография представляет собой группу методов исследования внутренних структур живого организма, основанную на анализе изменения пассивных механических свойств биотканей, которые также называют упругими свойствами [5]. Обычно для оценки используется анализ взаимодействия биотканей с низкочастотным акустическим излучением до 500 Гц. В зависимости от способа регистрации изменения параметров этого взаимодействия выделяют: ЯМР-эластографию [6]; соноэластографию и акустическую эластометрию [7]. Наиболее перспективными с точки зрения возможности оценки динамики заболеваний являются акустические

методы [8], их далее в статье будем называть эластографией. Однако точность определения изменения характеристик биотканей с их помощью достаточно низкая, особенно на ранних стадиях [9].

## Материалы и методы

С точки зрения классической теории упругости механические свойства упругих твердых тел описываются законом Гука, согласно которому напряжение прямо пропорционально деформации и не зависит от ее скорости. Однако для реальных тел характерно изменение напряжения, также зависящее и от скорости деформации. Эта зависимость рассматривается в разделе гидродинамики вязких жидкостей и подчиняется закону Ньютона [9]. В результате возникает необходимость рассмотрения так называемых вязкоупругих свойств материалов и тканей. При этом отношение напряжения к деформации при периодической нагрузке выражается комплексной величиной, действительная часть которой характеризует упругость, а мнимая – вязкие потери [10].

Существующие методы эластографии основаны на оценке упругих свойств органов и тканей человека на основе анализа процесса распространения поперечной компоненты акустического сигнала [11]. Это связано с тем, что скорость поперечной волны значительно меньше, чем скорость продольной, а значит, ее относительные изменения будут удобнее для дифференциации. На

основе относительного изменения скорости поперечных колебаний делают выводы о упругих характеристиках биотканей, таких как модуль Юнга [12].

Для описания процессов распространения поперечных волн в твердых телах с целью изучения проявления нелинейности этого взаимодействия необходимо начать с описания их свойств с точки зрения теории упругости. Процесс деформации рассматривается с точки зрения изменения расстояния между двумя ближайшими точками среды и возникновения при этом упругих напряжений на макроуровне. Этот процесс удобно рассматривать с точки зрения пятikonстантной теории нелинейной упругости, согласно которой компоненты тензора деформаций выражаются через следующую формулу [12]:

$$U_{ik} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right] = \eta_s, \quad (1)$$

где  $U_i$  – компонента вектора смещения данной точки среды после деформации;  $k$  и  $l$  – продольное и поперечное смещение,  $s = 1, 2 \dots 6$ .

При этом тензор деформации симметричен  $U_{ik}$  и  $U_{ki}$ . В результате получаются шесть независимых компонент, которые попарно инвариантны и образуют три пары:  $I_1, I_2, I_3$ . Суммирование производится по дважды входящим индексам. После преобразования выражение (1) приобретает следующий вид [12]:

$$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = u_{11} + u_{22} + u_{33} = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2)$$

При этом  $I_1$  отражает изменение плотности:

$$\frac{\rho_0 - \rho}{\rho} = I_1, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – равновесное значение плотности;  $\rho$  – изменение плотности.

В теории упругости, где распространение акустических волн подчиняется законам Гука, нелинейность этого процесса имеет две причины возникновения:

– геометрическая, которая обусловлена зависимостью компонент тензора деформации от производной смещения по координатам;

– физическая, которая обусловлена нелинейностью упругости биологических тканей [12].

Исходя из этого можно ввести понятия микроскопической и макроскопической нелинейностей. В основе понятия микроскопической нелинейности лежит теория атома вещества, который колеблется относительно своего положения равновесия с тремя степенями свободы. При этом сила, возникающая при смещении атома относительно положения равновесия, будет линейно зависеть от величины смещения. Однако при увеличении смещения изменение силы перестает быть линейно пропорциональным за счет проявления микроскопической нелинейности. При рассмотрении макроскопической нелинейности основную сложность представляет необходимость рассмотрения смещения множества частиц в областях сжатия и разряжения и изменения вследствие этого потенциальной энергии [12].

В качестве физико-математической модели биологических тканей была выбрана вязкоупругая модель Фойгта [13]. Выбор данной модели определяется возможностью учета одновременно упругих и вязких свойств реальных биотканей, а также для данной модели представляется возможным учет их физической нелинейности [13]. Использование низкочастотных акустических сигналов (до 500 Гц) позволит перейти к анализу поперечной компоненты, так как на таких частотах она будет преобладать над продольной [14]. Тем не менее для возникновения нелинейных эффектов и возможности их регистрации необходимо достаточно высокоамплитудное излучение с амплитудой поперечного смещения от 60 до 150 мкм.

Связь между нелинейными свойствами и упругими свойствами среды выражается через отношение [15]:

$$\Gamma = \frac{\beta}{2\mu}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент упругости среды;  $\beta$  – коэффициент нелинейности среды.

Учет соотношения (3) позволяет дополнить уравнение, описывающее зависимость между напряжением и деформацией, с учетом нелинейности последней. Тогда уравнения для описания модели Фойгта примет следующий вид [15]:

$$\sigma = \mu(\varepsilon - \Gamma\varepsilon^2) + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $\varepsilon$  – деформация,  $\eta$  – коэффициент вязкости.

Таким образом, уравнение движения, описывающее процесс распространения

акустической волны в среде с учетом поперечной деформации, примет следующий вид [16]:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi(z,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma(z,t)}{\partial z}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $z$  – координата в направлении распространения волны;  $\xi(z,t)$  – поперечное смещение, которое связано с деформацией выражением [16]

$$\varepsilon(z,t) = \frac{\partial \xi(z,t)}{\partial z}. \quad (7)$$

Скорость поперечной волны:

$$u(z,t) = \frac{\partial \xi(z,t)}{\partial t}. \quad (8)$$

С учетом (7), уравнение движения принимает вид [17]

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\beta}{2\mu V_0^2} u \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\eta}{2\mu V_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}, \quad (9)$$

где  $\tau \equiv t - \frac{z}{V_0}$  – время в движущейся си-

стеме координат;  $V_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$  – скорость невозмущенной волны [17]:

На основе эволюционного уравнения Бюргера мы можем оценить расстояние разрыва при распространении поперечной волны в данной среде при определенных амплитудно-частотных параметрах излучения согласно выражению [18]

$$z_p = \frac{V_0^2}{\Gamma \omega_0 u_0} = \frac{\mu}{\Gamma \rho (2\pi f_0)^2 A_0}, \quad (10)$$

где  $f_0$  и  $A_0$  – частота и амплитуда начального возмущения.

В результате выражение для смещения принимает следующий вид:

$$\xi(z=0, \tau) = A_0 \sin(2\pi f_0 \tau). \quad (11)$$

Анализ спектральных составляющих проводится на основе уравнения Бюргерса в безразмерной форме. Для этого необходимо перейти к безразмерным переменным  $Z$  и  $U$  следующим образом [18]:

$$\begin{aligned} U &\equiv \frac{u}{u_0}, \\ Z &\equiv \frac{z}{z_0}, \\ \theta &= 2\pi f_0 \tau. \end{aligned} \quad (12)$$

Начальная амплитуда колебательной скорости волны ( $u_0$ ) в данном случае определяется выражением

$$u_0 = A_0 2\pi f_0. \quad (13)$$

Уравнение Бюргерса в безразмерной форме [19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(Z, \tau)}{\partial Z} - U(Z, \tau) \frac{\partial U(Z, \tau)}{\partial \theta} = \\ = D \frac{\partial^2 U(Z, \tau)}{\partial \theta^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $D = 1/2\Gamma\text{Re}$  – параметр, определяемый нелинейным параметром  $\Gamma$  и числом Рейнольдса  $\text{Re} = \frac{u_0 \mu}{2\pi f_0 V_0 \eta}$ .

Искажение волнового профиля поперечной волны будет происходить вплоть до расстояния разрыва. В нашем случае менее 20 см. Уравнение Бюргерса в этом случае примет следующий вид [19]:

$$U(Z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(Z) \sin(2\pi f_0 n \tau), \quad (15)$$

где  $U_n(Z)$  –  $n$ -я гармоника, которая может быть выражена функцией Бесселя  $n$ -го порядка 1-го рода:

$$U_n(Z) = \frac{2J_n(nZ)}{nZ}. \quad (16)$$

При  $Z \ll 1$  функция Бесселя имеет вид [20]:

$$J_n(nZ) \approx \left(\frac{nZ}{2}\right)^n / n! \quad (17)$$

На таких расстояниях амплитуда  $n$ -й гармоники поперечного смещения определяется выражением [20]

$$A_n(Z) = \frac{U_n(Z)A_0}{2\pi f_0 n} = \frac{J_n(nZ)A_0}{\pi f_0 n^2 Z}. \quad (18)$$

Для оценки нелинейности среды введем параметр  $N$ , который будет выражаться следующим соотношением:

$$N = \frac{A_3}{A_1}, \quad (19)$$

где  $A_1$  и  $A_3$  – амплитуда первой и третьей гармоники.

Тогда для расстояний много меньше расстояний разрыва получим изменение  $N$  с расстоянием:

$$\begin{aligned} N(Z) &= \frac{A_3}{A_1} = 0,125 Z^2 = \\ &= 0,125 \left( \frac{\Gamma}{V_0^2} (2\pi f_0)^2 A_0 \right)^2 z^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Из формулы (20) можно заметить, что отношение  $N$  прямо пропорционально квадрату нелинейного параметра  $\Gamma$  и растет с увеличением расстояния  $\sim z^2$ .

## Результаты и их обсуждение

На основе представленных выше математических выражений, в Mathcad14 было проведено математическое модели-

рование изменения  $N$  с расстоянием для печени при различных стадиях фиброза от F0 до F4 (цирроз) [12]. Результаты моделирования ниже (рис. 1).

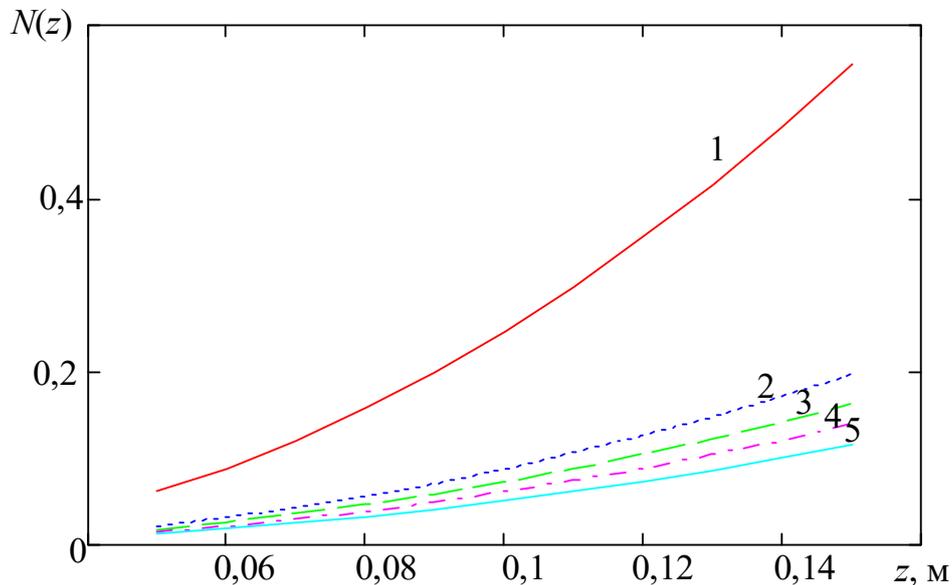


Рис. 1. Изменение  $N$  с расстоянием при фиброзе: 1 – F0; 2 – F1; 3 – F2; 4 – F3; 5 – F4

Fig. 1. Change of  $N$  with distance in fibrosis: 1 – F0; 2 – F1; 3 – F2; 4 – F3; 5 – F4

Кроме того, было проведено математическое моделирование оценки изменения  $N$  при жировом гепатозе стадии

S0-S3 [12]. Результаты моделирования представлены ниже (рис. 2).

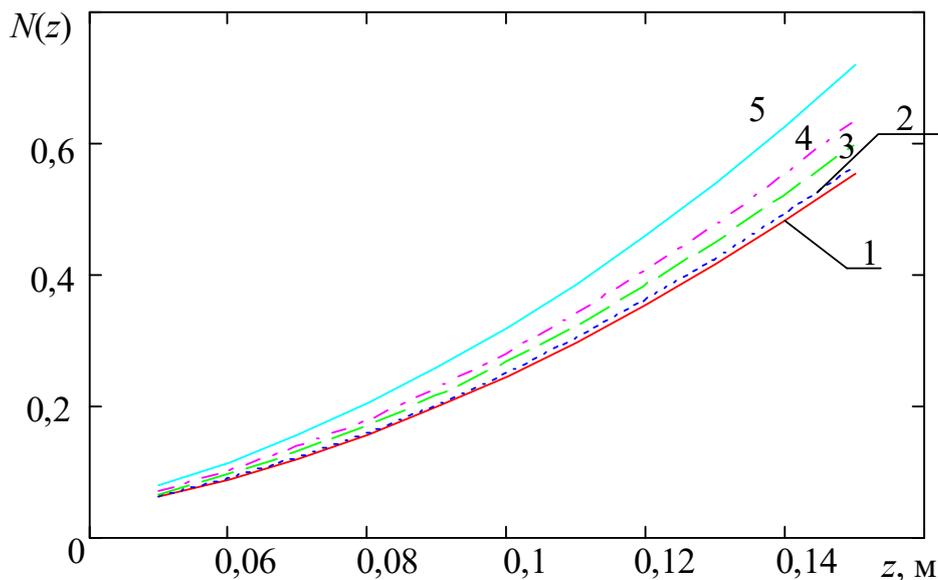


Рис. 2. Изменение  $N$  с расстоянием при гепатозе: 1 – S0; 2 – S1; 3 – S2; 4 – S3; 5 – S4

Fig. 2. Change of  $N$  with distance in hepatic steatosis: 1 – S0; 2 – S1; 3 – S2; 4 – S3; 5 – S4

## Выводы

Результаты, представленные на рисунке 1, показывают, что оценка величины  $N$  на определенном расстоянии позволяет дифференцировать стадии  $F1$ ,  $F2$  и  $F3$ , а также  $S1$  и  $S2$  которые обычно сложно определить с помощью стандартных линейных методов. Так различия в жесткости тканей при проведении линейной эластографии для стадий  $F1$  и  $F2$  составляет в среднем 20%, а изменение  $N$  для этих стадий составляет 26%. Различие величины  $N$  между стадиями

$S2$  и  $S3$  составляет около 20%. Данная дифференциация становится возможной благодаря изменению усредненного нелинейного коэффициента для каждой стадии.

Таким образом, можно сделать заключение, что учет нелинейных эффектов взаимодействия акустической волны с биотканями позволит повысить качество диагностики, а также дает возможность отслеживать динамику развития заболеваний, сопровождающихся структурными изменениями органа.

## Список литературы

1. Беляева А. В., Беляева О. А., Розинов В. М. Диагностический потенциал ультразвуковой эластографии у пациентов с хирургическими заболеваниями и травмами // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. 2023. Т. 3, № 3. С. 373–384. <https://doi.org/10.17816/psaic1523>
2. Кулебина Е. А., Сурков А. Н., Усольцева О. В. Неинвазивная диагностика фиброза печени: возможности инструментальных методик на современном этапе // РМЖ. Медицинское обозрение. 2020. № 4(5). С. 297–301.
3. Эффективность эластографии сдвиговой волной в оценке поражения печени у пациентов с постковидным синдромом / В. Н. Диомидова, Е. А. Разбинуна, О. Н. Валеева, Л. Н. Васильева // Acta Medica Eurasica. 2022. № 3. С. 99–113.
4. Информативность транзистной и двумерной эластографии сдвиговой волной в оценке жесткости печени при постковидном и сердечно-печеночном синдромах / В. Н. Диомидова, О. В. Валеева, Л. Н. Васильева, Е. А. Разбинуна // Acta Medica Eurasica. 2023. № 4. С. 31–43.
5. Возможности транзистной и двухмерной сдвиговолновой эластографии в диагностике фиброза при хронических диффузных заболеваниях печени невирусной этиологии / И. И. Жирков, А. В. Гордиенко, И. М. Павлович, В. В. Яковлев, Д. Ю. Сердюков // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2020. № 7. С. 86–91. <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-179-7-86-91>
6. Single Breath-Hold 3-Dimensional Magnetic Resonance Elastography Depicts Liver Fibrosis and Inflammation in Obese Patients / Omar Isam Darwish, Ahmed M. Gharib, Sami Jeljeli, Nader S. Metwalli, Jenna Feeley, Yaron Rotman, Rebecca J. Brown, Ronald

Ouwerkerk, David E. Kleiner, Daniel Stäb, Peter Speier, Ralph Sinkus, Radhouene Neji // *Invest Radiol*. 2023. N 58(6). P. 413–419. <https://doi.org/10.1097/RLI.0000000000000952>

7. Кравчук Д. А., Чернов Н. Н., Михралиева А. И. Аналитическое моделирование эластографии молочной железы // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2024. Т. 14, № 1. С. 104–113. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-104-113>. EDN SHBQKL

8. Эластография в ультразвуковой диагностике и возможности ее использования при заболеваниях. На примере данных работы отделения ультразвуковых методов диагностики БУ «Окружная клиническая больница» / Т. В. Краева, А. С. Демина, Л. Р. Носкова, Г. Х. Шакирова // *Здравоохранение Югры: опыт и инновации*. 2023. № 1(34). С. 9–18.

9. Park S. Y., Kang B. J. Combination of shear-wave elastography with ultrasonography for detection of breast cancer and reduction of unnecessary biopsies: a systematic review and meta-analysis // *Ultrasonography*. 2021. N 40(3). P. 318–332.

10. Возмущающие факторы при ультразвуковой эластографии печени. Часть 1. Общие положения и методические ошибки / С. И. Пиманов, В. С. Капорцева, Н. А. Михайлова, Е. В. Вергасова // *Вестник Витебского государственного медицинского университета*. 2023. Т. 22, № 1. С. 9–18.

11. Диагностика фиброза печени: акцент на эластографию / И. И. Жирков, А. В. Гордиенко, И. М. Павлович, Б. А. Чумак, В. В. Яковлев // *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2021. № 194 (10). С. 72–82.

12. Экспериментальные исследования акустического поля поперечных волн в модели биологической ткани / Д. А. Кравчук, Н. Н. Чернов, С. А. Переселков, А. И. Михралиева // *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2024. Т. 16, № 3. С. 381–386. EDN HJARTZ. <https://doi.org/10.17725/rensit.2024.16.381>

13. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Ануфренкова П. С. Об особенностях ультразвуковых измерений в образцах угля с использованием поперечных упругих волн // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № 4. С. 117–126.

14. Брацун Д. А., Красняков И. В., Брацун А. Д. Биомеханические модели живой ткани // *Российский журнал биомеханики*. 2023. № 4. С. 50–71. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2023.4.04>

15. Зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейно деформируемом теле. Часть 1. Основные принципы и соотношения механики деформируемого твердого тела / В. М. Круглов, С. В. Бакушев, А. И. Шеин, В. Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман, А. А. Томилов // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 4(23). С. 154–163.

16. Шамаев А. С., Шумилова В. В. Усреднение уравнений движения среды, состоящей из упругого материала и несжимаемой жидкости кельвина-фойгта // Уфимский математический журнал. 2024. № 1. С. 99–110.
17. Concretization of nonlinear constitutive relations by results of uniaxial compression and indentation experiments / Y. Astapov, A. Markin, M. Sokolova, D. Khristich // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 1902(1). P. 012002.
18. Чернов Н. Н., Вареникова А. Ю., Лагута М. В. Использование относительного нелинейного параметра для создания систем ультразвуковой визуализации биотканей // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10, № 1(36). С. 1–12.
19. Staddon M. F., Murrell M. P., Banerjee S. Interplay between substrate rigidity and tissue fluidity regulates cell monolayer spreading // Soft Matter. 2022. Vol. 18. P. 7877–7886. <https://doi.org/10.1039/D2SM00757F>
20. Нефедов Н. Н., Руденко О. В. О движении, усилении и разрушении фронтов в уравнениях типа бургерса с квадратичной и модульной нелинейностью // Доклады российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2020. Т. 493. С. 26–31.

### Reference

1. Belyaeva A.V., Belyaeva O.A., Rozinov V.M. Diagnostic potential of ultrasonic elastography in patients with surgical diseases and injuries. *Rossiiskii vestnik detskoj khirurgii, anesteziologii i reanimatologii = Russian Bulletin of Pediatric Surgery, Anesthesiology and Intensive Care*. 2023;3(3):373–384. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/psaic1523>
2. Kulebina E.A., Surkov A.N., Usoltseva O.V. Noninvasive diagnosis of liver fibrosis: possibilities of instrumental techniques at the present stage. *RMZh. Meditsinskoe obozrenie = Russian Medical Inquiry. Medical Review*. 2020;4(5):297–301. (In Russ.)
3. Diomidova V.N., Razbinina E.A., Valeeva O.N., Vasilyeva L.N. The effectiveness of shear wave elastography in assessing liver damage in patients with postcovid syndrome. *Acta Medica Eurasica*. 2022;(3):99–113. (In Russ.)
4. Diomidova V.N., Valeeva O.V., Vasilyeva L.N., Razbirina E.A. Informative value of transient and two-dimensional shear wave elastography in assessing liver stiffness in post-covid and cardiohepatic syndrome. *Acta Medica Eurasica*. 2023;(4):31–43. (In Russ.)
5. Zhirkov I.I., Gordienko A.V., Pavlovich I.M., Yakovlev V.V., Serdyukov D.Y. The possibilities of transient and two-dimensional shift-wave elastography in the diagnosis of fibrosis in chronic diffuse liver diseases of non-viral etiology. *Ekspertimental'naya i klinicheskaya*

*gastroenterologiya = Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2020;(7):86–91. (In Russ.)  
<https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-179-7-86-91>

6. Omar Isam Darwish, Ahmed M. Gha-rib, Sami Jeljeli, Nader S. Metwalli, Jenna Feeley, Yaron Rotman, Rebecca J. Brown, Ronald Ouwerkerk, David E. Kleiner, Daniel Stäb, Peter Speier, Ralph Sinkus, Radhouene Neji. Single Breath-Hold 3-Dimensional Magnetic Resonance Elastography Depicts Liver Fibrosis and Inflammation in Obese Patients. *Invest Radiol*. 2023;(58):413–419. <https://doi.org/10.1097/RLI.0000000000000952>

7. Kravchuk D.A., Chernov N.N., Mikhralieva A.I. Analytical modeling of breast elastography. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(1):104–113. (In Russ.) EDN SHBQKL. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-104-113>

8. Kraeva T.V., Demina A.S., Noskova L.R., Shakirova G.H. Elastography in ultrasound diagnostics and the possibilities of its use in diseases. Using the example of data from the department of ultrasound diagnostics of the BU «District Clinical Hospital». *Zdravookhranenie Yugry: opyt i innovatsii = Healthcare of Ugra: Experience and Innovations*. 2023;(1):9–18. (In Russ.)

9. Park S.Y., Kang B.J. Combination of shear-wave elastography with ultrasonography for detection of breast cancer and reduction of unnecessary biopsies: a systematic review and meta-analysis. *Ultrasonography*. 2021;(40):318–332.

10. Pimanov S.I., Kaportseva V.S., Mikhailova N.A., Vergasova E.V. Disturbing factors in ultrasound elastography of the liver. Part 1. General provisions and methodological errors. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Medical University*. 2023;22(1):9–18. (In Russ.)

11. Zhirkov I.I., Gordienko A.V., Pavlovich I.M., Chumak B.A., Yakovlev V.V. Diagnosis of liver fibrosis: emphasis on elastography. *Eksperimental'naya i klinicheskaya gastroenterologiya = Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2021;(194):72–82. (In Russ.)

12. Kravchuk D.A., Chernov N.N., Perestelkov S.A., Mikhralieva A.I. Experimental studies of the acoustic field of transverse waves in the model of biological tissue. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii = Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology*. 2024;16(3):381–386. (In Russ.) EDN HJAPTZ. <https://doi.org/10.17725/rensit.2024.16.381>

13. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Anufrenkova P.S. On the features of ultrasonic measurements in coal samples using transverse elastic waves. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020;(4):117–126. (In Russ.)

14. Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Bratsun A.D. Biomechanical models of living tissue. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2023;(4):50–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2023.4.04>
15. Kruglov V.M., Bakushev S.V., Shein A.I., Erofeev V. T., Al Dulaimi Salman Dawud Salman, Tomilov A.A. Dependencies between stresses and deformations in a nonlinearly deformable body. Part 1. Basic principles and relations of mechanics of a deformable solid. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2023;(4):154–163. (In Russ.)
16. Shamaev A.S., Shumilova V.V. Averaging the equations of motion of a medium consisting of an elastic material and an incompressible Kelvin-voigt fluid. *Ufimskii matematicheskii zhurnal = Ufa Mathematical Journal*. 2024;(1):99–110. (In Russ.)
17. Astapov Y., Markin A., Sokolova M., Khristich D. Concretization of nonlinear constitutional relations by results of uniaxial compression and indentation experiments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1902):012002.
18. Chernov N.N., Varenikova A.Yu., Laguta M.V. Using a relatively nonlinear parameter to create ultrasound imaging systems for biological systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization, and Information Technology*. 2022;10(1):1–12. (In Russ.)
19. Staddon M.F., Murrell M.P., Banerjee S. Interplay between substrate rigidity and tissue fluidity regulates cell monolayer spreading. *Soft Matter*. 2022;18:7877–7886. <https://doi.org/10.1039/D2SM00757F>
20. Nefedov N.N., Rudenko O.V. On the motion, strengthening and destruction of fronts in Burgers type equations with quadratic and modular nonlinearity. *Doklady rossiiskoi akademii nauk. Matematika, informatika, protsessy upravleniya = Reports of the Russian Academy of Sciences. Mathematics, Computer Science, Management Processes*. 2020;493:26–31. (In Russ.)

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Лагута Маргарита Владимировна**, ассистент  
Института нанотехнологий, электроники  
и приборостроения, Южный федеральный  
университет, Ростовская область,  
г. Таганрог, Российская Федерация,  
e-mail: laguta@sfnu.ru,  
ORCID: 0000-0001-7833-6055

**Margarita V. Laguta**, Assistant of the Institute  
of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation,  
Southern Federal University, Rostov region,  
Taganrog, Russian Federation,  
e-mail: laguta@sfnu.ru,  
ORCID: 0000-0001-7833-6055

**Кравчук Денис Александрович**, доктор технических наук, профессор Института нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, Ростовская область, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: [kravchukda@sfedu.ru](mailto:kravchukda@sfedu.ru), ORCID: 0000-0002-4220-3928

**Denis A. Kravchuk**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Southern Federal University, Rostov region, Taganrog, Russian Federation, e-mail: [kravchukda@sfedu.ru](mailto:kravchukda@sfedu.ru), ORCID: 0000-0002-4220-3928

**Чернов Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор Института нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, Ростовская область, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: [nnchernov@sfedu.ru](mailto:nnchernov@sfedu.ru), ORCID: 0000-0003-0656-8919

**Nikolay N. Chernov**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Southern Federal University, Rostov region, Taganrog, Russian Federation, e-mail: [nnchernov@sfedu.ru](mailto:nnchernov@sfedu.ru), ORCID: 0000-0003-0656-8919

---

# МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

## MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

---

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-144-156>



УДК 004.052

### Модель обработки сообщений от нескольких источников, кодированных в режиме сцепления блоков

М. О. Таныгин<sup>1</sup> ✉, М. В. Посканный<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

#### Резюме

**Цель исследования.** В статье рассматривается модель обработки сообщений, поступающих в приёмник из нескольких источников. Для класса распределённых систем с ограничениями на размер передаваемых сообщений и размер их идентификационных полей актуальным является использование кодирования в режиме сцепления блоков, которое при неизменном размере идентификатора предполагает существенно меньшую вероятность коллизии идентификаторов. Негативным последствием этого является необходимость определять источник не для одного сообщения, а для последовательности сообщений, ассоциированных с источником. В результате чего в приёмнике одно и то же сообщение в каждый момент времени может рассматриваться как потенциальное сообщение от нескольких источников, вынуждая хранить его в различных банках результатов промежуточных вычислений. Цель работы состоит в снижении вероятности ошибки определения источника сообщений за счёт учёта результатов параллельной обработки в независимых структурах.

**Методы.** Рассмотрен подход к повышению достоверности обработки сообщений заключается в параллельном формировании динамических структур, хранящих сообщения, которые могут быть ассоциированы с соответствующим источником. При принятии решения о принадлежности сообщения одному из рассматриваемых источников, информация о таком сообщении удаляется из всех структур, в которых она содержалась, так как для таких структур это сообщение является посторонним.

**Результаты.** Создана математическая модель параллельной обработки сообщений в независимых структурах. Рассчитаны вероятности возникновения ошибок на основе использования метода без использования совместной обработки сообщений и с использованием. Графически построены зависимости возникновения ошибок от величины интенсивности и длины сообщений. Получены значения вероятностей ошибок для двух сравниваемых вариантов обработки данных.

**Заключение.** В статье показано, как использование результатов обработки сообщений в независимых структурах, ассоциированных с соответствующим источником распределённой системы, может сказаться на достоверности и трудоёмкости процесса определения источников сообщений, кодированных в режиме сцепления блоков.

---

© Таныгин М. О., Посканный М. В., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(1):144–156

**Ключевые слова:** передатчик; приёмник; целевой источник; сцепление блоков; длина поля; последовательность сообщений; вероятность формирования; интенсивность.

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

**Для цитирования:** Таныгин М. О., Посканный М. В. Модель обработки сообщений от нескольких источников, кодированных в режиме сцепления блоков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 144–156. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-144-156>

Поступила в редакцию 24.01.2025

Подписана в печать 18.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## A model for processing messages from multiple sources encoded in the block coupling mode

Maxim O. Tanygin<sup>1</sup> ✉, Mikhail V. Poskanny<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: [tanygin@yandex.com](mailto:tanygin@yandex.com)

### Abstract

**Purpose of research.** The article considers a model for processing messages received by the receiver from several sources. For a class of distributed systems with restrictions on the size of transmitted messages and the size of their identification fields, it is relevant to use block coupling encoding, which, with the identifier size unchanged, implies a significantly lower probability of identifier collisions. A negative consequence of this is the need to identify the source not for a single message, but for a sequence of messages associated with the source. As a result, the receiver can consider the same message at any given time as a potential message from several sources, forcing it to be stored in various banks of intermediate calculation results. The aim of the work is to reduce the probability of error in determining the source of messages by taking into account the results of parallel processing in independent structures.

**Methods.** An approach to improving the reliability of message processing is considered. It consists in the parallel formation of dynamic structures storing messages that can be associated with the corresponding source. When deciding whether a message belongs to one of the sources under consideration, information about such a message is deleted from all structures in which it was contained, since for such structures this message is extraneous.

**Results.** A mathematical model of parallel message processing in independent structures has been created. The probabilities of errors are calculated based on the use of the method without using joint message processing and using. The dependences of error occurrence on the intensity and length of messages are graphically plotted. Error probability values were obtained for the two compared data processing options.

**Conclusion.** The article shows how using the results of message processing in independent structures associated with the corresponding source of a distributed system can affect the reliability and complexity of the process of determining the sources of messages encoded in the block coupling mode.

**Keywords:** transmitter; receiver; target source; block coupling; field length; message sequence; probability of formation; intensity.

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

**For citation:** Tanygin M.O., Poskanny M.V. A model for processing messages from multiple sources encoded in the block coupling mode. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(1):144–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-144-156>

Received 24.01.2025

Accepted 18.02.2025

Published 31.03.2025

\*\*\*

## Введение

В современном мире существует много подходов к обмену информацией между удалёнными абонентами. При передаче сообщений от источника к приёмнику могут возникать различные ошибки, порождаемые наличием в передающем тракте помех, наличием других абонентов, использующих данный канал связи, особенностями кодирования данных и другими факторами. Помимо этого возможны ошибки получения сообщений от других источников, которые будут опознаны приёмником как сообщения от целевого источника [1]. Принимая сообщения от посторонних передатчиков, приёмник может неверно выстроить поток информации, что приведёт к некорректной её последующей обработке. В рамках настоящей работы мы рассматриваем класс ошибок, связанных с некорректным определением в приёмнике последовательности поступающих от источника сообщений, закодированных в режиме сцепления блоков (Cipher Block Chaining – CBC) [2]. Стандартный метод CBC имеет ряд ограничений и уязвимостей, которые на данный момент ограничивают его применение [3]. Обычными для такого алгоритма проблемами являются проблемы распространения ошибки и невозможности распараллеливания процессов вычислений.

Последний из данных недостатков [4] значительно замедляет работу алгоритма в сравнении с другими актуальными на данный момент решениями. В рамках данной статьи рассмотрен алгоритм аутентификации, т. е. подтверждения авторства поступающих в приёмник сообщений, основанный на CBC и обладающий главным его преимуществом – более высокой достоверностью по сравнению с обычным блочным кодированием, но имеющий ряд доработок, позволяющих значительно повысить скорость обнаружения ошибок при приёме сообщений от большого количества источников информации.

## Материалы и методы

Рассмотрим общий подход к аутентификации в условиях множественности источников сообщений. В приёмник поступает некоторая последовательность сообщений  $p_1, p_2 \dots p_i$ . Для кодирования сообщений [5] источник использует известный источнику и приёмнику ключ  $Q$ . Пусть  $u_1 u_2 \dots u_i$  – множество закодированных таким образом сообщений.

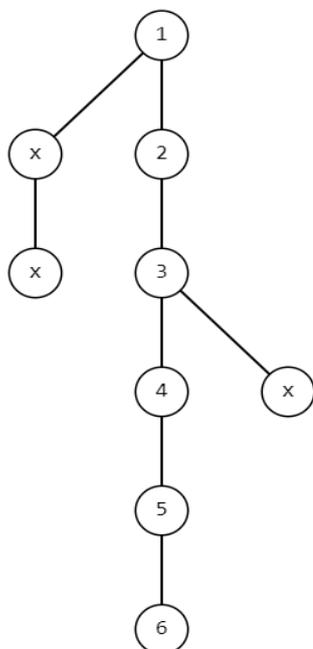
Алгоритм кодирования исходного сообщения представим с помощью функции  $E_Q$ . Кодирование сообщения в таком случае будет происходить по формуле

$$u_i = E_Q(p_i, Q). \quad (1)$$

Для удобства обработки сообщений они хранятся в буферной памяти приёмника [6]. Каждое закодированное сообщение состоит из двух слов –  $u^{inf}$  и  $u^h$ . Слово  $u^{inf}$  закодированного сообщения содержит информацию о адресе данного сообщения. Хеш-составляющая хранит информацию о следующем элементе последовательности. В соответствии с принципами кодирования в режиме сцепления блоков должно выполняться следующее условие:

$$u_2^{inf} \oplus Q = u_1^h. \quad (2)$$

Таким образом, сообщения в приёмнике выстраиваются в некоторую последовательность, которую можно представить в виде графа (рис. 1). Боковые ветви формируются в результате получения приёмником сообщений от сторонних источников.



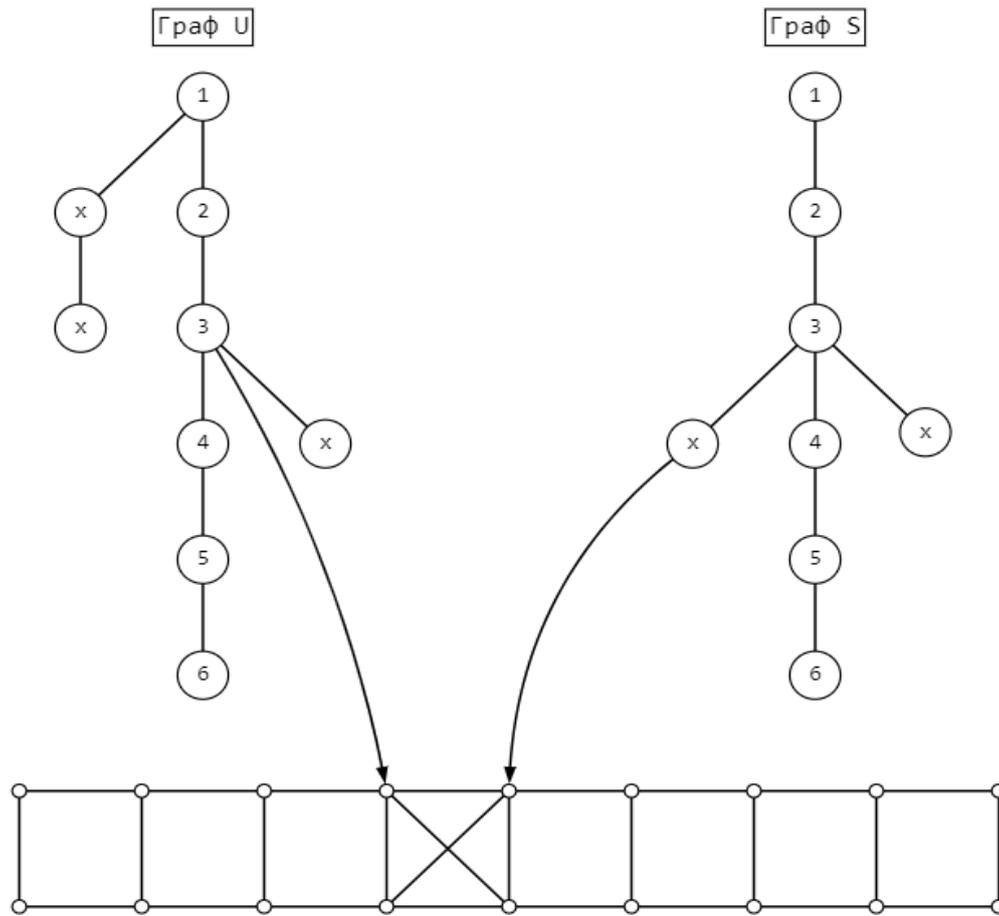
**Рис. 1.** Представление цепочки сообщений в виде графа [7]

**Fig. 1.** Representation of the message chain in the form of a graph [7]

Определение последовательности аутентичных сообщений [8] происходит с помощью вычисления наибольшей длины последовательности только тогда, когда приёмник примет определённое количество закодированных сообщений от данного источника. Именно те сообщения, которые следуют друг за другом по правилам блочного кодирования, будут опознаны как сообщения целевого источника. Определить такие цепочки можно, приняв только последовательность сообщений, из которых будет формироваться ряд из 5 и более [9]. На данном графе цепочка целевого приёмника обозначена цифрами, а нежелательные элементы обозначены символом  $x$ .

В реальных условиях работы приёмник зачастую принимает сообщения от большого количества источников [10]. Представим ситуацию, в которой приёмник получает сообщения от двух источников (рис. 2).

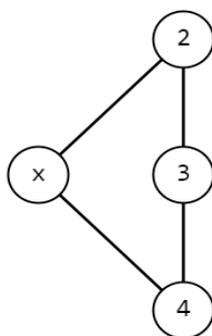
На каждом из представленных графов корректной последовательностью сообщений определяется цепочка сообщений (на рис. 2 – сообщения с цифрами). Посторонние сообщения, полученные в процессе передачи, отмечены символом  $x$ . Элементы, хранящие информацию об адресации сообщений в буфере [11], можно определить как вершины графа, а дугами графа в данном случае будут хеши, за счёт которых происходит построение последовательностей сообщений. Каждое сообщение обоих источников имеет равный шанс попасть в любую ячейку кэша памяти [12], указанного на нижней части рисунка 2.



**Рис. 2.** Ситуация с приёмом сообщений от двух источников

**Fig. 2.** The situation with receiving messages from two sources

Возникают ситуации, в которых при приёме сообщений от нескольких источников приёмник находит две переменные с одинаковыми адресами, которые ведут к одной и той же ячейке информации (рис. 3).



**Рис. 3.** Ситуация возникновения ошибки

**Fig. 3.** The situation of the error occurrence

Одна из них является аутентичной, а вторая – ошибочной, содержащей постороннее сообщение. Менее вероятны ошибки, описывающие более сложные кольцевые структуры, поэтому в настоящем исследовании мы их не рассматриваем. Такие ситуации чаще свойственны беспроводным вариантам передачи [13].

Если игнорировать факт обнаружения постороннего сообщения в одном графе в качестве аутентичного в другом, вероятность ошибок определяется лишь разрядностью хеша каждого сообщения. Очевидно, что в таком случае коллизии в первом графе можно предотвратить,

проанализировав граф сообщений, формируемых для другого источника, обнаружив в нём сообщение, которое сформировало коллизия в первом графе, и если оно было определено как аутентичное для второго источника, в первом графе удалить такую ветку.

### Результаты и их обсуждение

Рассмотрим модель обработки сообщений от нескольких источников с контролем попадания аутентичных сообщений одних графов в другие, но уже в качестве посторонних. Она позволит рассчитать вероятности ошибок от каждого элемента последовательности элементов сообщений.

$$p_r(k_r) = \sum_{l=k_r}^{|U|-M} \left[ p^w(l) \cdot \sum_{k_{r-1}=1}^{|U|-M} p_{r-1}^h(k_{r-1}^h) \frac{(k_{r-1}^h l 2^{-H})^l \cdot e^{-k_{r-1}^h l 2^{-H}}}{l!} \right],$$

$$p_r^h(k_r^h) = \sum_{l=k_r^h}^{|U|-M} \left[ p_r(l) \cdot \left( (2^{-H})^{j-k_r^h} \prod_{k=1}^{k_r^h} (1 - (k-1)2^{-H}) \right) \right]. \quad (4)$$

Имеем  $L+1$  источников информации, тогда каждый источник формирует сообщение с интенсивностью  $K_j$ ,  $j = 0 \dots L$ , длина последовательности сообщений  $j$ -го источника  $m_j$ . Каждое сообщение  $j$ -го источника дополняется хешем размером  $H_j$ ,  $j = 0 \dots L$ . Кроме источников информации, для которых происходит процесс идентификации [6], в системе действует источник посторонних сообщений, который

Из [14] использованы формулы для вероятности формирования коллизии в хешах сообщений, приводящих к формированию структуры, показанной на рисунке 3.

$$p_{col}(j) = \sum_{l=1}^{u-m} \left[ p_j(l) \left( 1 - (1 - 2^{-H})^l \right) \right], \quad (3)$$

где  $p_j(l)$  – вероятность формирования;  $l$  – побочных ветвей в  $j$ -й позиции последовательности сообщений;  $H$  – длина поля (длина хеша);  $U$  – общее число сообщений полученных приёмником;  $m$  – длина последовательности сообщений от рассматриваемого источника.

Вероятность  $p_j(l)$  определяется по рекуррентным формулам [15]:

осуществляет навязывание ложных данных [16] (каждое его сообщение считаем сформированным случайно). В реальности может быть несколько таких источников, но для упрощения модели мы объединяем их в один, считая суммарную интенсивность таких источников равной  $K^*$ , и длину последовательности таких посторонних сообщений принимаем за  $m^*$

Рассматриваем обработку сообщений от 0-го источника [17]. Вероятность коллизии для одного сообщения данного источника будет равна  $p_{\text{col}}^0$  и определяется по формуле (1) при условии, что

$$U = \frac{\sum_{i=0}^L K_i + K^*}{K_0} m_0, m = m_0, H = H_0.$$

Вероятность того, что сообщение, сформировавшее коллизию, было сформировано источником под номером  $j = 1 \dots L$ , определится как  $\frac{K_j}{\sum_{i=1}^L K_i + K^*}$ .

Вероятность того, что сообщение от

данного  $j$ -го источника будет обработано без ошибок и раньше, чем текущее сообщение нулевого источника, равно произведению  $(1 - p_{\text{col}}^j) \frac{K_j}{K_j + K_0}$ , где

$p_{\text{col}}^j$  – вероятность коллизии в таком сообщении  $j$ -го источника (определяется также по формуле (1) с параметрами

$$U = \frac{\sum_{i=0}^L K_i + K^*}{K_j} m_j, m = m_j, H = H_j).$$

Тогда вероятность ошибки при обработке  $m_0$  сообщений рассматриваемого нулевого источника определится по формуле

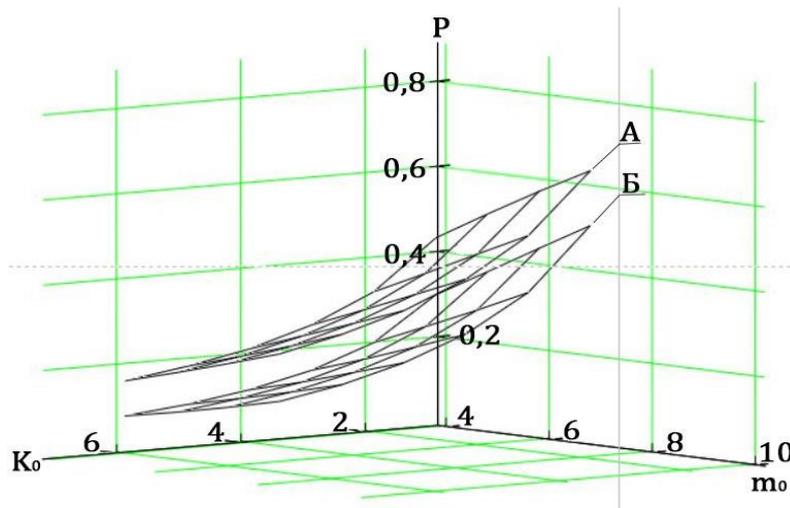
$$P^{\text{MET}} = 1 - \left\{ (1 - p_{\text{col}}^0) + p_{\text{col}}^0 \sum_{l=1}^L \left[ \frac{K_l}{\sum_{i=1}^L K_i + K^*} (1 - p_{\text{col}}^l) \frac{K_l}{K_l + K_0} \right] \right\}^{m_0}. \quad (5)$$

Вероятность возникновения ошибки без использования рассматриваемого метода определится по формуле совместного наступления  $m_0$  независимых событий [18]:

$$P^{\text{ORIG}} = 1 - (1 - p_{\text{col}}^0)^{m_0}. \quad (6)$$

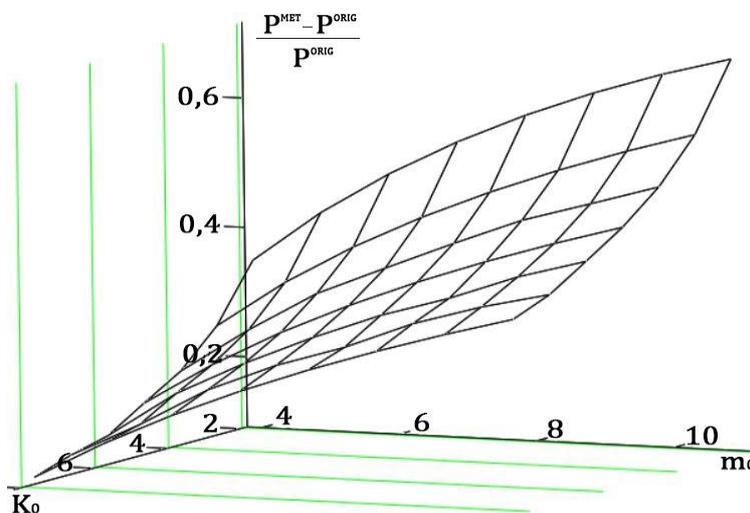
Опираясь на описанные формулы, построим графики [19] сравнения моделей без использования совместной обработки сообщений и с использованием этого алгоритма (рис. 4).

Анализируя оба графика, можно отметить, что в диапазоне параметров, где вероятность ошибки без использования контроля сообщений в графах не превышает 0,2, использование такого контроля позволяет снизить исходную вероятность ошибки в 2–3 раза (до значений, не превышающих 0,1). Такая тенденция в графике наблюдается при увеличении длины сообщений. Относительное уменьшение вероятности (значение  $(P^{\text{MET}} - P^{\text{ORIG}}) / P^{\text{ORIG}}$ ) приведено ниже (рис. 5).



**Рис. 4.** Вероятность ошибочной обработки последовательности сообщений источника в зависимости от интенсивности формирования источником сообщений  $K_0$  и длины последовательности сообщений  $m_0$  при  $\sum_{i=1}^L K_i + K^* = 56$ : А – без использования совместной обработки сообщений; Б – с использованием совместной обработки сообщений

**Fig. 4.** Depending on the intensity of formation the source of the messages  $K_0$  and the length of the message sequence  $m_0$  when  $\sum_{i=1}^L K_i + K^* = 56$ : А – without using joint message processing; Б – using joint message processing



**Рис. 5.** Зависимость отношения разности  $P^{MET}$  и  $P^{ORIG}$  к  $P^{ORIG}$  от интенсивности формирования источником сообщений  $K_0$  и длины последовательности сообщений  $m_0$  при  $\sum_{i=1}^L K_i + K^* = 56$

**Fig. 5.** The dependence of the ratio of the difference between  $P^{MET}$  and  $P^{ORIG}$  to  $P^{ORIG}$  on the intensity of the formation of messages by the source  $K_0$  and the length of the message sequence  $m_0$

$$\text{at } \sum_{i=1}^L K_i + K^* = 56$$

Исходя из полученного графика видно, что при увеличении интенсивности [20] и длины сообщений отношение разности вероятности появления ошибки с использованием ранее описанного метода и без него к  $P^{ORIG}$  увеличивается, делая более целесообразным контроль попадания сообщений в различные динамические структуры, формируемые приёмником.

### Выводы

В данной работе был рассмотрен алгоритм с использованием совместной обработки сообщений. Были обозначены основные понятия, такие как интенсивность, длина поля сообщений, длина последовательности сообщений, вероятность возникновения ошибки. Графически проиллюстрирован принцип работы алгоритма и пример возникновения ошибки в рамках передачи информации на основе работы приёмника несколькими источниками одновременно. Рассчитаны вероятности возникновения ошибок с использованием контролем попадания аутентичных сообщений одних графов в другие и без такового контроля. Построены графики вероятности ошибочной обработки последовательности сообщений источника в зависимости от

интенсивности формирования источником сообщений  $K_0$  и длины последовательности сообщений  $m_0$  и, а также зависимости относительного уменьшения исходной вероятности ошибки в зависимости от данных параметров. Исследования показали, что эффективность подхода увеличивается с уменьшением изначальной вероятности ошибки при большом числе сообщений в последовательности и высокой относительной интенсивности формирования сообщений целевым источником. В области высокой исходной вероятности ошибки (0,4–0,6) она снижается до диапазона 0,2–0,4. При исходной вероятности ошибки менее 0,2 достигается кратное снижение вероятности ошибки до уровня 0,05–0,10.

Данное исследование предполагает его развитие в области проектирования высокопроизводительных алгоритмов поиска сообщений в различных графах, формируемых приёмником, а также исследование влияния интенсивности множества источников на достигаемые показатели достоверности с целью балансирования интенсивности передаваемых сообщений для достижения оптимальной общей вероятности ошибок определения источника сообщений.

### Список литературы

1. O'Brien D., Rajbhandari S., Chun H. Transmitter and receiver technologies for optical wireless // Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci. 2020. N 378 (2169). P. 20190182. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0182>

2. Таныгин М. О., Ахмад А. А., Казакова О. В. Модель размещения данных во внутренней памяти вычислителя, реализующего схему кодирования данных в режиме сцепления блоков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 1. С. 73–91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-73-91>
3. Бакулина М. П. Эффективный метод блочного кодирования двухуровневых изображений // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30, № 2. С. 282–285. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.2.282-285>
4. Уязвимости в учете времени при симметричной расшифровке в режиме CBC с использованием заполнения. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/standard/security/vulnerabilities-cbc-mode> (дата обращения: 04.12.2024).
5. Wolfowitz J. The coding of messages subject to chance errors. URL: <https://projecteuclid.org/journalArticle/Download?urlId=10.1215%2Fijm%2F1255380682> (дата обращения: 10.12.2024).
6. Таныгин М. О., Альшая Х. Ю., Кулешова Е. А. Способ контроля целостности информации передаваемых блоков // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2020. № 1. С. 181–189.
7. Zhanfang Zhao, Sung-Kook Han, In-Mi So. Architecture of Knowledge Graph Construction Techniques // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 118, N 19. P. 1869–1883.
8. Плугатарев А. В. Модель определения источника сообщений на основе статистического анализа метаданных в открытом канале связи // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 4 (60). С. 30–37.
9. Таныгин М. О., Чеснокова А. А., Ахмад А. А. А. Снижение ресурсных затрат на обработку кодов аутентификации сообщений за счет ограничения числа обрабатываемых сообщений // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 4 (60). С. 22–29.
10. Установление доверительного канала обмена данными между источником и приёмником информации с помощью модифицированного метода одноразовых паролей / М. О. Таныгин, Х. Я. Алшаиа, В. А. Алтухова, А. Л. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 63–71.
11. Kai Luo, Athanassios Manikas. Joint Transmitter – Receiver Optimization in Multi-target MIMO Radar // IEEE Transactions on Signal Processing. 2017. Vol. 65, is. 23. P. 6292–6302. <https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2726993>
12. Bidokhti Sh. S., Wigger M., Timo R. Noisy Broadcast Networks With Receiver Caching // IEEE Transactions on Information Theory. 2018. Vol. 64, is. 11. P. 6996–7016. <https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2835507>
13. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности / Ю. В. Васильков, А. В. Тимошенко,

В. А. Советов, А. С. Кирмель // Труды МАИ. 2019. № 108. С. 1–23. <https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16>

14. Повышение скорости обнаружения ошибок при формировании цепочек блоков данных на основе анализа числа совпадений хешей / М. О. Таныгин, Е. А. Кулешова, А. В. Митрофанов, Е. Ю. Гладилина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 1 (57). С. 85–93. [https://doi.org/10.54398/2074-1707\\_2022\\_1\\_85](https://doi.org/10.54398/2074-1707_2022_1_85)

15. Mathematical modelling and discrete mathematics: opportunities for modern mathematics teaching / G. Greefrath, H.-S. Siller, K. Vorhölter, G. Kaiser // ZDM – Mathematics Education. 2022. Vol. 54. P. 865–879.

16. Tung-Huang Feng, Wei Teng Li, Min-Shiang Hwang. A false data report filtering scheme in wireless sensor networks: A Survey // International journal of network security. 2015. Vol. 17, N 3. P. 141.

17. Таныгин М. О., Алшаиа Х. Я., Митрофанов А. В. Сложность алгоритма определения источника данных // Труды МАИ. 2021. № 117. С. 1–21. <https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-12>

18. The classical origin of modern mathematics / F. Gargiulo, A. Caen, R. Lambiotte, T. Carletti // EPJ Data Science. 2016. N 5. P. 26. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-016-0088-y>

19. Таныгин М. О. Исследование вероятности возникновения одного типа ошибок в системе определения источника информационных пакетов // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 777–785. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-9-777-7>

20. Spyros G. Tzafestas. Information I: Communication, Transmission, and Information Theory // Energy, Information, Feedback, Adaptation, and Self-organization. Cham: Springer, 2018. P. 157–217.

## Reference

1. O'Brien D., Rajbhandari S., Chun H. Transmitter and receiver technologies for optical wireless. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2020;(378):20190182. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0182>

2. Tanygin M.O., Akhmad A.A., Kazakova O.V. A model for placing data in the internal memory of a computer implementing a data encoding scheme in the block coupling mode. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2023;27(1):73–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-73-91>

3. Bakulina M.P. Effective method of block coding of two-level images. *Programmnye produkty i sistemy = Software Products and Systems.* 2017;30(2):282–285. (In Russ.) <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.2.282-285>

4. Time accounting vulnerabilities in symmetric decryption in CBC mode using padding. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/standard/security/vulnerabilities-cbc-mode> (accessed 04.12.2024)
5. Wolfowitz J. The coding of messages subject to chance errors. Available at: <https://projecteuclid.org/journalArticle/Download?urlId=10.1215%2Fijm%2F1255380682> (accessed 10.12.2024).
6. Tanygin M.O., Alshaya H.Yu., Kuleshova E.A. A method for monitoring the integrity of information of transmitted blocks. *Radioelektronika, informatika, upravlenie = Radio Electronics, Computer Science, Management*. 2020;1:181–189. (In Russ.)
7. Zhanfang Zhao, Sung-Kook Han, In-Mi So. Architecture of Knowledge Graph Construction Techniques. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018;118(19):1869–1883. (In Russ.)
8. Plugatarev A.V. A model for determining the source of messages based on statistical analysis of metadata in an open communication channel. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2022;(4):30–37. (In Russ.)
9. Tanygin M.O. Chesnokova A.A. Akhmad A.A. A Reduction in resource costs for processing message authentication codes by limiting the number of processed messages. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2022;(4):22–29. (In Russ.)
10. Tanygin M.O., Alshaia H.Ya., Altukhova V.A., Marukhlenko A.L. Establishing a trusted data exchange channel between the source and receiver of information using a modified one-time role method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(4):63–71. (In Russ.)
11. Kai Luo, Athanassios Manikas. Joint Transmitter – Receiver Optimization in Multi-target MIMO Radar. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2017;65:6292–6302. <https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2726993>
12. Bidokhti Sh. S., Wigger M., Timo R. Noisy Broadcast Networks With Receiver Caching. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2018;64:6996–7016. <https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2835507>
13. Vasilkov Y.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel A.S. Methodology for assessing the functional characteristics of radio monitoring systems with limited data on reliability parameters. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2019;(108):1–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16>
14. Tanygin M.O., Kuleshova E.A., Mitrofanov A.V., Gladilina E.Yu. Increasing the speed of error detection in the formation of data block chains based on the analysis of the

number of hash matches. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2022;1:85-93. (In Russ.) [https://doi.org/10.54398/2074-1707\\_2022\\_1\\_85](https://doi.org/10.54398/2074-1707_2022_1_85)

15. Greefrath G., Siller H.-S., Vorhölter K., Kaiser G. Mathematical modelling and discrete mathematics: opportunities for modern mathematics teaching. *ZDM – Mathematics Education*. 2022;54:865–879.

16. Tung-Huang Feng, Wei Teng Li, Min-Shiang Hwang. A false data report filtering scheme in wireless sensor networks: A Survey. *International Journal of Network Security*. 2015;17(3):141.

17. Tanygin M.O., Alshaia H.Ya., Mitrofanov A.V. The complexity of the algorithm for determining the data source. *Trudy MAI = Proceedings of MAY*. 2021;(117):1–21. <https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-12>

18. Gargiulo F., Caen A., Lambiotte R., Carletti T. The classical origin of modern mathematics. *EPJ Data Science*. 2016;(5):26. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-016-0088-y>

19. Tanygin M.O. Investigation of the probability of occurrence of one type of error in the system for determining the source of information packages. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2020;63(9):777–785. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-9-777-7>

20. Spyros G. Tzafestas. Information I: Communication, Transmission, and Information Theory. *Energy, Information, Feedback, Adaptation, and Self-organization*. Cham: Springer; 2018. P. 157–217.

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Таныгин Максим Олегович**, доктор технических наук, декан факультета фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [tanygin@yandex.ru](mailto:tanygin@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-4099-1414

**Посканный Михаил Владимирович**, аспирант кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [mposkannyu@bk.ru](mailto:mposkannyu@bk.ru), ORCID: 0009-0006-5633-5645

**Maxim O. Tanygin**, Candidate of Sciences (Engineering), Head of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [tanygin@yandex.ru](mailto:tanygin@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-4099-1414

**Mikhail V. Poskanny**, Post-Graduate Student of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [mposkannyu@bk.ru](mailto:mposkannyu@bk.ru), ORCID: 0009-0006-5633-5645

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-157-169>



УДК 519.715

## Метод диагностики преходящих невротических расстройств на основе гибридных нечетких моделей

Р. И. Сафронов<sup>1</sup>, О. А. Кныш<sup>2</sup>, С. Н. Родионова<sup>2</sup>, Л. В. Стародубцева<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Курская государственная аграрная академия имени И. И. Иванова  
ул. К. Маркса, д. 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

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

✉ e-mail: lilja-74@inbox.ru

### Резюме

**Целью исследования** является синтез нечетких моделей диагностики преходящих невротических расстройств на основе гибридных нечетких моделей, обеспечивающих повышение качества принимаемых решений.

**Методы.** Разведочный анализ показал, что структура данных, описывающих искомый класс психических расстройств, носит нечеткий характер, что делает целесообразным использование нечеткой логики принятия решений, а конкретно методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил.

Определен состав информативных показателей, описывающих преходящие невротические расстройства в составе признаков, принятых в традиционной медицинской практике, уровня адаптации организма в целом, электрического разбаланса биологически активных точек, связанных с невротозами, показателя уверенности в прогнозе появления невротозов, количественных характеристики функционального резерва органов и систем мишеней. По этим группам показателей получены частные диагностические модели, агрегация которых дает финальную диагностическую модель.

**Результаты.** Для оценки качества принимаемых использовано три уровня проверки качества: на экспертном уровне; по модельным контрольным выборкам и по контрольным выборкам, в которых наличие преходящих невротических расстройств проверялось с использованием независимых общепринятых методов исследования. Качество классификации проверялось по таким показателям, как диагностическая чувствительность, специфичность и диагностическая эффективность, которые превысили величину 0,97.

**Заключение.** В работе получены нечеткие модели диагностики преходящих невротических расстройств. Проведенная оценка качества принимаемых решений с использованием методов экспертного оценивания, математического моделирования и статистического анализа показала, что полученные гибридные нечеткие модели обеспечивают приемлемое качество диагностики с уверенностью не ниже 0,97.

**Ключевые слова:** диагностика; преходящие невротические расстройства; математические модели; нечеткая логика; функции принадлежности.

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

© Сафронов Р. И., Кныш О. А., Родионова С. Н., Стародубцева Л. В., 2025

**Для цитирования:** Метод диагностики преходящих невротических расстройств на основе гибридных нечетких моделей / Р. И. Сафронов, О. А. Кныш, С. Н. Родионова, Л. В. Стародубцева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 157–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-157-169>

Поступила в редакцию 11.01.2025

Подписана в печать 08.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## A method for diagnosing borderline mental disorders based on hybrid fuzzy models

Ruslan I. Safronov<sup>1</sup>, Olga A. Knysh<sup>2</sup>, Sofya N. Rodionova<sup>2</sup>,  
Lilia V. Starodubtseva<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov  
70 K. Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

<sup>2</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: lilja-74@inbox.ru

### Abstract

**The purpose of the research** is to synthesize fuzzy diagnostic models for transient neurotic disorders based on hybrid fuzzy models that improve the quality of decisions.

**Methods.** Exploratory analysis has shown that the data structure describing the desired class of mental disorders is fuzzy, which makes it advisable to use fuzzy decision-making logic, and specifically the methodology for synthesizing hybrid fuzzy decision rules. The composition of informative indicators describing transient neurotic disorders in the composition of signs accepted in traditional medical practice, the level of adaptation of the body as a whole, the electrical imbalance of biologically active points associated with neuroses, confidence in the prognosis of the appearance of neuroses, quantitative characteristics of the functional reserve of target organs and systems is determined. For these groups of indicators, private diagnostic models have been obtained, the aggregation of which gives the final diagnostic model.

**Results.** To assess the quality of admissions, three levels of quality control were used: at the expert level; according to model control samples and according to control samples in which the presence of transient neurotic disorders was checked using independent generally accepted research methods. The quality of the classification was checked by such indicators as diagnostic sensitivity, specificity and diagnostic effectiveness, which exceeded the value of 0,97.

**Conclusion.** The paper provides fuzzy models for the diagnosis of transient neurotic disorders. An assessment of the quality of decisions made using expert assessment methods, mathematical modeling and statistical analysis showed that the hybrid fuzzy models obtained provide acceptable diagnostic quality with a confidence of at least 0,97.

**Keywords:** diagnostics; borderline mental disorders; mathematical models; fuzzy logic; membership functions.

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

**For citation:** Safronov R.I., Knysh O.A., Rodionova S.N., Starodubtseva L.V. A method for diagnosing borderline mental disorders based on hybrid fuzzy models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(1):157–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-157-169>

Received 11.01.2025

Accepted 08.02.2025

Published 31.03.2025

## Введение

Современное состояние трудового процесса характеризуется высоким уровнем автоматизации и интенсивности трудовой деятельности, порождающим возрастание уровня стрессов, что, по мнению широкого круга специалистов, приводит к особому типу заболеваний, определяемых общим термином «пограничные психические расстройства» (ППР) [1]. С другой стороны, такой же трудной диагностической задачей является диагностика промежуточных классов психических состояний, которые специалисты не относят к ППР, но они наблюдаются между классами «здоров» и «ранняя стадия заболеваний». В современной литературе такие классы состояний часто называют переходящими или персистирующими классами с той же аббревиатурой. Анализ профильной литературы показывает, что ППР характеризуются значительным омоложением, ростом снижения качества жизни у пациентов, страдающих данными заболеваниями [2].

Характерной чертой этого класса заболеваний является то, что они, маскируясь под адаптационный синдром, не вызывают адекватных реакций пациентов и их своевременного обращения к специалистам, не разбираясь в причинах и специфике своего расстройства [3], что, в конце концов, приводит к устойчивому снижению качества жизни

пациента [4]. В результате позднего обращения к врачам-психиатрам для эффективного лечения приходится тратить больше времени и усилий [5]. С учетом сказанного разработка эффективных средств диагностики пограничных и переходящих психических расстройств с использованием современных информационных и интеллектуальных технологий является актуальной задачей.

## Материалы и методы

В современной психологии под пограничными и переходящими психическими расстройствами (ППР) понимают не резко выраженные нарушения, граничащие с состоянием здоровья и с начинающимся патологическим процессом. При этом начинающийся патологический процесс можно отнести к ранней стадии заболеваний, связанных с центральной нервной системой. В ряде работ ППР определяют как расстройства, связанные со срывом психической адаптации.

Из определения ППР специалистами предметной области (врачами-психиатрами) следует, что класс состояний человека, определяемый как пограничные психические расстройства (класс  $\omega_{\Pi}$ ), является принципиально нечеткой конструкцией [6], сходной с классами «прогноз заболевания» [7] и «ранняя стадия заболевания» [8]. В условиях нечеткой и неполной структуры данных в работе [9] рекомендуется

использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) [10].

Отличительной чертой МСГНРП [11] является эффективное соединение мощи естественного интеллекта [12] с достоинствами методов искусственного интеллекта [13], реализуемого технологиями мягких вычислений [14]. Основными элементами правил принятия решений в МСГНРП являются гибридные нечеткие модели [15], использующие функции принадлежности  $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$  [16] к гипотезам (классам)  $\omega_\ell$  с базовыми переменными, определяемыми существом решаемой задачи [17], коэффициенты уверенности [10], операторы нечеткого вывода [18] и т. д. Анализ литературы, посвященной исследованию ППП, показал, что пограничные психические расстройства в международном классификаторе болезней МКБ-10 определяются следующим образом: F3 – расстройства настроения (аффективные расстройства); F4 – невротические расстройства, связанные со стрессом, и соматоформные расстройства; F5 – поведенческие синдромы, связанные с физиологическими нарушениями и физическими факторами; F6 – расстройства личности и поведения в зрелом возрасте. При этом для описания исследуемой патологии в профессиональной литературе предлагается использовать девять информативных признаков:  $x_1, \dots, x_9$  [9].

В традиционной психиатрии принятие решения о наличии у обследуемого ППП осуществляется по достаточно простому алгоритму [7]. Диагноз ППП ставится при наличии у обследуемых 5 и более признаков. При таком алгоритме переход к нечеткому правилу принятия решений с учетом рекомендаций работы [9] осуществляется путем двоичного кодирования признаков ( $x_i = 1$  – есть фактор,  $x_i = 0$  – нет фактора) с последующим их суммированием для получения базовой переменной  $X$  для функции принадлежности  $\mu_{\text{ппр}}(X)$  к классу ППП [13].

Уверенность в наличии у обследуемых ППП по этой группе признаков  $YPP_{\text{ппр}}$  определяется соответствующей функцией принадлежности  $\mu_{\text{ппр}}(X)$ .

Синтез  $\mu_{\text{ппр}}(X)$ , как и в работе [19], проводился методом Дельфы по узловым (опорным) точкам [10] с построением таблиц экспертного опроса путем ответа на следующие пять вопросов. При каких значениях  $X_{\min}$  функция принадлежности  $\mu_{\text{ппр}}(X)$  имеет минимальное значение  $\mu_{\text{ппр min}}(X)$  и каково это значение? При каких значениях  $X_{\max}$  функция принадлежности  $\mu_{\text{ппр}}(X)$  имеет максимальное значение  $\mu_{\text{ппр max}}(X)$  и каково это значение [10]? Какую геометрическую форму имеет линия связи между минимальным и максимальным значениями [10] функции принадлежности [20]?

Результаты опроса экспертов по шкале  $X$  и усредненные по всем экспертам координаты опорных точек функции принадлежности  $\mu_{\text{ппр}}(X)$  приведены ниже (табл. 1).

**Таблица 1.** Результаты опроса экспертов для функции принадлежности  $\mu_{пр}(X)$

**Table 1.** Results of the expert survey for the membership function  $\mu_{пр}(X)$

Граничный параметр	Эксперты							Среднее значение
	1	2	3	4	5	6	7	
$X_{\min}$	1	2	1	1	0	2	0	1
$\mu_{пр \min}(X)$	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_{\max}$	8	7	7	8	5	7	7	7
$\mu_{пр \max}(X)$	1,0	0,8	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9
Форма графика	КВ	КВ	КВ	КВ	ЛН	КВ	ЛН	КВ

По рассчитанным средним значениям была получена аналитическая модель вида:

$$YPP_{пр} = \mu_{пр}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 2, \\ 0,072(x - 2)^2, & \text{если } 2 \leq x < 4,5, \\ 0,9 - 0,072(x - 7)^2, & \text{если } 4,5 \leq x < 7, \\ 0,9, & \text{если } x \geq 7. \end{cases} \quad (1)$$

Решение задачи синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики невротических расстройств показало, что между классами «здоров» и «ранняя стадия заболевания» существует некоторое промежуточное состояние, которое, по мнению экспертов, следует рассматривать как класс переходящих невротических расстройств (ПНР), для которого на кафедре БМИ ЮЗГУ был получен набор информативных признаков и функций принадлежности к классу «ранняя стадия невротических расстройств». Анализ этих функций принадлежности показал, что обратные к ним функции представляют собой функции принадлежности к классу «здоров» (класс  $\omega_3$ ).

Тогда геометрически функции принадлежности к классу ПНР (класс  $\omega_{пнр}$ ) располагаются между функциями принадлежности к классам «здоров» и «ранняя стадия невротических расстройств» (класс  $\omega_p$ ). Реализуя эту логику, эксперты построили графики функций принадлежности к искомым классам состояний с базовыми переменными по такому набору показателей, как: система информативных признаков, принятых в традиционной медицинской практике (показатель  $YOT_p$ ); уровень адаптации организма в целом (показатель  $UAO$ ); электрический разбаланс БАТ, связанных с невротическими расстройствами (показатель  $ER_N$ ); показатель уверенности в прогнозе появления невротических расстройств (показатель  $YPN$ ); количественные характеристики функционального резерва органов и систем мишеней (показатель  $YF_p$ ). Аналитически эти зависимости описываются функциями принадлежности вида:

$$\mu_{\text{нпр}}(YOT_p) = \begin{cases} 0, & \text{если } YOT_p < 0,2, \\ 20(YOT_p - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq YOT_p < 0,3, \\ 0,4 - 20(YOT_p - 0,4)^2, & \text{если } 0,3 \leq YOT_p < 0,4, \\ 0,4, & \text{если } 0,4 \leq YOT_p < 0,6, \\ 0,4 - 20(YOT_p - 0,6)^2, & \text{если } 0,6 \leq YOT_p < 0,7, \\ 20(YOT_p - 0,8)^2, & \text{если } 0,7 \leq YOT_p < 0,8, \end{cases}$$

$$\mu_{\text{нпр}}(YA_\phi) = \begin{cases} 0, & \text{если } YA_\phi < 0,2, \\ 4,44(YA_\phi - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq YA_\phi < 0,35, \\ 0,2 - 4,44(YA_\phi - 0,5)^2, & \text{если } 0,35 \leq YA_\phi < 0,65, \\ 4,44(YA_\phi - 0,8)^2, & \text{если } 0,65 \leq YA_\phi < 0,8, \\ 0, & \text{если } YA_\phi \geq 0,8, \end{cases}$$

$$\mu_{\text{нпр}}(ER_N) = \begin{cases} 0, & \text{если } ER_N < 0,2, \\ 6,67(ER_N - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq ER_N < 0,35, \\ 0,3 - 6,67(ER_N - 0,5)^2, & \text{если } 0,35 \leq ER_N < 0,65, \\ 6,67(ER_N - 0,8)^2, & \text{если } 0,65 \leq ER_N < 0,8, \\ 0, & \text{если } ER_N \geq 0,8, \end{cases}$$

$$\mu_{\text{нпр}}(YPN) = \begin{cases} 0, & \text{если } YPN < 0,3, \\ 8,89(YPN - 0,3)^2, & \text{если } 0,3 \leq YPN < 0,45, \\ 0,4 - 8,89(YPN - 0,6)^2, & \text{если } 0,45 \leq YPN < 0,75, \\ 8,89(YPN - 0,9)^2, & \text{если } 0,75 \leq YPN < 0,9, \\ 0, & \text{если } YPN \geq 0,9, \end{cases}$$

$$\mu_{\text{нпр}}(YF_p) = \begin{cases} 0, & \text{если } YF_p < 0,1, \\ 15(YF_p - 0,1)^2, & \text{если } 0,1 \leq YF_p < 0,2, \\ 0,3 - 15(YF_p - 0,3)^2, & \text{если } 0,2 \leq YF_p < 0,4, \\ 15(YF_p - 0,5)^2, & \text{если } 0,4 \leq YF_p < 0,5, \\ 0, & \text{если } YF_p \geq 0,5. \end{cases}$$

Полученные функции принадлежности, характеризующие наличие переходящих невротических расстройств, на основе рекомендаций МСГНРП объединяются в общую диагностическую модель вида [21]:

$$YPR(j+1) = YPR(j) + \mu_{\text{нпр}}(Y_{j+1})[1 - YPR(j)], \quad (2)$$

где  $YPR(1) = \mu_{\text{нпр}}(Y_1) = \mu_{\text{нпр}}(YOT_p)$ ;  $Y_2 = UA_\phi$ ;  $Y_3 = ER_N$ ;  $Y_4 = YPN$ ;  $Y_5 = YF_p$ ;  $Y_6 = YPP_{\text{пр}}$ .

## Результаты и их обсуждение

Проверка качества принимаемых решений с использованием модели (2) осуществлялась по трехступенчатой схеме.

Первая ступень реализовывалась по традиционной экспертной схеме с использованием метода Дельфы с оценкой меры доверия [20]. Усредненная по восьми экспертам мера доверия к диагностической модели (2) превысила величину 0,97.

При реализации второй ступени эксперты сформировали контрольные выборки, в первую из которых включались пациенты с точно проверенными данными о пациентах, точно не имеющих состояние описываемое как ПНР. Во вторую контрольную группу включались пациенты с наиболее часто встречающимися значениями исследуемых показателей [10] для альтернативного и исследуемого классов и со значениями, которые, по мнению экспертов, равновероятно можно отнести как к альтернативному, так и к исследуемому классу состояний [10]. В третью контрольную группу включались пациенты с точно установленным состоянием ПНР. В ходе математического моделирования, проводимого по этим контрольным выборкам, было показано, что уверенность в правильной классификации для модели (2) составила 0,98.

Третий уровень контроля осуществлялся по репрезентативным контрольным выборкам [10] с использованием независимых методов исследования [22]. Учитывая квадратичную разделяющую модель и выбранное достижимое качество классификации на уровне 0,95, был определен объем выборок по 100 человек на каждый из исследуемых

классов состояний. Качество диагностики проверялось по таким общепринятым показателям, как диагностическая чувствительность (ДЧ), специфичность (ДС) и диагностическая эффективность (ДЭ). В ходе проведенных расчетов получены следующие значения показателей качества: ДЧ = 0,97, ДС = 0,98 и ДЭ = 0,97, что позволяет рекомендовать предложенную модель для использования в работе практических психологов [10].

### Выводы

В ходе проведенных исследований была синтезирована модель оценки уверенности при наличии у пациентов переходящих невротических расстройств, отличающаяся использованием в качестве информативных показателей признаков, принятых в традиционной медицинской практике, уровня адаптации организма в целом, электрического разбаланса биологически активных точек, связанных с невротами, показателя уверенности в прогнозе появления неврозов, количественных характеристик функционального резерва органов и систем мишеней, позволяющая получать уверенность в правильном принятии решения не хуже 0,97.

### Список литературы

1. Twenty years of research on borderline personality disorder: a scientometric analysis of hotspots, bursts, and research trends / Y. Liu, C. Chen, Y. Zhou, N. Zhang, S. Liu // *Front Psychiatry*. 2024. N 15. P. 1361535. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2024.1361535>
2. Ruocco A. C., Marceau E. M. Update on the Neurobiology of Borderline Personality Disorder: A Review of Structural, Resting-State and Task-Based Brain Imaging Studies // *Curr Psychiatry Rep*. 2024. N 26(12). P. 807–815. <https://doi.org/10.1007/s11920-024-01553-w>

3. The Role of Trauma in Early Onset Borderline Personality Disorder: A Biopsychosocial Perspective / P. Bozzatello, P. Rocca, L. Baldassarri, M. Bosia, S. Bellino // *Front Psychiatry*. 2021. N 12. P. 721361. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.721361>

4. Sexual Dysfunctions and Problematic Sexuality in Personality Disorders and Pathological Personality Traits: A Systematic Review / G. Ciocca, R. Di Stefano, A. Collazzoni, T. B. Jannini, G. Di Lorenzo, E. A. Jannini, A. Rossi, R. Rossi // *Curr Psychiatry Rep*. 2023. N 25 (3). P. 93–103. <https://doi.org/10.1007/s11920-023-014099>

5. On the interplay of borderline personality features, childhood trauma severity, attachment types, and social support / A. Schulze, L. Cloos, M. Zdravkovic, S. Lis, A. Krause-Utz // *Borderline Personal Disord Emot Dysregul*. 2022. N 9 (1). P. 35. <https://doi.org/10.1186/s40479-022-00206-9>

6. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки притяни решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с. <https://doi.org/www.tnt-ebook.ru/library/book/441>

7. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска / Т. Н. Говрухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков // *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2019. Т. 18, № 2. С. 110–116. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

8. Бокерия Л. А., Быков А. В., Корневский Н. А. Оптимизация ведения пациентов с мультицентричным ишемическим поражением на базе нечетких интеллектуальных технологий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 400 с.

9. Корневский Н. А., Сафронов Р. И., Серебровский В. И. Системы поддержки принятия решений врачей профпатологов с гибридной нечёткой сетевой базой знаний: монография. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2021. 333 с.

10. Прогнозирование появления и развития ишемической болезни сердца у инженерно-технического персонала на основе нечетких гибридных моделей / Н. А. Корневский, Р. И. Сафронов, С. Н. Родионова, Н. А. Милостная, К. В. Разумова // *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2024. Т. 23, № 4. С. 148–157.

11. Математические модели оценки влияния электромагнитных полей на появление и развитие профессиональных заболеваний в электроэнергетической отрасли / М. А. Мясоедова, Н. А. Корневский, Л. В. Стародубцева, М. В. Писарев // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019. Т. 7, № 2. С. 27–42. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.013>

12. Метод синтеза нечетких моделей и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров,

Т. Н. Говорухина, Р. А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 3. С. 163–169. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.3.019>

13. Корневский Н. А., Медников Д. А., Стародубцев В. В. Метод синтеза моделей прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников локомотивных бригад // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. Т. 19, № 3. С. 140–154. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.018>

14. Корневский Н. А., Титова А. В. Метод синтеза нечетких моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 102–117.

15. Biotechnical monitoring system for determining person's health state in polluted environment using hybrid decisive rules / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, S. Filist, O. V. Shatalova, M. S. Alshamasin, A. A. Shaqadan // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2019. Vol. 32, N 1. P. 10–22. <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2019.101957>

16. Корневский Н. А., Титова А. В., Сурнина А. И. Оценка влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние и работоспособность операторов на основе технологии мягких вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 2. С. 120–137.

17. Белозеров В. А., Корневский Н. А., Коржук Н. Л. Диагностика патологии внепеченочных желчных протоков по данным эндоскопической ультрасонографии с использованием нечетких математических моделей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 149–164. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-149-164>

18. Прогнозирование возникновения и развития фатальных сосудистых осложнений при COVID-19 с использованием нечетких математических моделей / А. В. Быков, Н. А. Корневский, А. В. Винников, А. И. Безуглов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 145–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-145-159>

19. Математическая модель нечеткого прогнозирования рецидивов инфаркта миокарда / С. П. Серегин, Н. А. Корневский, К. А. Истомина, Ю. А. Челебаева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2 (31). С. 101–111.

20. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Корневский, В. В. Аксенов,

С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. № 3. С. 80–96.

21. Метод и нечеткие модели оценки функциональных состояний оперативной памяти / А. Ю. Рыбаков, С. Н. Родионова, К. В. Разумова, Н. А. Милостная, Н. Л. Коржук // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 106–125.

22. Прогнозирование появления и развития невротических расстройств провоцируемых инженерным трудом / Н. А. Корневский, О. Ю. Лукаш, Р. И. Сафронов, С. Н. Родионова, С. П. Серегин, Г. В. Сипливый // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2024. Т. 23, № 3. С. 146–153.

## References

1. Liu Y., Chen C., Zhou Y., Zhang N., Liu S. Twenty years of research on borderline personality disorder: a scientometric analysis of hotspots, bursts, and research trends. *Front Psychiatry*. 2024;(15):1361535. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2024.1361535>

2. Ruocco A.C., Marceau E.M. Update on the Neurobiology of Borderline Personality Disorder: A Review of Structural, Resting-State and Task-Based Brain Imaging Studies. *Curr Psychiatry Rep*. 2024;(26):807–815. <https://doi.org/10.1007/s11920-024-01553-w>

3. Bozzatello P., Rocca P., Baldassarri L., Bosia M., Bellino S. The Role of Trauma in Early Onset Borderline Personality Disorder: A Biopsychosocial Perspective. *Front Psychiatry*. 2021;(12):721361. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2021.721361>

4. Ciocca G., Di Stefano R., Collazzoni A., Jannini T.B., Di Lorenzo G., Jannini E.A., Rossi A., Rossi R. Sexual Dysfunctions and Problematic Sexuality in Personality Disorders and Pathological Personality Traits: A Systematic Review. *Curr Psychiatry Rep*. 2023;(25):93–103. <https://doi.org/10.1007/s11920-023-014099>

5. Schulze A., Cloos L., Zdravkovic M., Lis S., Krause-Utz A. On the interplay of borderline personality features, childhood trauma severity, attachment types, and social support. *Borderline Personal Disord Emot Dysregul*. 2022;(9):35. <https://doi.org/10.1186/s40479-022-00206-9>

6. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. Stary Oskol: TNT; 2019. 472 p. (In Russ.) <https://doi.org/www.tnt-ebook.ru/library/book/441>

7. Govrukhina T.N., Myasoedova M.A., Grigorov I.Y., Polyakov A.V. Mathematical models of forecasting and early diagnosis of diseases of the nervous system caused by the combined effects of heterogeneous risk factors. *Sistemnyi analiz i upravlenie v*

*biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;18(2):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

8. Bokeria L.A., Bykov A.V., Korenevsky N.A. Optimization of management of patients with multicentric ischemic lesion based on fuzzy intellectual technologies. Stary Oskol: TNT; 2019. 400 p. (In Russ.)

9. Korenevsky N.A., Safronov R.I., Serebrovsky V.I. Decision support systems for occupational pathologists with a hybrid fuzzy network knowledge base. Kursk: Izdatel'stvo Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii; 2021. 333 p. (In Russ.)

10. Korenevsky N.A., Safronov R.I., Rodionova S.N., Milostnaya N.A., Razumova K.V. Predicting the appearance and development of coronary heart disease in engineering and technical personnel based on fuzzy hybrid models. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2024;23(4):148–157. (In Russ.)

11. Myasoedova M.A., Korenevsky N.A., Starodubtseva L.V., Pisarev M.V. Mathematical models for assessing the influence of electromagnetic fields on the occurrence and development of occupational diseases in the electric power industry. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization, and Information Technology*. 2019;7(2):27–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.013>

12. Korenevsky N.A., Grigorov I.Yu., Govorukhina T.N., Krupchatnikov R.A. Method of synthesis of fuzzy models and early diagnosis of occupational diseases of electroplating workers. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;18(3):163–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.3.019>

13. Korenevsky N.A., Mednikov D.A., Starodubtsev V.V. Method of synthesis of models for forecasting and early diagnosis of occupational diseases of locomotive crew workers. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2020;19(3):140–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.018>

14. Korenevsky N.A., Titova A.V. Method of synthesis of fuzzy models for assessing the effect of electromagnetic fields of the radio frequency range on the state of health. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(2):102–117. (In Russ.)

15. Al-Kasasbeh R.T., Korenevskiy N., Filist S., Shatalova O.V., Alshamasin M.S., Shaqadan A.A. Biotechnical monitoring system for determining person's health state in polluted environment using hybrid decisive rules. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2019;32(1):10–22. <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2019.101957>

16. Korenevsky N.A., Titova A.V., Surnina A.I. Evaluation of the effect of electromagnetic fields in the radio frequency range on the functional state and the ability of operators based on soft computing technology. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;11(2):120–137. (In Russ.)

17. Belozarov V.A., Korenevsky N.A., Korzhuk N.L. Diagnosis of pathology of extrahepatic bile ducts according to endoscopic ultrasonography using fuzzy mathematical models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(2):149–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-149-164>

18. Bykov A.V., Korenevsky N.A., Vinnikov A.V., Bezuglov A.I. Forecasting the occurrence and development of fatal vascular complications in COVID-19 using fuzzy mathematical models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(1):14–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-145-159>

19. Seregin S.P., Korenevsky N.A., Istomina K.A., Chelebaeva Y.A. Mathematical model of fuzzy prediction of myocardial infarction recurrence. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019;9(2):101–111. (In Russ.)

20. Korenevsky N.A., Aksyonov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safronov R.I. A method of complex assessment of the level of informativeness of classification features in conditions of a fuzzy data structure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;(3):80–96. (In Russ.)

21. Rybakov A.Y., Rodionova S.N., Razumova K.V., Milostnaya N.A., Korzhuk N.L. Method and fuzzy models for assessing the functional states of RAM. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(2):106–125. (In Russ.)

22. Korenevsky N.A., Lukash O.Y., Safronov R.I., Rodionova S.N., Seregin S.P., Siplivy G.V. Forecasting the appearance and development of neurotic disorders caused by engineering work. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2024;23(3):146–153. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Сафронов Руслан Игоревич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики, Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

**Ruslan I. Safronov**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electric Power Engineering, Kursk Agricultural University named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

**Кныш Ольга Анатольевна**, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ol.knish@yandex.ru

**Olga A. Knysh**, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ol.knish@yandex.ru

**Родионова Софья Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru

**Sofya N. Rodionova**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru

**Стародубцева Лилия Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lilja-74@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-6803-298X

**Lilia V. Starodubtseva**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lilja-74@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-6803-298X

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-170-179>

UDC 004.82

## Analyzing pandemic dynamics through traveling waves: a mathematical model

Taha A. Tariq<sup>1</sup> ✉, Igor S. Konstantinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State National Research University  
85 Pobeda Str., Belgorod 308015, Russian Federation

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov  
46 Kostyukova Str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: [huthaifa.mohammed@uomosul.edu.iq](mailto:huthaifa.mohammed@uomosul.edu.iq)

### Abstract

**Purpose of research.** Pandemic of 2019 has greatly altered human life and affected economies worldwide by increasing death rates. The relevance is understanding and controlling the spread of infections is vital to minimizing its effects. The purpose of the research investigation is to plug spatial dependence into the traditional SIR model to extend its usefulness in modeling the propagation process of the virus.

**Methods.** The methodology is to develop of a mathematical model to represent the pandemic spread as a traveling wave phenomenon. Analysis of the wave speed of the model is made as appropriate as well as the several numerical methods it applied in obtaining solutions. The new variable to the infected population equation is used along with variable transformation techniques and linearization in deriving analytical solutions and then computing and analyzing the wave speed associated with infection spread.

**Results** confirmed the previous outcomes generated by time-dependent models' analysis that the prime determinant of disease dissemination is the infection-to-recovery rate. It is shown that either transmission coefficient decreases or the recovery rate increases slows down the spread of the disease.

**Conclusion.** As a conclusion, the best possible way to curb its exposure is by minimizing interpersonal interaction (reduction of beta) or by expediting patient recovery and segregation (increase in alpha). It reduces the wave speed parameter  $q$ , which controls the rate of propagation of the disease.

**Keywords:** pandemic dynamics; traveling waves; mathematical modeling; SIR model; spatial dependence; wave speed; epidemic control strategies.

**Funding:** This work was realized in the framework of the Program "Priority 2030" on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

This work was realized in the framework of the project FZWN-2025-0002 on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

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

**For citation:** Tariq Taha A., Konstantinov I.S. Analyzing pandemic dynamics through traveling waves: a mathematical model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(1):170–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-170-179>

Received 28.01.2025

Accepted 25.02.2025

Published 31.03.2025

© Tariq Taha A., Konstantinov I. S., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(1):170–179

## Анализ динамики пандемий через волны передвижения: математическая модель

Таха А. Тарик<sup>1</sup> ✉, Игорь С. Константинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белгородский национальный исследовательский университет  
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова  
ул. Костюкова, д. 85, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: huthaifa.mohammed@uomosul.edu.iq

### Резюме

**Цель исследования.** Пандемия 2019 года значительно изменила жизнь людей и оказала влияние на мировую экономику, увеличив уровень смертности. Актуальность исследования заключается в том, что понимание и контроль за распространением инфекций имеют решающее значение для минимизации их последствий. Цель данного исследования — включить пространственную зависимость в традиционную модель SIR, чтобы расширить её применимость для моделирования процесса распространения вируса.

**Методы.** Методология исследования основана на разработке математической модели, описывающей распространение пандемии как явление бегущей волны. В работе проводится анализ скорости волны в модели, а также используются различные численные методы для получения решений. Новый переменный член добавляется в уравнение для инфицированного населения, и с помощью методов преобразования переменных и линеаризации выводятся аналитические решения. После этого вычисляется и анализируется скорость волны, связанная с распространением инфекции.

**Результаты** подтвердили предыдущие выводы, полученные из анализа временных моделей, что основным фактором, определяющим распространение болезни, является отношение скорости инфицирования к скорости выздоровления. Показано, что снижение коэффициента передачи или увеличение скорости выздоровления замедляет распространение заболевания.

**Заключение.** Наилучшим способом сдерживания распространения вируса является минимизация межличностных контактов или ускорение выздоровления и изоляции пациентов. Это приводит к снижению параметра скорости волны  $q$ , который управляет скоростью распространения болезни.

**Ключевые слова:** динамика пандемии; бегущие волны; математическое моделирование; модель SIR; пространственная зависимость; скорость волны; стратегии контроля эпидемий.

**Финансирование:** Данная работа была выполнена в рамках программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. Работа была выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ имени В. Г. Шухова.

Данная работа была выполнена в рамках проекта FZWN-2025-0002 на базе Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. Работа была выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ имени В. Г. Шухова.

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

**Для цитирования:** Таха А. Тарик, Константинов И. С. Анализ динамики пандемий через волны передвижения: математическая модель // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 170–179. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-170-179>

Поступила в редакцию 28.01.2025

Подписана в печать 25.02.2025

Опубликована 31.03.2025

## Introduction

The waves in the context of the pandemic are one of a wave of illness spreading and moving through a population. Mathematically, a wave is something that propagates with a constant shape and moves with a constant speed. The solution of this form is called a travelling wave solution. This traveling wave solution appears in our models by adding spatial dependence. In other words, we want to allow people to move around within our model and our epidemic scenario. In the SIR model, we only have time dependence for our three S, I and R variables, we can see this because we had only a time derivative. So, when we look at how those populations changed over time. We want to allow populations to also change in space because people might be moving around. What we're doing is creating a slightly more realistic model.

Pandemics have been defining moments throughout history, shaping human civilization and leaving indelible marks on societies, economies, and healthcare systems [1]. These global outbreaks of infectious diseases transcend borders and impact populations on a massive scale [2]. The dynamics of pandemics are complex, influenced by factors such as the virulence of the pathogen, speed of transmission, population density, healthcare infrastructure, and societal behaviors. Infectious diseases can spread rapidly through populations, fueled by global travel, urbanization, and interconnectedness [3].

Mathematical models have been widely used to study epidemics, including

seminal works such as the SIR model introduced by Kermack and McKendrick. These models consider key concepts such as susceptibility, infectivity, and recovery rates to understand disease transmission dynamics [4]. They have been applied to real-world scenarios to make predictions and inform public health interventions. For example, mathematical modelling has been used to control the spread of diseases, manage resources, and make decisions in sports [5]. Deterministic and stochastic models have been employed, with computer simulation models being used for more complex scenarios [6]. Mathematical modelling systems aim to assess the effectiveness of epidemic control measures, analyze risks, and estimate economic damage [7].

Spatial dependence and traveling wave solutions have been explored in several studies to extend classical epidemic models and understand the spatial spread of diseases within populations. These studies have investigated the theoretical foundations of travelling wave models and their relevance in capturing the dynamics of epidemics. For instance, [8] investigated a nonlocal dispersal epidemic model with multiple nonlocal distributed delays and nonlinear incidence effects, defining the minimal wave speed and basic reproduction number to determine the existence of travelling wave solutions. Similarly, [9] used the method of travelling wave solution to transform partial differential equations into ordinary differential equations and derived solutions for infectious wave velocity and hypergeometric function in a spatial SIR model.

Mathematical models, including those incorporating travelling waves, have been utilized in public health research and policy-making. These models have been applied to inform interventions, vaccination strategies, and pandemic preparedness. For example, [10] discuss the frameworks and perspectives adopted for modelling infectious diseases using mathematical modelling. They highlight the methodology, tactics, and interconnections of these approaches. Review epidemiological network models, which have been used to explain COVID-19 and provide a sufficiently accurate approximation for policymakers to determine actions needed to curb the challenges and limitations associated with the mathematical modelling of epidemics including uncertainties in parameter estimation, simplifying assumptions, and the need for real-time data for accurate predictions. Future directions for research and development in the field of pandemic dynamics and mathematical modelling include exploring emerging technologies, interdisciplinary approaches, and novel methodologies to enhance our understanding of disease spread and inform public health responses [11]. Numerous lectures, hosted by the Oxford University Department for Continuing Education, have explored the dynamics of the SIR model, which researchers have utilized in this paper [12].

### Materials and methods

Our starting point would be the same SIR model. We had three different equations, or we had three compartments of our population. We have  $S$  for susceptible, those who still catch the disease. We had  $I$  for infectives who are currently having the

disease and spreading it through the populations, and  $R$  for the recovered category which are those who have caught the disease and either died or recovered and are now immune [13; 14; 15]. The model gave us three differential equations for each of the three population's parts:

$$\frac{dS}{dt} = -rSI, \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = rSI - aI, \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = aI. \quad (3)$$

Since we are introducing spatial dependence to our original SIR model, we need additional assumptions that explain how people interact with the space around them [16; 17]. Our first assumption is that these susceptible populations are not going to move, that is mean in the context of the current COVID-19 outbreak we can think of this assumption as saying that people susceptible to the disease stay at home [16]. The second assumption is going to be the movement of the infective migrate at a constant rate [18]. The third assumption is once people are in the removed population, they again don't move [19]. In summary, spatial dependence is focused on the infectives because the susceptible stay at home and don't move, and the removed population also doesn't move, we are interested in how the disease can infect others, who are going to migrate and spread the disease through the population. What this means for our equation is that we have an additional term in the second equation  $\frac{dI}{dt}$  from the original SIR model. So, we add in term  $D$  which is the constant rate of diffusion, and then the

way to model the diffusion mathematically is with a derivative, so we have a second derivative. So, equation (2) becomes

$$\frac{dI}{dt} = rSI - aI + D \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Because our population depends on both time and space, this is why we have partial derivatives. All derivatives have to be converted into curly letter  $\partial$ :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -rSI, \quad (5)$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = rSI - aI + D \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = aI. \quad (7)$$

This is what signifies that it's a partial derivative of functions of our variables  $S$ ,  $I$  and  $R$ , which are now depending on both time and space. To begin analyzing the equation, we have to do something called nondimensionalization to take all of the constants that are in our equations and combine them in such a way that we get one key parameter. And when we do this, we actually see that the parameter that appears is reproductive number  $R_o$ . The basic reproductive number gives the number of secondary infections that expect to happen in average in the population from a single primary infection. In other words, is the number of people that we expect one infected individual to pass the disease onto, and we define this mathematically as  $R_o = S_o q$ ,  $q = r/a$ , where  $q$  is the fraction of the population that comes into contact with an infected individual during their period of infectiousness. As well as nondimensionalizing

we can use a second mathematical trick which is to change variables. At the moment we have  $S$ ,  $I$ , and  $R$  which all depend on time  $t$  and space  $x$ . What we would be going to do is to create a new variable called  $y$ , then we would convert these equations (5), (6) and (7) into differential equations just involving this one new variable which is given by

$$y = x - ct \quad (8)$$

Where  $c$  is  $t$  is a constant.

This change would really simplify our set of equations:

$$0 = c \frac{dS}{dy} - IS, \quad (9)$$

$$0 = \frac{d^2 I}{dy^2} + c \frac{dI}{dy} + I \left( S - \frac{1}{R_o} \right) \quad (10)$$

Equations have changed quite dramatically, so we no longer have derivatives in terms of  $x$  and  $t$  with partial derivatives. We have gone back to full derivatives in terms of single variable  $y$ . As we need now to solve differential equations, we need some boundary or initial conditions. What  $I$  would do here is go backwards in time to before the start of the epidemic. So, we let time in equation (8) go to  $(-\infty)$  which means going back into the past, then  $y$  in the same equation is going to go to plus infinity because of the minus sign between  $x$ ,  $t$ .

The number of infections must go to zero because this is before the disease ever existed in the population. Also, the susceptible must go to its initial value where it is, but we've done a nondimensionalization, what we have actually done is convert our  $I$  and  $S$  from being full population numbers

into being population ratios or a proportion of specific given population, so that  $S$  to go back to initial susptables population  $S_o$  in the nondimensional model, that's mean  $S$  must be go to 1:

$$\begin{aligned} \text{As } t \rightarrow -\infty \text{ (Past) then } y \rightarrow \\ +\infty \text{ then } I \rightarrow 0, S \rightarrow 1. \end{aligned} \quad (11)$$

We can also think about what we expect to happen in the future. So, the future here is when we let time  $t$  go to infinity and that would make  $y$  go to minus infinity, so if  $y$  goes to  $(+\infty)$ , then the outbreak must have passed so really far down in the future the disease has come in its spread through the population and now  $I$ 's disappears once again, so infectives must go to zero.

$$\begin{aligned} \text{As } t \rightarrow +\infty \text{ (Future) then } y \rightarrow \\ -\infty \text{ then } I \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (12)$$

We don't know the value of  $S$  in the future yet.

The first question that we might want the answer is going to be how fast the disease is going to spread through the population. Because we are now picturing the disease as a wave propagating through the population and spreading the illness. We can calculate the speed of the spread of the disease in our outbreak. The question would be what is the wave speed? To answer the question, we would use a mathematical tool called linearization, in which we would use the value of  $S$  in the past as an approximation, so that  $S = 1 - P$ , where  $P$  is a small value (an approximation), and then because we are linearizing  $S = 1 - P$  is telling us that we want to substitute it in our equations (9) and (10) and ignore any term which are  $P$  squared and higher, this will result a set of equations below:

$$0 = -c \frac{dP}{dy} - I, \quad (13)$$

$$0 = \frac{d^2I}{dy^2} + c \frac{dI}{dy} + I \left(1 - \frac{1}{R_o}\right). \quad (14)$$

These equations (13) and (14) might not look necessarily any simpler. It is now in a form that allows us to use another mathematical tool called Phase plane analysis. Applying phase plane analysis to equations (13) and (14) tells us that traveling wave solutions exist, then we must have

$$c \leq 2 \sqrt{\left(1 - \frac{1}{R_o}\right)}. \quad (15)$$

This expression is the minimum possible wave speed for there to be a travelling wave solution to exist.

The minimum required wave speed for traveling wave solutions to exist, but typically the wave speed itself is given by

$$c = 2 \sqrt{\left(1 - \frac{1}{R_o}\right)}. \quad (16)$$

So, the value of  $C$  in our change of variable formula (8) is actually the speed of the travelling wave, and therefore is the speed of the spread of the disease as it is propagated through our population.

In any epidemic, in particular for the current COVID-19, we want to make the speed ( $C$ ) of the disease spread as small as possible, we want to slow down the propagation of the disease, and looking to the formula (16) we can make  $C$  small by making  $R_o$  also small. If  $C$  goes negative which would happen if  $R_o$  was small enough. This actually can't happen in the case of an epidemic which is what we are considering here, because in our first basic SIR, an epidemic will occur when  $R_o$  is greater than 1.

So, the absolute smaller value that  $R_o$  can be is one and when substituting  $R_o = 1$  in equation (16) would give  $C_o$ . So, we should keep  $R_o$  as low as possible to lower the speed of the spread of the disease. The minimum value we can get it down to is just above one, to do that, we look at the formula  $R_o = S_o q$  and see that the only thing we can control here is the contact ratio  $q$  since the number of susceptibles is fixed. To lower the contact ratio  $q$  we need to wash our hands all the time and stay at home as much as possible and if we have to go outside, we have to minimize the number of contacts through social distancing.

Another question we might want to answer is what the severity of the epidemic is, or what is the value of  $S_{end}$  which is in our boundary conditions in equation (9)  $IS = c \frac{dS}{dy}$  and substitute it in equation (10). We would have all the terms have  $y$  derivatives, so we can integrate the whole equation resulting expression contain just  $I$  and  $S$ :

$$\frac{dI}{dy} + CI + C \left( S - \frac{1}{R_o} \ln S \right) = \text{constant.} \quad (17)$$

To calculate the value of constant we have to use our initial boundary conditions in (11).

The number of susceptibles left at the end of the outbreak, therefore knowing the severity of the epidemic we need to let time go to infinity and therefore go to the future (12), this yield

$$S_{end} - \frac{1}{R_o} \ln(S_{end}) = 1. \quad (18)$$

### Results and their discussion

As we have seen earlier, the best way to deal with equation (18) equation is to plot a graph. At first, we have to think about the range of values the  $S_{end}$  and  $R_o$  can take.  $S_o$ , because we were considering this non-dimensionalized model, this means that  $S$  is a proportion of the initial susceptible population, and so it can only vary between zero and one. Whereas  $R_o$  according to equation (16) depicts traveling wave speed that  $R_o$  should be greater than one for the epidemic to occur in the first place, and as we are modeling the spread of the epidemic, this means that  $R_o$  is also must be bounded by one.

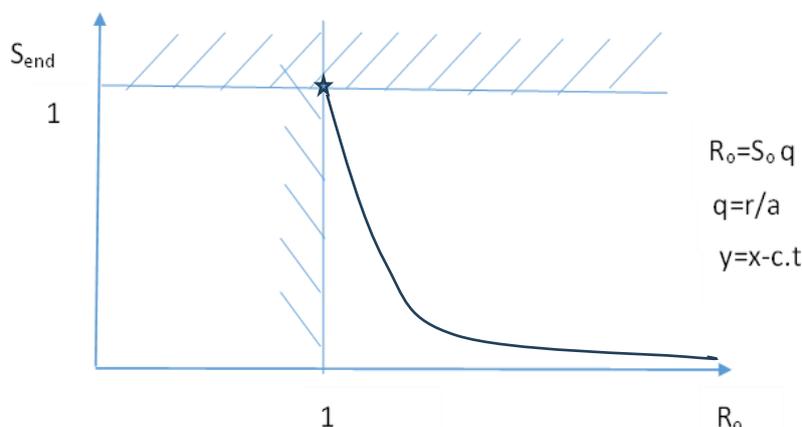


Fig. 1. Relation between  $S_{end}$  and  $R_o$

When plotting the graph for equation (18), what we see is a curve rapidly decreasing, so the maximum value when  $(S_{end}, R_o)$  equals  $(1,1)$ . When  $S_{end}$  equals, one means that nobody caught the disease, we can also notice that the values of  $S_{end}$  are going to decrease as  $R_o$  goes bigger.

So, to go back to our question, what is the severity of the epidemic, the total number of people who catch the disease would be lower if the number of people unaffected or the number of susceptibles left at the end is as large as possible. So, we want to make  $S_{end}$  as big as possible by varying  $R_o$ , which means  $R_o$  would be close to one as much as possible which can be done by reducing the contact ratio  $q$ .

## Conclusions

Using the traveling wave model for the spread of the disease, we've been able to derive an equation for the wave speed  $C$  in equation 16, which is the speed at which the disease would spread through the population. Also, we have been able to get an expression in equation (18) which determines the number of susceptible people left at the end of the outbreak. To minimize the severity and the impact of an outbreak such as COVID-19, we need to lower the wave speed as much as possible to make the disease spread as slowly as possible to give us more time to come up with measures to

come up with solutions to combat it such as vaccines. To do this, we have to make  $R_o$  as small as we can where the lower bound for  $R_o$  is 1, to take  $R_o$  to one we have to remember the formula  $R_o = q$ . So, to make  $R_o$  small we need to minimize  $q$  to reduce the speed of the spread of disease. And for the second question about the severity of the epidemic equation (18) for the susceptible at the end, we want to make  $s_{end}$  as large as possible, because the number of the susceptible that remain after the outbreak tells us the number of people who have been unaffected by the disease so they haven't caught the disease, this can be done according to the figure 1 by reducing  $R_o$  approaches to one.

All the answers keep banging the same drum telling us we've got to lower contact ratio ( $q$ ). But the fact that it keeps coming up in all of these models is good news because it gives us one specific parameter that we want to make as small as possible, and this is the power of mathematical modeling, because even in this work when we introduced the spatial dependence into the SIR model, we got different solutions, they now look like traveling waves. But all of the things we want to happen (a slower spread of the disease, fewer people getting the disease) have the same thing in common, they are all reduced by making the contact ratio as small as possible.

## References

1. Sadaf Nazneen, Akebe Luther King Abia, Sughosh Madhav. Emerging Pandemics Connections with Environment and Climate Change. CRC Press; 2023. 180 p. <https://doi.org/10.1201/9781003288732>

2. Schulz S., Pastor R., Koyuncuoglu C., Crawford F., Zernick D., Karch A., Rüdiger S. Real-time dissection and forecast of infection dynamics during a pandemic. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2023.03.02.23286502v1> (accessed 11.12.2024).
3. Frutos R. Emergence and dynamics of COVID-19 and future pandemics. *Omics Approaches and Technologies in COVID-19*. Academic Press; 2023. P. 245–254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91794-0.00025-1>
4. Abiodun O., Olukayode A., Ndako J. Mathematical modeling and its methodological approach: application to infectious disease. In: *2023 International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB-SDG)*. Omu-Aran, Nigeria: IEEE; 2023. <https://doi.org/10.1109/SEB-SDG57117.2023.10124470>
5. Bogdanov A.I., Mongush B.S., Kuzmin V.A., Orekhov D.A., Nikitin G.S., Baryshev A.N., Gulyukin E.A. Model analysis of the mathematical theory of epidemics and recommendations on the use of deterministic and stochastic models. *Regulyatornoe i pravovoe regulirovanie v veterinarii = Regulatory and Legal Regulation in Veterinary Medicine*. 2023;(4):37–42. (In Russ.)
6. Piqueira J.R.C. Epidemic models on networks. *Frontiers in Physics*. 2023;(10):1122070. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1122070>
7. Cifuentes-Faura J., Faura-Martínez U., Lafuente-Lechuga M. Mathematical modeling and the use of network models as epidemiological tools. *Mathematics*. 2022;10(18):3347.
8. Md. Nur Alam. An analytical technique to obtain traveling wave solutions to nonlinear models of fractional order. *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*. 2023;8(3):100533. <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2023.100533>
9. Wu W., Zhang W. Traveling wave solutions in a nonlocal dispersal SIR epidemic model with nonlocal time-delay and general nonlinear incidences. *International Journal of Biomathematics*. 2023;17(5):2350045. <https://doi.org/10.1142/S1793524523500444>
10. Abiodun O., Olukayode A., Ndako J. Mathematical modeling and its methodological approach: application to infectious disease. In: *2023 International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB-SDG)*. Omu-Aran, Nigeria; 2023. P. 1–14.
11. Jianwu Xiong, Yin Zhang, Jianwu Xiong, Ning Mao. Epidemic model of COVID-19 with public health interventions consideration: a review. Authorea. Available at: <https://www.authorea.com/users/623464/articles/646186-epidemic-model-of-covid-19-with-public-health-interventions-consideration-a-review> (accessed 11.12.2024). <https://doi.org/10.22541/au.168539048.84429551/v1>
12. Tom Crawford. Oxford University Department for Continuing Education. Available at: <https://www.conted.ox.ac.uk/profiles/tom-crawford> (accessed 11.12.2024).
13. Kermack W.O., McKendrick A.G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1927;115(772):700–721.

14. Hayder Al-Saedi, Hameed Husam Hameed. Mathematical modeling for COVID-19 pandemic in Iraq. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*. 2021;(24):1407–27
15. Konstantinov I.S., Asraa Tariq Taha Taha. Mathematical analysis of sir model with incubation period. *Nauchnyi rezul'tat. Informatsionnye tekhnologii = Research Result Information Technologies*. 2024;9(3):1. (In Russ.) <https://doi.org/10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-1>
16. Takács B., Horváth R., Horváth R., Faragó I., Faragó I. Space dependent models for studying the spread of some diseases. *Computers & Mathematics with Applications*. 2020;80(2):395–404. <https://doi.org/10.1016/J.CAMWA.2019.07.001>
17. Why Democracies Develop and Decline. Cambridge, England: Cambridge University Press; 2022. P. 265–267. <https://doi.org/10.1017/9781009086974.010>
18. Tripathi A., Naresh R., Sharma D., Tchuenche M. Modeling the Spread of HIV/AIDS with Infective Immigrants and Time Delay. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/259739706\\_Modeling\\_the\\_spread\\_of\\_HIVAIDS\\_with\\_infective\\_immigrants\\_and\\_time\\_delay](https://www.researchgate.net/publication/259739706_Modeling_the_spread_of_HIVAIDS_with_infective_immigrants_and_time_delay) (accessed 11.12.2024).
19. Kleit R.G. False Assumptions About Poverty Dispersal Policies. *A Journal of Policy Development and Research*. 2013;15(2):205–209.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Taha A. T. T.**, Post-Graduate Student of the Department of Mathematical and Software of Information Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [huthaifa.mohammed@uomosul.edu.iq](mailto:huthaifa.mohammed@uomosul.edu.iq)

**Таха Асраа Тарик Таха**, аспирант кафедры математического и программного обеспечения информационных систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [huthaifa.mohammed@uomosul.edu.iq](mailto:huthaifa.mohammed@uomosul.edu.iq)

**Igor Sergeevich Konstantinov**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Institute of Information Technologies and Control Systems, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [1591248@bsu.edu.ru](mailto:1591248@bsu.edu.ru)

**Игорь С. Константинов**, доктор технических наук, профессор института информационных технологий и управляющих систем, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [1591248@bsu.edu.ru](mailto:1591248@bsu.edu.ru)

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

– лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200–250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы ( $\Omega$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\omega$ ,  $\nu$  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/>.