

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 14 № 3 / 2024

Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 14 № 3 / 2024



**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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

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

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2024



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г. Курск,
ул. 50 лет Октября, 94

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.
Подписной индекс журнала 44288
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. А. Леоновой

Подписано в печать 30.09.2024. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 08.11.2024

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,7.

Тираж 1000 экз. Заказ 48.

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, 2024



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

Signed for printing 30.09.2024. Format 60×84/8.

Release date 08.11.2024.

Offset paper. Printer's sheets: 27,7.

Circulation 1000 copies. Order 48.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
Автономный искусственный интеллект для сортировки результатов профилактических лучевых исследований на примере маммографии	8
<i>Васильев Ю. А., Арзамасов К. М., Владимирский А. В., Колсанов А. В., Шулькин И. М., Бобровская Т. М., Пестренин Л. Д.</i>	
Метод и алгоритм интеллектуальной обработки текстовой информации.....	22
<i>Ефанов С. В., Иванова Е. Н., Чернецкая И. Е.</i>	
Application of mathematical models in predicting drug dosage and its efficacy.....	36
<i>Mohamed Chahine, Nikolaos Tzenios, Zavidovskaya K. V., Lazurina L. P., Dotsenko Y. M.</i>	
Информационно-вычислительная система на основе смарт-контрактов для проведения онлайн-голосований	48
<i>Герасев А. А., Ефремова И. Н., Архипова И. С., Камалов Р. Н.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	63
Метод определения влияния дестабилизирующих факторов цифровых фильтров на многокритериальный синтез средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств	63
<i>Бабанин И. Г., Бабанина Е. Ю., Михайлова О. Ю., Хмелевская А. В.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	88
Исследование влияния линейных и угловых девиаций БЛА на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности, получаемых в режиме прямолинейного горизонтального полёта	88
<i>Андронов В. Г., Чувев А. А.</i>	
Анализ эффективности применения архитектуры U-net для классификации и сегментации глиомы на МРТ-снимках.....	104
<i>Киселев А. В., Кулешова Е. А., Таныгин М. О., Дерябин Д. Р., Халин И. А.</i>	
Мультимодальный классификатор медицинского риска на основе многоэлектродного биоимпедансного преобразователя	121
<i>Серебровский А. В., Корсунский Н. А., Лях А. В., Мишустин В. Н., Шаталова О. В., Шульга Л. В.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	144
Методы навигации по данным аэроландшафта для малых БЛА.....	144
<i>Мирошниченко А. П., Мухин И. Е.</i>	
Научно-технические пути уменьшения количественных показателей ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли).....	157
<i>Мухин И. Е., Попов А. Н. Хмелевская А. В.</i>	
Оценка достоверности социологических исследований, проводимых в сети Интернет	170
<i>Нестерович С. А., Брежнева А. Н.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	183
Разработка системы сбора, оценки и анализа физиологического состояния и факторов, влияющих на утомляемость военнослужащих	183
<i>Ларина Е. А., Трехлебов А. С., Андронов В. Г.</i>	
Планирование и многоаспектный анализ качества протезирования зубов	206
<i>Маслак А. А., Арутюнов А. С., Грачев Д. И., Муслов С. А.</i>	
Концептуальная модель и реализация объектно ориентированной системы с помощью метапрограммирования	223
<i>Чаплыгин А. А.</i>	
К сведению авторов.....	238

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
Autonomous artificial intelligence for sorting the results of preventive radiological studies on the example of mammography.....	8
<i>Vasilev Y. A., Arzamasov K. M., Vladzimirskyy A. V., Kolsanov A. V., Shulkin I. M., Bobrovskaya T. M., Pestrenin L. D.</i>	
Algorithm for intelligent processing of text information.....	22
<i>Efanov S. V., Ivanova E. N., Chernetskaya I. E.</i>	
Применение математических моделей для прогнозирования дозировки лекарств и их эффективности.....	36
<i>Шехине Мохамед Туфик, Тзениос Николаос, Завидовская К. В., Лазурина Л. П., Доценко Ю. М.</i>	
Information and computing system based on smart contracts for online voting	48
<i>Gerasyov A. A., Efremova I. N., Arhipova I. S., Kamalov R. N.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	63
Method for determining the effect of destabilizing factors of digital filters on the multicriteria synthesis of radio communications of aviation robotic devices	63
<i>Babanin I. G., Babanina E. Yu., Mikhailova O. Yu., Khmelevskaya A. V.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	88
Investigation of the influence of linear and angular deviations of UAVS on the change in parallaxes of images of the underlying surface obtained in the mode of rectilinear horizontal flight	88
<i>Andronov V. G., Chuev A. A.</i>	
Analysis of the effectiveness of using U-net architecture for classification and segmentation of glioma in MRI images.....	104
<i>Kiselev A. V., Kuleshova E. A., Tanygin M. O., Deryabin D. R., Khalin I. A.</i>	
Multimodal classifier of medical risk based on a multielectrode bioimpedance converter	121
<i>Serebrovsky A. V., Korsunskii N. A., Lyakh A. V., Mishustin V. N., Shatalova O. V., Shulga L. V.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	144
Navigation methods using airlandscape data for small UAVs	144
<i>Miroshnichenko A. P., Mukhin I. E.</i>	
Scientific and technical ways of reducing quantitative indicators of false alarms during the operation of an airboard radar station on the background of the underlying surface (earth).....	157
<i>Mukhin I. E., Popov A. N., Khmelevskaya A. V.</i>	
Assessment of the reliability of sociological research on the Internet	170
<i>Nesterovich S. A., Brezhneva A. N.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	183
The development of physical state and exhaustion factors monitoring system with capability of collecting, estimating and analysing data for military personnel.....	183
<i>Larina E. A., Trekhlebov A. S., Andronov V. G.</i>	
Design and multidimensional analysis of dental orthopedic prosthetics quality	206
<i>Maslak A. A., Arutyunov A. S., Grachev D. I., Muslov S. A.</i>	
Concept model and realization of object oriented system with metaprogramming	223
<i>Chaplygin A. A.</i>	
Information for Authors	238

Автономный искусственный интеллект для сортировки результатов профилактических лучевых исследований на примере маммографии

Ю. А. Васильев¹, К. М. Арзамасов¹, А. В. Владзимирский¹, А. В. Колсанов²,
И. М. Шулькин¹, Т. М. Бобровская¹ ✉, Л. Д. Пестренин¹

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий
Департамента здравоохранения города Москвы
ул. Петровка, д. 24, г. Москва 127051, Российская Федерация

² Самарский государственный медицинский университет
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара 443099, Российская Федерация

✉ e-mail: BobrovskayaTM@zdrav.mos.ru

Резюме

Цель исследования. Лучевая диагностика занимает центральное место в выявлении злокачественных новообразований. В последнее время реализация скрининговых программ сталкивается с рядом препятствий, включая кадровый дефицит и ограниченное финансирование. Внедрение систем на базе искусственного интеллекта (ИИ), способных к абсолютно точной сортировке исследований по двум категориям – «норма» и «не норма», представляется перспективным решением указанных проблем. Однако, прежде чем их широко применять, критически важно удостовериться в их способности гарантировать безопасность и высокое качество процесса скрининга. Цель исследования – оценить возможность применения автономной сортировки результатов маммографических исследований в реальных клинических условиях.

Методы. Исследование выполнено в 2 этапа. На первом ретроспективно проанализировано 25 892 маммографических исследования, обработанных ИИ-сервисом. Проведен ROC-анализ этих результатов с целью оценки возможности его настройки ИИ-сервиса на чувствительность 100%. На проспективном этапе анализировались результаты 82 372 маммографий. Все исследования были обработаны ИИ-сервисами, настроенными на чувствительность 100%. В задачи ИИ-сервисов входила сортировка результатов маммографии на категории «норма» и «не норма». Далее было выполнено сопоставление решений ИИ-сервисов и врачей-рентгенологов о категорировании.

Результаты. По результатам ретроспективного исследования при настройке ИИ-сервиса на 100% чувствительность специфичность составила 39%. В ходе проспективного исследования удельный вес дефектов (ложных отнесений результатов исследований к категории «норма») составил 0,08 %, удельный вес клинически значимых дефектов ИИ-сервисов – 0,02%, что существенно ниже, чем у врача-рентгенолога.

© Васильев Ю. А., Арзамасов К. М., Владзимирский А. В., Колсанов А. В., Шулькин И. М.,
Бобровская Т. М., Пестренин Л. Д., 2024

Заключение. Применение автономной сортировки результатов маммографических исследований в клинической практике возможно с целью оптимизации диагностического процесса при проведении профилактических мероприятий, а также при условии мониторинга качества работы технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект; маммография; профилактические обследования; лучевая диагностика.

Финансирование: Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках научно-исследовательской работы «Научные методологии устойчивого развития технологий искусственного интеллекта в медицинской диагностике» (№ ЕГИСУ: 123031500004-5) в соответствии с Приказом от 21.12.2022 г. № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов» Департамента здравоохранения города Москвы.

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

Для цитирования: Автономный искусственный интеллект для сортировки результатов профилактических лучевых исследований на примере маммографии / Ю. А. Васильев, К. М. Арзамасов, А. В. Владимирский, А. В. Колсанов, И. М. Шулькин, Т. М. Бобровская, Л. Д. Пестренин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 8–21. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-8-21>

Поступила в редакцию 07.07.2024

Подписана в печать 04.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Autonomous artificial intelligence for sorting the results of preventive radiological studies on the example of mammography

Yuriy A. Vasilev¹, Kirill M. Arzamasov¹, Anton V. Vladzimirskyy¹,
Alexander V. Kolsanov², Igor M. Shulkin¹,
Tatiana M. Bobrovskaya¹ ✉, Lev D. Pestrenin¹

¹ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies
of the Moscow Health Care Department
24 Petrovka Str., Moscow 127051, Russian Federation

² Samara State Medical University of the Ministry
of Health of the Russian Federation
89 Chapayevskaya Str., Samara 443099, Russian Federation

✉ e-mail: BobrovskayaTM@zdrav.mos.ru

Abstract

The purpose of research. Radiation diagnostics is central to the detection of malignant neoplasms. Recently, the implementation of screening programs has faced a number of obstacles, including staff shortages and limited funding. The introduction of artificial intelligence (AI)-based systems capable of absolutely accurate sorting of research into two categories - "normal" and "not normal", seems to be a promising solution to these problems. However, before they are widely used, it is critically important to verify their ability to guarantee the safety and high quality of the screening process. The aim of the study is to evaluate the possibility of using autonomous sorting of mammographic examination results in real clinical conditions.

Methods. The study was carried out in 2 stages. At the first stage, 25,892 mammographic studies processed by the AI service were retrospectively analyzed. A ROC analysis of these results was carried out in order to assess the possibility of configuring the AI service for 100% sensitivity. At the prospective stage, the results of 82,372 mammograms were analyzed. All studies were processed by AI services configured for 100% sensitivity. The tasks of the AI services included the sorting of mammography results into the categories "normal" and "not normal". Next, the decisions of AI services and radiologists on categorization were compared.

Results. According to the results of a retrospective study, when configuring the AI service for 100% sensitivity, the specificity was 39%. In the course of a prospective study, the proportion of defects (false attribution of research results to the "norm" category) was 0.08%, the specific weight of clinically significant defects in AI services was 0.02%, which is significantly lower than that of a radiologist.

Conclusion. The use of autonomous sorting of mammographic research results in clinical practice is possible in order to optimize the diagnostic process during preventive measures, as well as under the condition of monitoring the quality of artificial intelligence technologies. Keywords: artificial intelligence, mammography, preventive examinations, radiation diagnostics. Conflict of interest: The author declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Keywords: artificial intelligence; mammography; preventive examinations; radiation diagnostics.

Funding: This article was prepared by the author's team within the framework of the research work "Scientific methodologies for the sustainable development of artificial intelligence technologies in medical diagnostics" (EGISU No.: 123031500004-5) in accordance with the Order dated 12/21/2022. No. 1196 "On approval of state assignments, the financial support of which is carried out at the expense of the budget of the city of Moscow to state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Department of Health of the City of Moscow for 2023 and the planned period 2024 and 2025" of the Department of Health of the City of Moscow.

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

For citation: Vasiliev Yu.A., Arzamasov K.M., Vladzimirsky A.V., Kolsanov A.V., Shulkin I.M., Bobrovskaya T.M., Pestenin L.D. Autonomous artificial intelligence for sorting the results of preventive radiological studies on the example of mammography. *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*. 2024;14(3):8–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-8-21>

Received 07.07.2024

Accepted 04.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Раннее выявление признаков злокачественных новообразований (ЗНО) является одной из основных задач профилактики. В России ЗНО молочной железы является ведущей (22,4%) онкологической патологией у женского населения. В структуре смертности женщин наибольший удельный вес имеют также ЗНО молочной железы (15,8%) [1].

По данным Московского научно-исследовательского онкологического института имени П. А. Герцена, в 2022 г. было выявлено 76520 пациентов с

впервые в жизни установленным диагнозом ЗНО молочной железы. При этом за 10 лет (с 2013 г. по 2022 г.) этот показатель увеличился на 26,0% [1].

Маммография является основным методом скрининга ЗНО молочных желез. Важно отметить, что доля исследований с патологией при проведении ММГ не превышает 10%, а это означает, что абсолютное большинство исследований будет описываться врачами-рентгенологами как «норма» [2; 3].

В соответствии с научно обоснованными требованиями и нормативно-правовыми актами должны выполняться

двойные описания¹. Каждое исследование должно быть независимо описано двумя врачами-рентгенологами, что создает еще большую ресурсную нагрузку. На этом фоне в лучевой диагностике сохраняется серьезный дефицит кадров [4; 5; 6].

За последние пять лет в России активно развиваются решения на основе технологий искусственного интеллекта (ТИИ), в т. ч. по маммографии. На практике этот процесс можно оценить по появлению первых медицинских изделий, в качестве которых зарегистрировано программное обеспечение (ПО) на основе ТИИ. Ранее нами уже была показана возможность двойных просмотров результатов маммографии с применением таких медицинских изделий, т. е. схема «врач + врач» была заменена на «врач + медицинское изделие с ИИ» [7]. К моменту подготовки статьи в России уже оказано несколько десятков тысяч соответствующих медицинских услуг, финансируемых системой обязательного медицинского страхования. Как показывает анализ первых десяти тысяч таковых, согласованность между ИИ и врачом-рентгенологом достигает 84,10%, при этом именно медицинское изделие чаще присваивает более высокую категорию BI-RADS, что приводит к снижению количества пропусков

злокачественных новообразований молочных желез [8].

В рамках настоящей работы предлагается сделать следующий шаг в сторону автоматизации проведения маммографического исследования. При этом важно отметить, что автоматизации будет подвергаться только сортировка исследований на две группы: «норма», заключение по этой группе может быть оформлено в виде электронной медицинской записи², и «не норма», которая будет подвергаться полноценному врачебному описанию.

Цель исследования – оценить возможность применения автономной сортировки результатов маммографических исследований в реальных клинических условиях.

Материал и методы

Дизайн: исследование состоит из двух этапов – ретроспективный и проспективный. Работы выполнены на базе ГБУЗ г. Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицины ДЗМ» в период 01.01.2023–31.10.2023.

Критерии включения: возраст старше 18 лет; пол женский; наличие в карте пациента направления на проведение ММГ и результатов в стандарте DICOM профилактического лучевого исследования.

¹ Об утверждении Порядка проведения профилактического медицинского осмотра и диспансеризации определенных групп взрослого населения: приказ Минздрава России (Министерство здравоохранения РФ) от 27 апреля 2021 г. № 404н. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/401314440/?ysclid=m165ezj9x2770995042> (дата обращения: 18.06.2024).

² Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 07.09.2020 г. № 947н «Об утверждении Порядка организации системы документооборота в сфере охраны здоровья в части ведения медицинской документации в форме электронных документов». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400083202/?ysclid=m165ow42e343854419> (дата обращения: 18.06.2024).

Критерии исключения: лучевые исследования иной модальности; ММГ, выполненные с диагностической целью; отсутствие подписанного информированного согласия на участие в исследовании.

В исследование на первом (ретроспективном) этапе дополнительно была исключена группа BI-RADS 3, т. к. в дизайн проспективного исследования не предполагал экспертного пересмотра. Таким образом, было включено 25 892 маммографии в рамках ретроспективного этапа, на втором (проспективном) этапе – 82 372 ММГ.

Использованы медицинские изделия на базе технологий искусственного интеллекта (ИИ-сервисы) для автоматизированного анализа результатов профилактической маммографии («АО Медицинские технологии Лтд», «Трио ДМ»; ООО «Платформа Третье Мнение», «Третье мнение ММГ»; ООО «Медицинские скрининг системы», «Цельс ММГ»). В дальнейшем по тексту будут использоваться анонимизированные наименования ИИ-сервисов: ИИ-1, ИИ-2 и ИИ-3. Все ИИ-сервисы предоставляли результаты в стандартном виде, регламентированном базовыми функциональными и диагностическими требованиями [9]. Врачу рентгенологу были доступны дополнительные графические серии с разметкой патологических областей и дополнительной текстовой серией. ИИ-сервисы были интегрированы в информационную систему в сфере здравоохранения субъекта РФ – Единый радиологический информационный сервис

Единой медицинской информационно-аналитической системы г. Москвы (ЕРИС ЕМИАС). В этой же системе осуществлялась работа врачей-рентгенологов.

На ретроспективном этапе участвовал только ИИ-3, который имел исходную настройку, однако в качестве результата кроме описанных выше дополнительных серий были получены значения вероятностей наличия патологии в диапазоне 0-100%. Референс-тестом в этом случае являлся протокол, оформленный врачом-рентгенологом при проведении первичной интерпретации результатов ММГ. Протокол исследования обрабатывался при помощи автоматизированного инструмента анализа протоколов, и ему присваивался один из двух лейблов – «норма» (BI-RADS 1,2) и «не норма» (BI-RADS 4,5). На основе этих данных при помощи интерактивного инструмента (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617324) был проведен ROC-анализ для оценки возможности настройки порога срабатывания ИИ-сервиса таким образом, чтобы можно было получить 100%-ную чувствительность.

На проспективном этапе разработчиков ИИ-сервисов попросили перенастроить работу своих решений таким образом, чтобы чувствительность составляла 100%; значение специфичности было не существенно. В соответствии с методологией STARD 2015 [10] индекс-тестом был ИИ-сервис, интегрированный в ЕРИС ЕМИАС; референс-тестом № 1 –

протокол, оформленный врачом-рентгенологом при проведении первичной интерпретации результатов ММГ; референс-тестом № 2 – пересмотр результатов работы ИИ-сервиса и протокола врача квалифицированным экспертом с соответствующей субспециализацией.

Ход исследования был следующим. После назначения и выполнения ММГ результаты исследования сохранялись в ЕРИС ЕМИАС и параллельно маршрутизировались на анализ ИИ-сервисом и описание врачом-рентгенологом. В задачи ИИ-сервиса входила сортировка результатов ММГ на категории «норма» и «не норма». Результаты работы ИИ были неизвестны и недоступны врачу-рентгенологу. Далее выполнено сопоставление решений ИИ-сервисов и врачей-рентгенологов о категорировании; при этом использован инструмент для автоматизированного анализа текста протоколов. На проспективном этапе

случаи с выявленными расхождениями направлялись на экспертный пересмотр.

Использованы методы описательной статистики, ROC-анализ, критерий Пирсона (хи-квадрат).

Результаты и их обсуждение

Ретроспективный этап

На рисунке 1 представлена характеристическая кривая, полученная на основе 25 892 исследований. Интерактивный инструмент позволяет, перемещаясь от точки к точке, получать информацию о показателях диагностической точности для конкретного порога срабатывания, соответствующего этой точке на характеристической кривой. Таким образом, было найдено самое низкое значение для порога срабатывания, при котором чувствительность соответствует 1,00 (100%). При такой настройке ИИ-сервиса корректно будет классифицировано 8 265 исследований, что составляет 32% от всего потока.

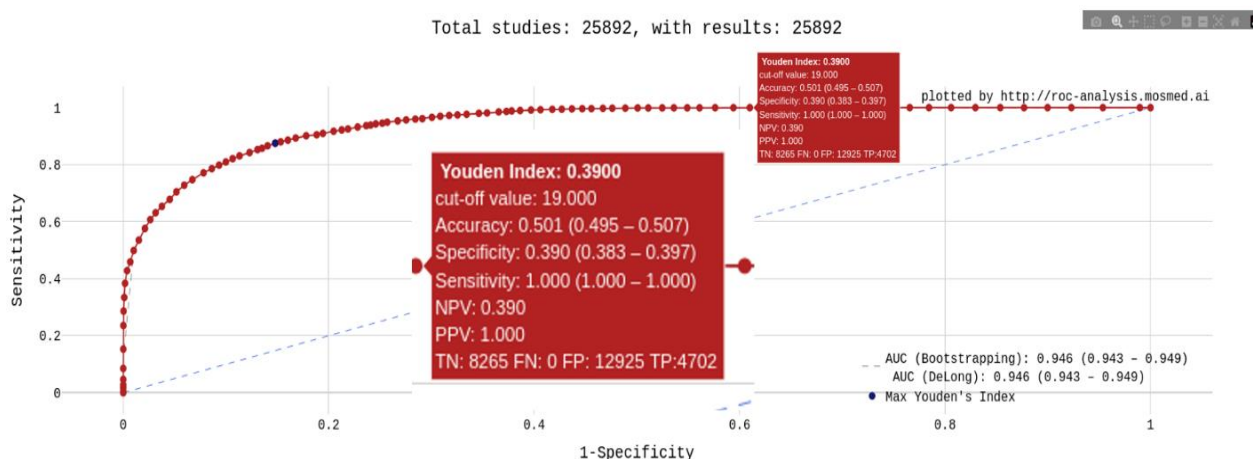


Рис. 1. Характеристическая кривая для ПО на основе ТИИ: ● – оптимальная сбалансированная настройка; ● – показатели диагностической точности, соответствующие чувствительности, равной 1,00 (100%)

Fig. 1. The characteristic curve for software based on TII: ● – optimal balanced setting;
● – diagnostic accuracy indicators corresponding to sensitivity equal to 1.00 (100%)

Перспективный этап

ИИ-сервисами проанализированы результаты 82 372 профилактических маммографий (ММГ). К категории «норма» при автоматизированном

анализе было отнесено 15,7% (12 913) результатов маммографий, к категории «не норма» – 84,3% (69 459). Подробные данные представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Итоги работы ИИ-сервисов для автономной сортировки результатов профилактической маммографии

Table 1. Results of the work of AI services for autonomous triage of preventive mammography results

ИИ-сервис / AI service	Общее количество проанализированных исследований, абс. / Total number of analyzed studies, abs.	Исследований категории «норма» / Studies from "normal" category		Исследований категории «не норма» / Studies from "not normal" category	
		Абс. / Abs.	Относит. / Rel., %	Абс. / Abs.	Относит. / Rel., %
ИИ-1/AI-1	20 632	2 179	10,6	18 453	89,4
ИИ-2/AI-2	6 430	2 963	46,1	3 467	53,9
ИИ-3/AI-3	55 310	7 771	14,0	47 539	86,0
Итого/Total	82 372	12 913	15,7	69 459	84,3

Наибольшее количество исследований обработал ИИ-3 (67,1%), наименьшее (7,8%) – ИИ-2. Это обусловлено техническими ограничениями, а также тем, что ИИ-2 в период исследования был преимущественно задействован для оказания медицинской услуги с применением технологий ИИ в рамках территориальной программы государственных гарантий оказания гражданам бесплатной медицинской помощи г. Москвы [8].

К категории «норма» статистически значимо большее число исследований было отнесено ИИ-2 (46,1%), меньше всего таких решений принял ИИ-1 (10,6%) ($p < 0,001$).

Следующий шаг для каждого случая ($n = 12\ 913$), попавшего в категорию «норма», – сопоставление решений ИИ и врача-рентгенолога, проводившего первичное описание. Полное согласие решений об отнесении результатов

данного исследования к категории по шкале «BI-RADS» зафиксировано в 98,8% (12 765) случаев, расхождения выявлены только в 1,2% (148).

Далее 148 случаев с расхождениями представлены на пересмотр врачом-экспертом с субспециализацией. В результате решение ИИ «норма» было подтверждено в 41,2% (61) случаев, решение врача «не норма» – в 58,8% (87).

Установлено, что ИИ провел неправильную сортировку в 87 случаях. Вместе с тем 65 исследованиях из указанного количества врачом-экспертом были отнесены к категории BI-RADS-3, к категории BI-RADS-4 – 19, к категории BI-RADS-5,6 – 3. Таким образом, при автономной сортировке результатов профилактической маммографии клинически значимое расхождение ИИ допустил в 22 случаях, что составило 0,02% от общего количества проанализированных

исследований. Полностью же корректно автономная сортировка была выполнена в 99,9% (82 258) случаев.

Искусственный интеллект является одним из самых перспективных направлений в современном мире. Здравоохранение – одна из сфер, базируясь на научных исследованиях, активно внедряет технологии ИИ по всему миру. Тем не менее большинство работ носят теоретический характер, описывают математические зависимости, программные разработки, но они не всегда применимы в клинической практике или носят экспериментальный, исследовательский характер. Исследования зачастую выполняются ретроспективно, на ограниченном объеме данных, а данные, полученные в эксперименте, не всегда применимы на практике. При этом наибольший интерес вызывают работы прикладного характера, связанные с сопоставлением диагностической точности ИИ и врачей, сравнением различных алгоритмов, в частности, для анализа результатов маммографий.

До настоящего момента ИИ рассматривался преимущественно в качестве «помощника» врача, системы поддержки принятия врачебных решений, оставляя выбор возможности его использования за специалистом. Таким образом, применение технологий ИИ с целью устранения кадрового дефицита и увеличения охвата профилактических мероприятий не представляется возможным.

Напротив, в случае системного подхода применения технологий ИИ становится возможным оптимизация процессов организации здравоохранения.

Одним из способов это реализовать является так называемый автономный ИИ, способный осуществлять независимую сортировку результатов профилактических исследований в лучевой диагностике, подавляющее большинство из которых является «нормой».

В ходе ретроспективного анализа на 25 тысячах маммографий из реального потока исследований медицинских организаций, подведомственных ДЗМ, была доказана возможность настройки одного из решений на основе технологий ИИ на чувствительность, равную 1,00 (100%). При такой настройке удалось «отсеять» 32% потока исследований с «нормой». Эти исследования можно не направлять врачу-рентгенологу, а формировать электронную медицинскую запись. Данное исследование, как и некоторые предыдущие [7; 11], показало теоретическую возможность реализации автономной сортировки исследований. Однако по сравнению с предыдущими исследованиями доля исследований с «нормой» в настоящем ретроспективном исследовании оказалась статистически значимо ниже (отсутствует пересечение 95% доверительного интервала для специфичности: в настоящем исследовании 0,383 – 0,397, в предыдущем – 0,402 – 0,678).

На проспективном этапе работы были получены высокие значения диагностической точности: удельный вес ложных отнесений результатов исследований к категории «норма» составляет 0,08% (0,008), а клинически значимые расхождения – 0,02% (0,0002). Для понимания возможности практического применения технологий ИИ необходимо сравнить результаты его работы с

врачом, чувствительность которого априори считают за 1,00 (100%). Тем не менее необходимо постоянно совершенствовать качество предоставляемых результатов диагностических исследований. В том числе с этой целью проводятся различные исследования, направленные на оценку точности и согласованности результатов работы врачей-рентгенологов. Так было показано, что удельный вес клинически значимых пропусков патологии при интерпретации результатов маммографий колеблется в обширном диапазоне от 3,5% (0,035) до 30,0% (0,30) [12; 13; 14; 15; 16; 17].

При этом в настоящей работе удельный вес дефектов ИИ-сервисов по анализу ММГ составил 0,08%, а клинически значимых дефектов – 0,02%, что существенно ниже полученных в описанных работах значений. Это говорит о том, что автономная сортировка результатов профилактических лучевых исследований с использованием ИИ-сервисов применима на практике и не только сопоставима, но и превышает показатели врача-рентгенолога.

Таким образом, автономная сортировка результатов профилактических лучевых исследований медицинским изделием на основе ИИ превышает по своей безопасности и точности врача-рентгенолога [12; 13; 14; 15; 16; 17]. На основании этого возможно рассмотрение автономного ИИ в качестве подхода к оптимизации диагностического процесса, повышения доступности медицинской помощи, совершенствования профилактических мероприятий, что предполагается осуществимым путем

создания специальных медицинских услуг, регламентирующих использование технологий ИИ. Однако при этом необходим тщательный мониторинг контроля качества работы технологий ИИ.

Выводы

Предложена новая модель организации медицинской помощи на основе автономной сортировки результатов профилактических лучевых исследований медицинским изделием, опираясь на искусственный интеллект. Модель подразумевает автоматизированное разделение результатов маммографии на две категории – «норма» и «не норма». Для категории «норма» в карте пациента формируется электронная медицинская запись, которая сразу становится доступной обследованному лицу и лечащему врачу. Категория «не норма» направляется на описание врачом-рентгенологом, который выполняет интерпретацию и формирует протокол.

Такая модель была апробирована проспективно на данных профилактической маммографии. Удельный вес дефектов ИИ (ложных отнесений результатов исследований к категории «норма») составил 0,08%, а клинически значимых – 0,02%, что существенно ниже, чем у врача-рентгенолога.

Таким образом, описанная модель применима в условиях реальной клинической практики с целью расширения возможностей проведения профилактических мероприятий, решения вопроса кадрового дефицита и оптимизации диагностического процесса в целом.

Список литературы

1. Злокачественные новообразования в России в 2022 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А. Д. Каприна [и др.]. М.: МНИОИ им. П. А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2023. 275 с.
2. Методические рекомендации по выполнению программы популяционного скрининга злокачественных новообразований молочной железы среди женского населения / А. М. Беляев [и др.]. URL: <http://onkokms.ru/images/doc/vracham/popsk.pdf?ysclid=m165517nps854446616> (дата обращения: 11.06.2024).
3. Ломаков С. Ю. Объемы маммографических исследований в современных условиях проведения профилактических мероприятий // Профилактическая медицина. 2020. Т. 24, № 4. С. 41–44.
4. Особенности развития службы лучевой диагностики в Российской Федерации за 2014–2019 года / Н. А. Голубев, Е. В. Огрызко, Е. М. Тюрина, Е. А. Шелепова, П. В. Шелехов // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. 2021. № 2. С. 356–376. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2021-2-356-376>
5. Шелехов П. В. Кадровая ситуация в лучевой диагностике // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. 2019. № 1. С. 265–275.
6. A survey by the European Society of Breast Imaging on radiologists' preferences regarding quality assurance measures of image interpretation in screening and diagnostic mammography / E. Michalopoulou, P. Clauser, F. J. Gilbert, R. M. Pijnappel, R. M. Mann, P. A. T. Baltzer, Y. Chen, E. M. Fallenberg // Eur. Radiol. 2023. Vol. 33, N 11. P. 8103–8111. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09973-7>
7. Двойной просмотр результатов маммографии с применением технологий искусственного интеллекта: новая модель организации массовых профилактических исследований / Ю. А. Васильев, И. А. Тыров, А. В. Владимирский, К. М. Арзамасов, И. М. Шулькин, Д. Д. Кожихина, Л. Д. Пестренин // Digital Diagnostics. 2023. Т. 4, № 2. С. 93–104. <https://doi.org/10.17816/DD321423>
8. Первые 10000 маммографических исследований, выполненных в рамках услуги «Описание и интерпретация данных маммографического исследования с использованием искусственного интеллекта» / Ю. А. Васильев, А. В. Владимирский, К. М. Арзамасов, И. М. Шулькин, Л. Е. Аксенова, Л. Д. Пестренин, С. С. Семенов, Д. В. Бондарчук, И. В. Смирнов // Менеджер здравоохранения. 2023. № 8. С. 54–67. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2023-8-54-67>
9. Базовые рекомендации к работе сервисов искусственного интеллекта для лучевой диагностики: методические рекомендации № 54. М.: Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, 2022. 68 с.
10. For the STARD Group. STARD 2015: An Updated List of Essential Items for Reporting Diagnostic Accuracy Studies / P. M. Bossuyt, J. B. Reitsma, D. E. Bruns, C. A. Gatsonis, P. P. Glasziou, L. Irwig, J. G. Lijmer, D. Moher, D. Rennie, H. C. de Vet, H. Y. Kressel, N. Rifai, R. M. Golub, D. G. Altman, L. Hooft, D. A., Korevaar J. F. Cohen // Radiology. 2015. N 277(3). P. 826–832. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015151516>

11. Эффективность применения технологий искусственного интеллекта для двойных описаний результатов профилактических исследований легких / А. В. Владимирский, Н. Д. Кудрявцев, Д. Д. Кожихина, И. М. Шулькин, С. П. Морозов, Н. В. Ледихова, В. Г. Кляшторный, И. В. Гончарова, А. В. Новиков, О. М. Внукова // Профилактическая медицина. 2022. Т. 25, № 7. С. 7–15. <https://doi.org/10.17116/profmed2022250717>
12. Breast cancer detected with screening US: reasons for nondetection at mammography / M. S. Bae, W. K. Moon, J. M. Chang, H. R. Koo, W. H. Kim, N. Cho, A. Yi, B. L. Yun, S. H. Lee, M. Y. Kim, E. B. Ryu, M. Seo // Radiology. 2014. Vol. 270, N 2. P. 369–377.
13. Hovda T., Larsen M., Romundstad L., Sahlberg K. K., Hofvind S. Breast cancer missed at screening; hindsight or mistakes? // Eur. J. Radiol. 2023. N 165. P. 110913. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110913>
14. Ekpo E. U., Alakhras M., Brennan P. Errors in Mammography Cannot be Solved Through Technology Alone // Asian. Pac. J. Cancer. Prev. 2018. Vol. 19, N 2. P. 291–301. <https://doi.org/10.22034/APJCP.2018.19.2.291>
15. Evans K. K., Birdwell R. L., Wolfe J. M. If you don't find it often, you often don't find it: why some cancers are missed in breast cancer screening // PLoS One. 2013. Vol. 8, N 5. P. e64366.
16. Screen-detected and interval breast cancer after concordant and discordant interpretations in a population based screening program using independent double reading / M. A. Martiniussen, S. Sagstad, M. Larsen, A. S. F. Larsen, T. Hovda, C. I. Lee, S. Hofvind // Eur. Radiol. 2022. Vol. 32, N 9. P. 5974–5985. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08711-9>
17. Analysis of mammographic diagnostic errors in breast clinic / V. Palazzetti, F. Guidi, L. Ottaviani, G. Valeri, S. Baldassarre, G. M. Giuseppetti // Radiol. Med. 2016. Vol. 121, N 11. P. 828–833. <https://doi.org/10.1007/s11547-016-0655-0>

References

1. Kaprin A.D. (eds.) Malignant neoplasms in Russia in 2022 (morbidity and mortality). Moscow: MNIOI im. P.A. Gercena – filial FGBU «NMIC radiologii» Minzdrava Rossii; 2023. 275 p. (In Russ.)
2. Beljaev A.M. (eds.) Methodological recommendations for implementing a population-based screening program for malignant neoplasms of the breast among the female population. (In Russ.) Available at: <http://onkokms.ru/images/doc/vracham/popsk.pdf?ysclid=m165517nps854446616> (accessed 11.06.2024).
3. Lomakov S.Ju. Volumes of mammographic studies in modern conditions of providing preventive measures. *Profilakticheskaya meditsina = Russian Journal of Preventive Medicine*. 2020;23(4):41–44. (In Russ.)
4. Golubev N.A., Ogryzko E.V., Tyurina E.M., Shelepova E.A., Shelekhov P.V. Features of the development of the radiation diagnostics service in the Russian Federation for 2014–2019. *Sovremennye problemy zdravookhraneniya i meditsinskoi statistiki = Modern Problems of Healthcare and Medical Statistics*. 2021;(2):356–376. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2021-2-356-376>

5. Shelekhov P.V. Personnel situation in radiative diagnostics. *Sovremennye problemy zdavookhraneniya i meditsinskoj statistiki* = *Modern Problems of Healthcare and Medical Statistics*. 2019;(1):265–275. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2312-2935-2019-10018>
6. Michalopoulou E., Clauser P., Gilbert F.J., Pijnappel R.M., Mann R.M., Baltzer P.A.T., Chen Y., Fallenberg E.M. A survey by the European Society of Breast Imaging on radiologists' preferences regarding quality assurance measures of image interpretation in screening and diagnostic mammography. *Eur. Radiol.* 2023;33(11):8103–8111. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09973-7>
7. Vasilev Yu.A., Tyrov I.A., Vladzimirskyy A.V., Arzamasov K.M., Shulkin I.M., Kozhikhina D.D., Pestrenin L.D. Double-reading mammograms using artificial intelligence technologies: A new model of mass preventive examination organization. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):93–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/DD321423>
8. Vasiliev Y.A., Vladzimirsky A.V., Arzamasov K.M., Shulkin I.M., Aksenova L.E., Pestrenin L.D., Semenov S.S., Bondarchuk D.V., Smirnov I.V. The first 10,000 mammography exams performed as part of the «description and interpretation of mammography data using artificial intelligence» service. *Menedzher zdavookhraneniya* = *Manager Zdravookhraneniya*. 2023;(8):54–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2023-8-54-67>
9. Basic recommendations for the operation of artificial intelligence services for radiation diagnostics: methodological recommendations No 54. Moscow: Nauchno-prakticheskij klinicheskij centr diagnostiki i telemeditsinskih tekhnologij Departamenta zdavookhraneniya goroda Moskvy; 2022. 68 p. (In Russ.)
10. Bossuyt P.M., Reitsma J.B., Bruns D.E., Gatsonis C.A., Glasziou P.P., Irwig L., Lijmer J.G., Moher D., Rennie D., de Vet H.C., Kressel H.Y., Rifai N., Golub R.M., Altman D.G., Hooft L., Korevaar D.A., Cohen J.F. For the STARD Group. STARD 2015: An Updated List of Essential Items for Reporting Diagnostic Accuracy Studies. *Radiology*. 2015;(277):826–832. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015151516>
11. Vladzimirskyy A.V., Kudryavtsev N.D., Kozhikhina D.D., Shulkin I.M., Morozov S.P., Ledikhova N.V., Klyashtorniy V.G., Goncharova I.V., Novikov A.V., Vnuкова O.M. Effectiveness of using artificial intelligence technologies for dual descriptions of the results of preventive lung examinations. *Profilakticheskaya Meditsina* = *Preventative Medicine*. 2022;25(7):7–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/profmed2022250717>
12. Bae M.S., Moon W.K., Chang J.M., Koo H.R., Kim W.H., Cho N., Yi A., Yun B.L., Lee S.H., Kim M.Y., Ryu E.B., Seo M. Breast cancer detected with screening US: reasons for nondetection at mammography. *Radiology*. 2014;270(2):369–377.
13. Hovda T., Larsen M., Romundstad L., Sahlberg K.K., Hofvind S. Breast cancer missed at screening; hindsight or mistakes? *Eur. J. Radiol.* 2023;(165):110913. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110913>
14. Ekpo E.U., Alakhras M., Brennan P. Errors in Mammography Cannot be Solved Through Technology Alone. *Asian. Pac J. Cancer. Prev.* 2018;19(2):291–301. <https://doi.org/10.22034/APJCP.2018.19.2.291>

15. Evans K.K., Birdwell R.L., Wolfe J.M. If you don't find it often, you often don't find it: why some cancers are missed in breast cancer screening. *PLoS One*. 2013;8(5):e64366.

16. Martiniussen M.A., Sagstad S., Larsen M., Larsen A.S.F., Hovda T., Lee C.I., Hofvind S. Screen-detected and interval breast cancer after concordant and discordant interpretations in a population based screening program using independent double reading. *Eur. Radiol.* 2022;32(9):5974–5985. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08711-9>

17. Palazzetti V., Guidi F., Ottaviani L., Valeri G., Baldassarre S., Giuseppetti G.M. Analysis of mammographic diagnostic errors in breast clinic. *Radiol Med.* 2016;121(11):828–833. <https://doi.org/10.1007/s11547-016-0655-0>

Информация об авторах / Information about the Authors

Васильев Юрий Александрович, кандидат медицинских наук, директор, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru, SPIN: 4458-5608, ORCID: 0000-0002-5283-5961

Арзамасов Кирилл Михайлович, кандидат медицинских наук, руководитель отдела медицинской информатики, радиомики и радиогеномики, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru, SPIN: 3160-8062, ORCID: 0000-0001-7786-0349

Владимирский Антон Вячеславович, доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: VladzimirskijAV@zdrav.mos.ru, SPIN: 3602-7120, ORCID: 0000-0002-2990-7736

Yuriy A. Vasilev, Candidate of Sciences (Medical), Director, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation, e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru, SPIN: 4458-5608, ORCID: 0000-0002-5283-5961

Kirill M. Arzamasov, Candidate of Sciences (Medical), Head of the Department of Medical Informatics, Radiomics and Radiogenomics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation, e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru, SPIN: 3160-8062, ORCID: 0000-0001-7786-0349

Anton V. Vladzimirskyy, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Deputy Director for Scientific Work, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation, e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru, SPIN: 3602-7120, ORCID: 0000-0002-2990-7736

Колсанов Александр Владимирович, доктор медицинских наук, профессор Российской академии наук, профессор, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация;
e-mail info@samsmu.ru,
SPIN: 2028-6609,
ORCID: 0000-0002-4144-7090

Шулькин Игорь Михайлович, заместитель директора по медицинской части, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru,
SPIN: 5266-0618,
ORCID: 0000-0002-7613-5273

Бобровская Татьяна Михайловна, младший научный сотрудник отдела инновационных технологий, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: BobrovskayaTM@zdrav.mos.ru,
SPIN: 3400-8575,
ORCID: 0000-0002-2746-7554

Пестренин Лев Дмитриевич, младший научный сотрудник отдела медицинской информатики, радиомики и радиогеномики, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: PestreninLD@zdrav.mos.ru,
SPIN: 7193-7706,
ORCID: 0000-0002-1786-432

Alexander V. Kolsanov, Doctor of Sciences (Medical), Professor Russian Academy of Sciences, Professor, Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Samara, Russian Federation,
e-mail info@samsmu.ru,
SPIN: 2028-6609,
ORCID: 0000-0002-4144-7090

Igor M. Shulkin, Deputy Director for Medical Department, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation,
e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru,
SPIN: 5266-0618,
ORCID: 0000-0002-7613-5273

Tatiana M. Bobrovskaya, Research Assistant of the Department of Innovative Technologies, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation,
e-mail: BobrovskayaTM@zdrav.mos.ru,
SPIN: 3400-8575,
ORCID: 0000-0002-2746-7554

Lev D. Pestrenin, Research Assistant of the Department of Medical Informatics, Radiomics and Radiogenomics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation,
e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru,
SPIN: 7193-7706,
ORCID: 0000-0002-1786-4329

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-22-35>

УДК 004.042

Метод и алгоритм интеллектуальной обработки текстовой информации

С. В. Ефанов¹ ✉, Е. Н. Иванова¹, И. Е. Чернецкая¹

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

✉ e-mail: nshysh@yandex.ru

Резюме

Цель исследований заключается в разработке алгоритма интеллектуальной обработки для классификации текстовой информации. Поскольку количество информации растет каждый день, необходимо быстро и качественно отделять значимое от второстепенного содержимого. Поэтому разработка алгоритма интеллектуальной обработки для классификации текстовой информации является актуальной задачей.

Методы. Предложен метод для классификации текстовой информации, представленной на одном или нескольких естественных языках. В его основу входит 5 ключевых стадий: ввод задания, накопление очереди задач, обработка задачи, формирование результата обработки задания, вывод результата. Входное задание представлено в виде HTTP-запроса, в теле которого хранится объект файла. Если интенсивность входного потока больше скорости обработки, то происходит накопление задач. После выбора активного задания (по принципу FIFO) происходит его обработка. В результате преобразований происходит декодирование принятых данных в строку, используя кодировку UTF-8. Под обработкой понимается процесс рубрикации, когда происходит поиск шаблонов в строке. По завершению рубрикации происходит формирование результата по выбранному заданию. Из накопленного результата формируется ответ на исходный HTTP-запрос, в теле которого находится список найденных рубрик.

Результаты. Разработан метод и алгоритм обработки текстовых данных, позволяющие определить тематики, которые присутствуют во входном наборе данных. Алгоритм, реализованный программно, позволяет работать с текстовыми данными на различных языках.

Заключение. Программная разработка алгоритма классификации текстовых данных была выполнена на языке программирования C++ с использованием библиотек Qt версии 5.11. Данная реализация показала пропускную способность 1-5 Мб в секунду (на однородном входном текстовом наборе данных). Алгоритм позволяет корректно обрабатывать поврежденные форматы файлов.

Ключевые слова: рубрикация; автоматическая обработка; классификация данных; алгоритм определения естественных языков; n-граммный алгоритм; словарь шаблонов.

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

Для цитирования: Ефанов С. В., Иванова Е. Н., Чернецкая И. Е. Метод и алгоритм интеллектуальной обработки текстовой информации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 22–35. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-22-35>

Поступила в редакцию 18.07.2024

Подписана в печать 20.08.2024

Опубликована 30.09.2024

© Ефанов С. В., Иванова Е. Н., Чернецкая И. Е., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024;14(3):22–35

Algorithm for intelligent procesing of text information

Sergei V. Efanov¹ ✉, Elena N. Ivanova¹, Irina E. Chernetskaya¹

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

✉ e-mail: nshysh@yandex.ru

Abstract

The purpose of research. The goal of the research is to develop an intellectual processing algorithm for classifying text information. As the amount of information grows every day, it is necessary to quickly and efficiently separate significant from unimportant content. Therefore, the development of an intellectual processing algorithm for classifying text information is an urgent task.

Methods. A method is proposed for classifying text information presented in one or more natural languages. It is based on 5 key stages: entering a task, accumulating a queue of tasks, processing the task, generating the result of processing the task, outputting the result. The input task is presented in the form of an http request, the body of which contains a file object. If the intensity of the input stream is greater than the processing speed, then an accumulation of tasks occurs. After selecting the active task (using the FIFO principle), it is processed. As a result of the transformations, the received data is decoded into a string using UTF-8 encoding. Processing refers to the process of categorization, when a search for patterns occurs in a line. Upon completion of rubrication, the result for the selected task is generated. From the accumulated result, a response to the original http request is formed, the body of which contains a list of found categories.

Results. A method and algorithm for processing text data has been developed to determine the topics that are present in the input data set. The algorithm, implemented in software, allows you to work with text data in various languages.

Conclusion. The software development of the text data classification algorithm was carried out in the C++ programming language using the Qt libraries version 5.11. This implementation showed a throughput of 1-5 MB per second (on a homogeneous input text data set). The algorithm allows you to correctly process damaged file formats.

Keywords: rubrication; automatic processing; data classification; natural language detection algorithm; n-gram algorithm; template dictionary.

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

For citation: Efanov S.V., Ivanova E.N., Chernetskaya I.E. Algorithm for intelligent procesing of text information. *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*. 2024;14(3):22–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-22-35>

Received 18.07.2024

Accepted 20.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Обработка больших данных стала ключевой задачей во многих отраслях, таких как медицина, банковское дело, производство, маркетинг и т. д. С ростом объема данных, которые собирают

компании, возникает потребность в их обработке [1]. Однако традиционные методы классификации данных, основанные на анализе вручную и использовании статистических методов, ограничены по своей эффективности и не могут

стать применимыми при работе с большими объемами информации [2]. Поэтому проблема классификации текстовой информации актуальна как никогда ранее.

Представленный алгоритм реализует программа классификатора текстовых данных.

Классификация текстовой информации – это процесс обработки входного массива данных, когда происходит анализ наличия различных тем (рубрик) в тексте [3].

Рассмотрим схему методики проведения обработки входного файла (рис. 1).

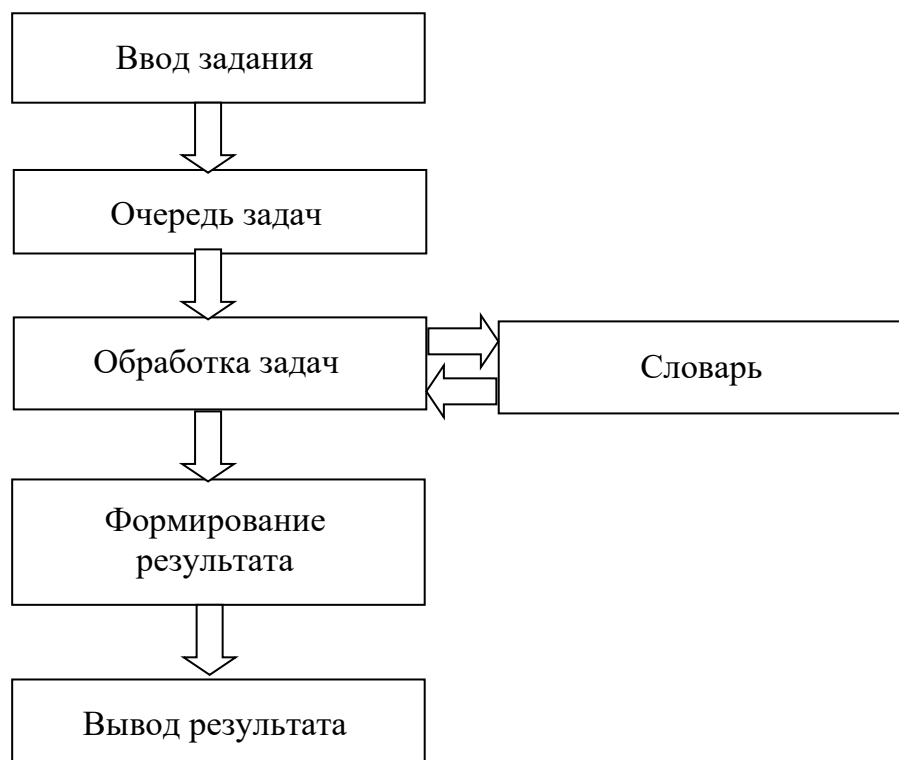


Рис. 1. Схема методики проведения обработки входного файла

Fig. 1. The method of processing the input file

Данная методика реализована программно с использованием средств разработки на языке C++.

Входное задание представлено в виде HTTP-запроса, в теле которого хранится объект файла. Если интенсивность входного потока больше скорости обработки, то происходит формирование пула задач. После выбора активного задания (по принципу FIFO – «первым пришёл – первым ушёл») происходит его обработка.

При обработке задач выполняется определение списка естественных языков, которые находятся в тексте. На основе найденных языков подбираются соответствующие шаблоны, наличие которых будет проверяться в тексте [4]. Корпус найденных шаблонов сформирует список полученных рубрик, по которым можно будет классифицировать входной текст [5].

На качество обработки влияет точность определения списка естественных языков в тексте [6].

При распознавании языков происходит двухфазная обработка текста. Первая часть основана на анализе текста в качестве массива символов, где каждый элемент анализируется на предмет его соответствия из стандарта кодирования UTF-8. При нахождении связи делается вывод о том, что переданный символ принадлежит некоторой определенной смысловой группе, которая также связана с языком (кроме символов пунктуации). Так как большинство групп символов из UTF-8 принадлежит конкретному языку, можно сделать вывод о наличии того или иного языка в тексте [7]. Однако данный метод не является предельно точным, так как входной текст может содержать латинские символы, из-за чего данный подход способен определить лишь латинскую группу, а

не конкретные языки. Поэтому для улучшения качества была реализована вторая фаза определения языков¹.

Вторая часть определителя языков основана на использовании n-граммного алгоритма, с помощью которого улучшается результат нахождения языков. В данном алгоритме подсчитываются частоты n-грамм (сочетаний символов или подстрок, длиной не более n) и предполагается, что примерно 300 самых часто используемых n-грамм сильно зависят от языка [8]. Главным языком текста считается тот, n-граммы которого встречаются чаще остальных языков. Языком тестируемого документа считается найденный в тестовом документе [9].

Если использовать только n-граммный алгоритм, то возможны потери присутствующих языков в коротких текстах. Результаты работы двухфазного определителя языков представлены ниже (рис. 2).

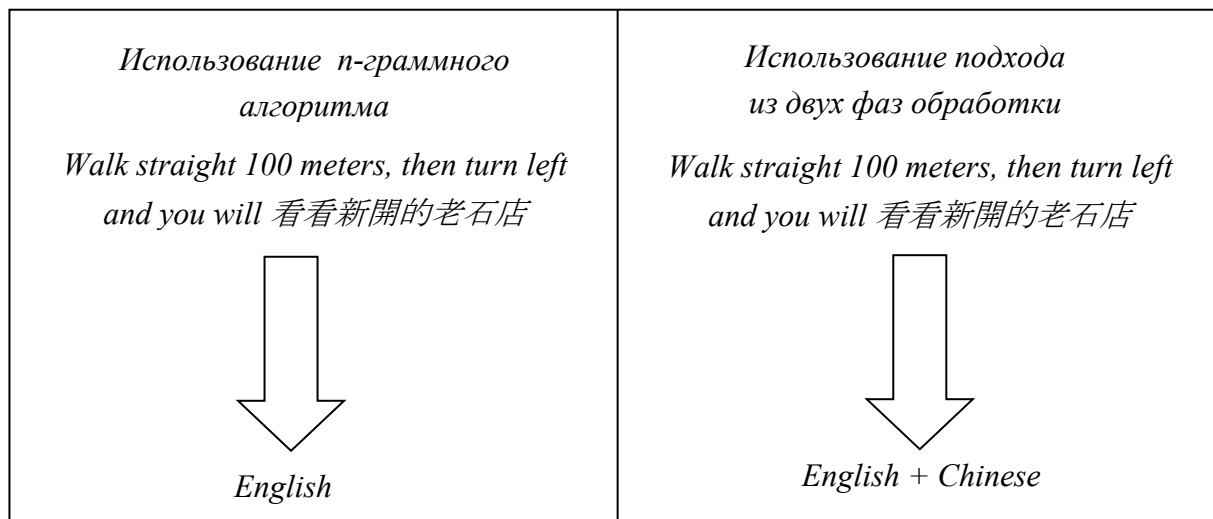


Рис. 2. Результаты использования подхода из двух фаз обработки

Fig. 2. Results of using a two-phase approach

¹ Давыдова Ю. В. Методы текстового поиска и обработки информации в социальных сетях при

управлении деятельностью правоохранительных органов: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2021. 146 с.

Использование двухфазной обработки позволяет обеспечить корректность нахождения языков в тексте, уменьшая пропуски языков.

Однако не всегда текст может быть сразу передан на определение языков. Уровень качества поиска зависит от структуры организации текста (например, для файлов в формате json) [10]. Данная ситуация является частным случаем при определении языков [11].

Для решения этой задачи происходит анализ структуры, при этом не имеет

значения, является ли она полноценная, не содержащая смысловых разрывов. Обработка json основана на подходе, который не зависит от структуры «ключ – значение». В процесс обработки подобных файлов находятся значения (value), которые накапливаются. Из них далее формируется буфер, который и будет передан на определение языков. Рассмотрим результаты обработки файла с json-структурой, которая имеет смысловой разрыв (рис. 3).

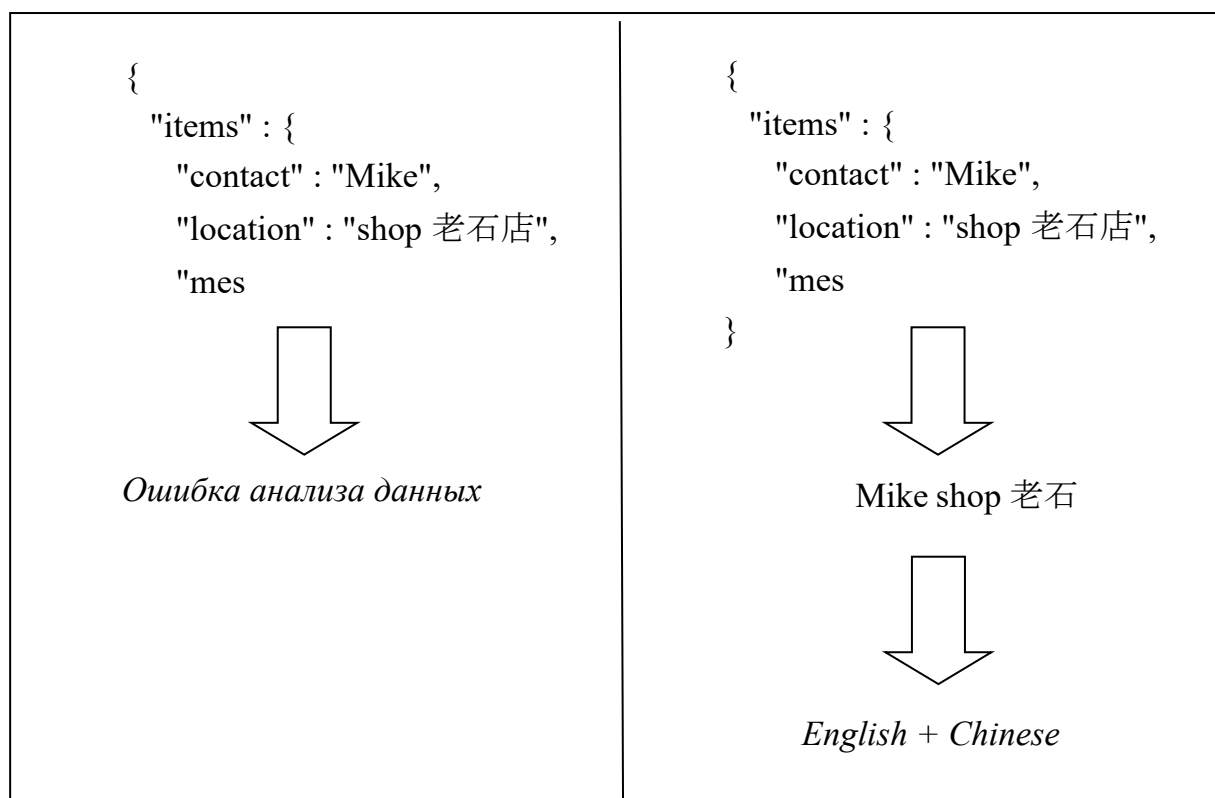


Рис. 3. Результаты обработки файла с json-структурой

Fig. 3. Results of processing a file with a json-structure

Использование данного подхода позволяет обрабатывать файлы с «битыми» структурами json.

При выполнении двухфакторной обработки увеличивается скорость

анализа задания, так как на вход второй фазы подается список присутствующих в тексте языков, а не все доступные языки (количество которых 100 единиц). Данный список всегда меньше

инициализируемого количества языков (всего доступно 100 языков). Поэтому нет необходимости искать нерелевантные языки в тексте. С помощью первой фазы определитель уменьшает

количество предполагаемых языков, и тем самым увеличивается скорость обработки. Графики, описывающие данную ситуацию, можно увидеть ниже (рис. 4).

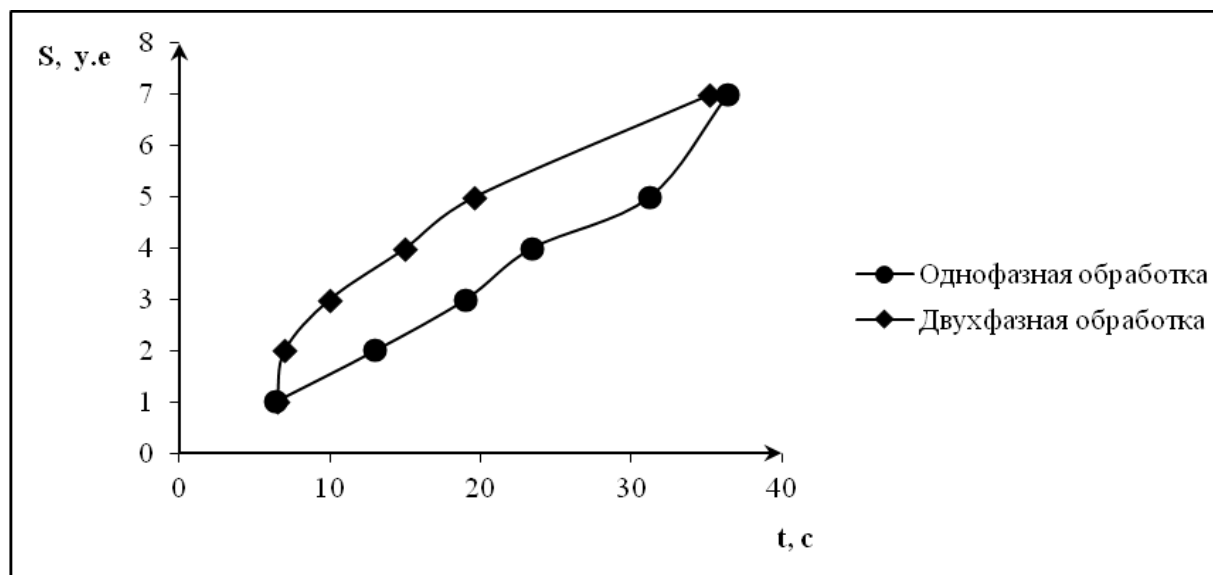


Рис. 4. Экспериментальные результаты измерения времени работы двух алгоритмов

Fig. 4. Experimental results of measuring the running time of two algorithms

За счет сокращения количества языков, подлежащих к поиску в тексте, удастся достичь ускорения определения финальных языков.

Материалы и методы

Обработка данных происходит на основе созданного заранее словаря элементов, которые являются поисковыми шаблонами. Поиск базируется на основе анализа текста на предмет вхождения одной или нескольких рубрик.

Каждая тема хранит в себе набор связей шаблонов и языков [12]. В данном контексте под шаблонами

понимается слово или словосочетание на естественном языке. Также шаблон может иметь сокращение [13].

Анализ текста основан на использовании TF-IDF-векторов, которые позволяют рассчитать коэффициент сходства термина (одной единицы текста) с шаблоном [14]. Для нахождения атрибутов тематики внутри текста используется поиск ключевых связей векторов [15].

Модель с образцами, которые будут применяться в поисковых операциях, загружается при старте программы. Рассмотрим модель с организацией данных в виде словаря элементов (рис. 5).

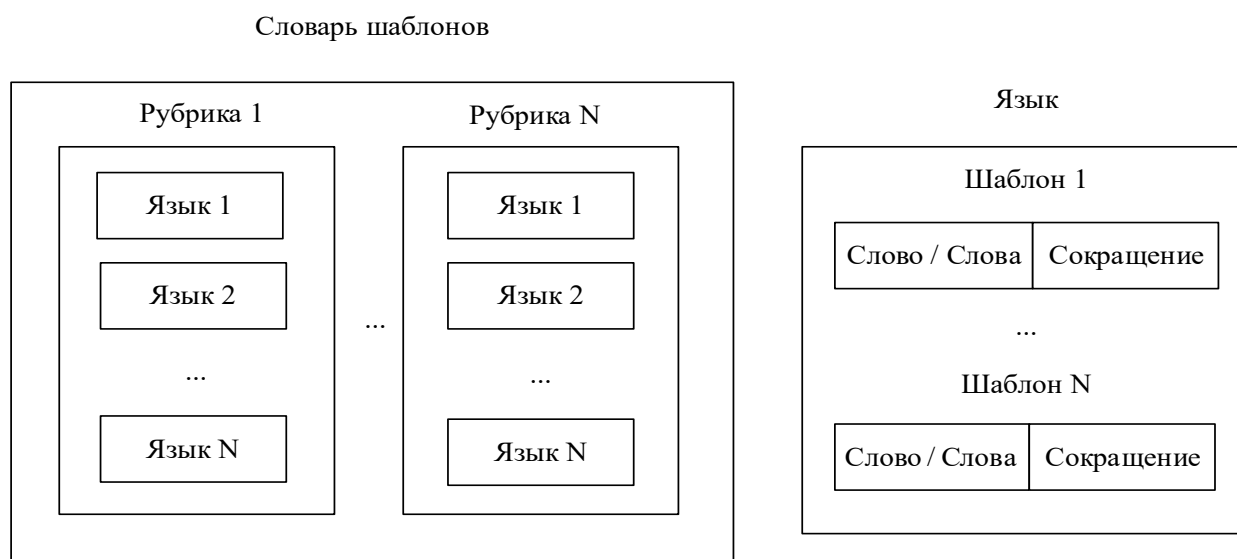


Рис. 5. Модель словаря

Fig. 5. Dictionary Model

Поисковые операции выполняются последовательно над каждым выбранным шаблоном из словаря рубрик. Этапы алгоритма, который описывает реализацию процесса обработки потока текстовых данных, представлены ниже (рис. 6, 7).

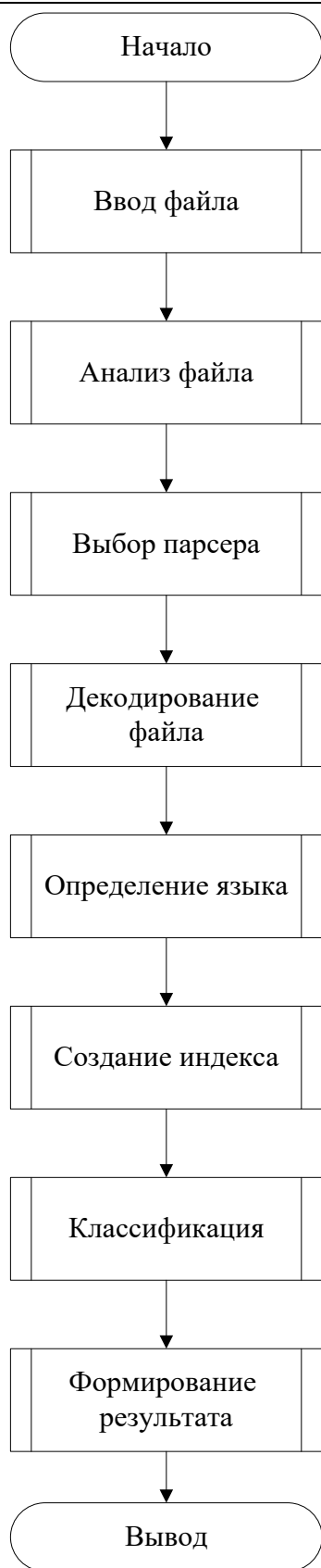
Входной файл передается в теле HTTP-запроса. После считывания запроса происходит извлечение и сохранение файла в памяти программы.

Далее происходит анализ полученного файла с целью определения формата (MIME-типа) [16]. Относительно данного типа выбирается нужный парсер. Под парсером в данном случае подразумевается специальная сущность способная, обработав файл, извлечь текстовое содержимое.

Выбор парсера основан на анализе так называемый magic bytes (байтовую последовательность, которая однозначно указывает на заданный формат

файла) [17]. Все используемые парсеры можно разделить на две группы. Первая группа парсеров отвечает за обработку файлов, которые являются контейнерами, а вторая группа – для неархивных файлов. Например, форматы, связанные с парсерами из первой группы (rar, uue, gz) и относительно второй группы (html, txt, pdf и т. д.). На данном этапе важно корректно определить нужный обработчик, так как каждый парсер ориентирован только на свой заданный формат файла [18].

После выбора парсера происходит обработка нужного файла, а именно извлечение контента. Под контентом подразумевается текстовое содержимое, которое очищено от структур и тегов. Например, при обработке файла, имеющего формат html, будет получена структура, которая хранит в себе контент, размеченный гипертекстовыми тегами [19].

**Рис. 6.** Алгоритм обработки потока данных**Fig. 6.** Data stream processing algorithm

Для корректной работы с данным содержимым необходимо очистить его от всевозможных сопутствующих тегов, которые не имеют смысла относительно цели обработки. Процесс анализа итеративен, происходит несколько циклов определения и очистки тегов, чтобы в итоге получить контент, который можно будет передать на определитель языков.

После того как текст, который был получен из файла, был модернизирован и стал полноценным контентом, происходит анализ для получения вхождений естественных языков. Данная процедура основана на 3 стадиях.

В первой стадии происходит анализ всех символов контента, чтобы найти главные группы из кодировки UTF-8. В тексте могут присутствовать символы из латинской или греческой группы. Некоторые группы однозначно связаны со своим языком, так как они и являются основой для данного языка. Например, символы из группы GREEK (греческие символы) представляют собой базис для греческого алфавита. И именно эти символы однозначно указывают на то, что данный язык присутствует в тексте. В свою очередь группа латинских символов не дает такой конкретики. Она лишь косвенно может указать на список из преобладающих языков. Существует множество языков, алфавиты которых используют латинские символы как основные при письме. Поэтому относительно данной группы нельзя однозначно сделать вывод о том, какой именно язык присутствует в тексте.

Обработчик может лишь косвенно передать список языков, которые связаны с данной символьной группой из кодировки UTF-8.

На второй стадии выбираются символы групп, которые не дают однозначности (например, латиница или кириллица) и из которых формируется отдельный текст. Это делается для того, чтобы исключить другие группы символов. В итоге получается текст, внутри которого символы только одной группы (например, латиница). Остальные группы, которые однозначно указывают на принадлежность к конкретному алфавиту, позволяют заранее сделать вывод о нужном языке. И поэтому эта запись с языком попадает в результирующий список.

На третью стадию передаются тексты из символьных групп, которые не обладают сильной связью с каким-либо конкретным алфавитом. Для каждого текста происходит анализ, который находит n -граммы слов и подсчитывает коэффициент TF-IDF. Данный коэффициент нужен для получения специального числового значения, которое отражает, насколько часто встречается тот или иной терм в тексте. Определение языка строится на статистическом подходе, когда получаются значения частот термов и сравниваются с уже сохраненными значениями. За основу взята мысль, что примерно 300 самых часто используемых n -грамм сильно зависят от языка. В ходе анализа происходит выявление минимального отклонения тестируемого значения n -граммной

статистики с ее заданной величиной. После этого языком тестируемого контента считается язык, величина отклонения которого меньше, чем заданная статистика.

Все языки, которые были получены, сводятся в один список, который будет использоваться при поисковых запросах.

Далее происходит создание поискового инвертированного индекса, который представляет собой специальную структуру данных для хранения термов из текста. Сохраняется связь между словом из текста и документом. Для каждого слова из коллекции текстов ставится в соответствие список всех документов, в которых данный терм встречался. Эта структура предоставляет быстрый доступ к документам по соответствующим термам.

После формирования индекса происходит поиск шаблонов. При поиске шаблона, исходя из сохраненного оператора, составляется запрос внутри специального анализатора, именуемого QueryParser. Его задача произвести анализ переданной строки, а также сформировать нужный запрос, именуемый Query. Каждый Query имеет свой тип и параметры, которые определяют его назначение. При создании Query анализируются все особенности переданной строки на наличие операторов, отражающих тип запроса. В данном случае под операторами понимаются специальные символы, которые явно указывают на то, какой механизм поиска будет применен

для заданного шаблона. Для обработки шаблонов внутри переданной строки в QueryParser применяется языковой анализатор Analyzer для работы с текстовыми данными. Analyzer выполняет функцию разметки запроса для анализа входной строки, именуемой Input string. Отметка Index in memory говорит о том, что созданный индекс сохраняется в

оперативную память. Входная строка (Input string) преобразуется в поисковую строку (search string) посредством замены знаков препинания на разделитель (в данном случае пробел).

Рассмотрим общую схему, отражающая организацию работы анализатора запросов QueryParser (рис. 7).

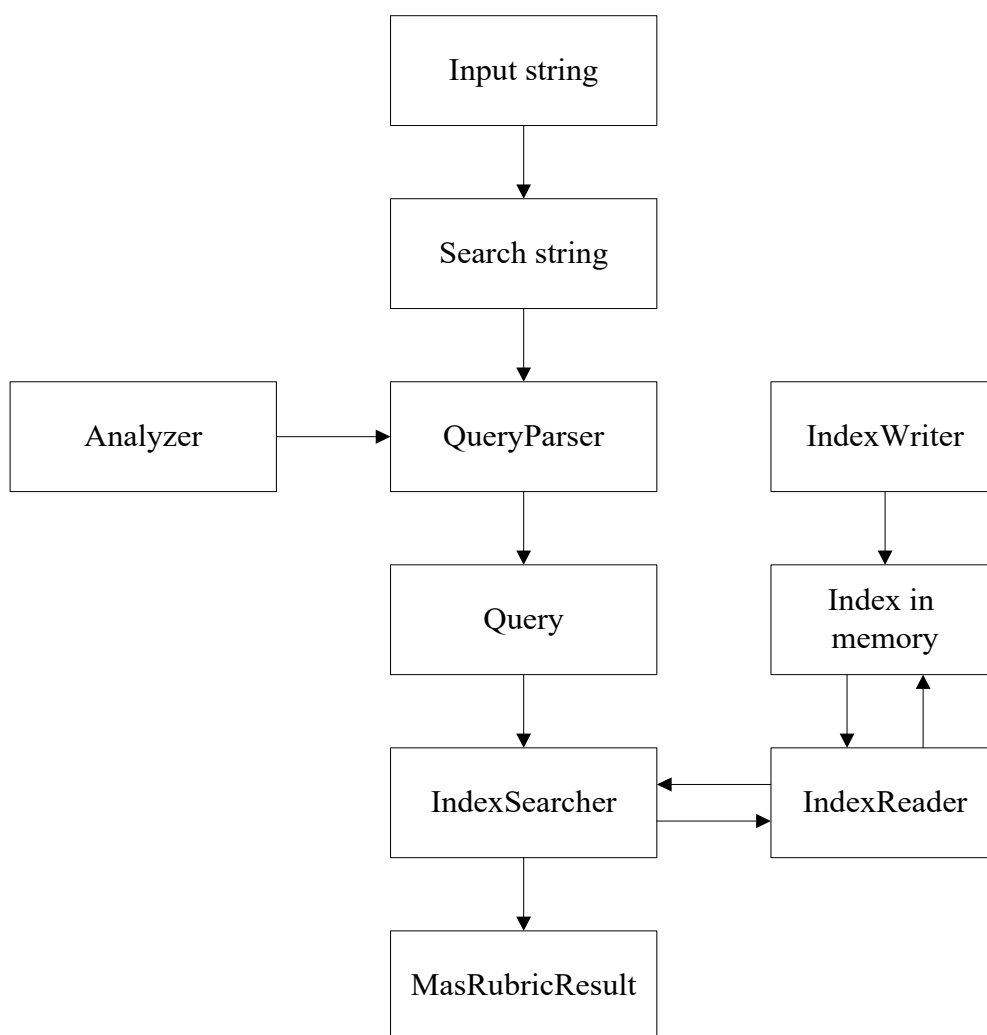


Рис. 7. Организация работы анализатора запросов

Fig. 7. Organizing the work of the query analyzer

После обработки статистика по найденным шаблонам сохраняется в обработчике (MasRubricResult), который хранит в себе результат рубрикации.

Результат обработки файла формируется на основе списка статистик по всем найденным рубрикам.

Результаты и их обсуждение

Описанные метод и алгоритм интеллектуальной обработки позволяют оптимизировать процесс автоматической классификации текстовых данных. Предложенные метод и алгоритм применимы в области автоматической рубрикации, когда важно произвести поиск шаблонов на естественном языке в текстовом наборе данных.

Выводы

Предложен метод для классификации текстовой информации. В его основу входит 5 ключевых стадий: ввод задания, накопление очереди задач, обработка задачи, формирование результата обработки задания, вывод результата. Файл попадает на вход программы. После того как файл прочитан, происходит формирование задания на классификацию. Сформированное задание сохраняется в

очередь, из которой выбирается активное задание по принципу FIFO для классификации. После того как обработчик завершит рубрикацию данных, произойдет формирование результата по выбранному заданию.

Разработан метод и алгоритм обработки текстовых данных, позволяющие определить тематики, которые входят во входной набор данных. Алгоритм, реализованный программно, позволяет работать с текстовыми данными на различных языках. Программная разработка алгоритма классификации текстовых данных была выполнена на языке программирования C++ с использованием библиотек Qt версии 5.11. Данная реализация показала пропускную способность 1–5 Мб в секунду (на однородном входном текстовом наборе данных). Алгоритм позволяет корректно обрабатывать поврежденные форматы файлов.

Список литературы

1. Кобышев К. С., Молодяков С. А. Анализ и классификация алгоритмов извлечения отношений из текстовых данных // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 5. С. 71–79. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.05.15>. EDN KXLLZK
2. Поляков А. А., Фетисов М. В. Классификация алгоритмов предварительной обработки текстовых данных для машинного обучения // Технологии инженерных и информационных систем. 2021. № 4. С. 70–79. EDN QROXYD
3. Разработка перспективных методов поиска и классификации текстовой информации из открытых источников сети Интернет / М. А. Сазонов, А. В. Яковлев, М. О. Кожанчиков, А. А. Мазниченко // Системы управления и информационные технологии. 2023. № 2 (92). С. 92–95. EDN QOMDON
4. Баранчиков А. И., Федосова Е. Б. Применение методов data Mining для анализа и выявления закономерностей в реляционных базах данных // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 2 (50). С. 40–45. <https://doi.org/0.24412/2221-2574-2023-2-40-45>. EDN CIBVDW
5. Набиуллин Д. А., Кононова В. В., Новикова С. В. Метод автоматизированной разметки больших данных с использованием нейронных сетей // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 6. С. 103–107. EDN PJNLIK

6. Методы интеллектуального анализа текстовых данных для служб экстренного реагирования / А. А. Сабитов, Р. Н. Минниханов, М. В. Дагаева [и др.] // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 7. С. 84–87. EDN NMCBWD
7. Ломакина Л. С., Субботин А. Н. Классификация потоковых данных на основе байесовского критерия // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 1 (28). С. 18. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.034>. EDN ULSSNK
8. Андреев А. В. Искусственный интеллект и его роль в обработке больших данных // Умная цифровая экономика. 2023. Т. 3, № 1. С. 65–69.
9. Лейн Х., Хапке Х., Ховард К. Обработка естественного языка в действии. СПб.: Питер, 2020. 576 с.
10. Баулина А. Р., Ресан М. Т., Янаева М. В. Системы текстового поиска, обработки и анализа естественного языка // Обществознание и социальная психология. 2022. № 9 (39). С. 101–104.
11. Иванова Г. С., Мартынюк П. А. Анализ методов извлечения информации из текстовых данных / Г. С. Иванова // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2022. Т. 24, № 3. С. 18–28. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202203-02>
12. Кадермятова Л. М., Тутубалина Е. В. Анализ моделей векторных представлений слов в задаче разметки семантических ролей в русскоязычных текстах // Электронные библиотеки. 2020. Т. 23, № 5. С. 1026–1043.
13. Анализ данных / С. В. Лейхтер, С. Н. Чуканов, И. С. Чуканов, И. В. Широков. Омск: Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, 2022. 108 с. EDN WHSYZW
14. Phat H. N., Anh N. T. M. Vietnamese text classification algorithm using long short term memory and word2vec // Informatics and Automation. 2020. Vol. 19, N 6. P. 1255–1279. <https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.6.5>. EDN MFDPBK
15. Огарок А. Л., Жаворонкова О. Г. Методы семантической обработки неструктурированной текстовой информации // Информатизация и связь. 2022. № 6. С. 44–48. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2022-13-6-44-48>
16. Огарок А. Л. Математическая модель процесса семантической обработки текстовой информации // Информатизация и связь. 2021. № 6. С. 87–91. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2021-12-6-87-91>
17. Попов О. Р., Гребенюк Е. В. Алгоритмы построения интеллектуальных систем обработки текстовой информации для задачи анализа мнений // Интеллектуальные ресурсы – региональному развитию. 2021. № 2. С. 104–110.
18. Казанцев А. А., Прохоров М. В., Худякова П. С. Обзор подходов к классификации текстов актуальными методами // Экономика и качество систем связи. 2021. № 1 (19). С. 57–67. EDN ZUJEVN
19. Семина Т. А. Анализ тональности текста: современные подходы и существующие проблемы // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Серия 6: Языкознание. 2020. № 4. С. 47–63.

References

1. Kobyshev K.S., Molodyakov S.A. Analysis and classification of algorithms for extracting relations from text data. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2021;(5):71–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.05.15>. EDN KXLLZK
2. Polyakov A.A., Fetisov M.V. Classification of algorithms for preliminary processing of text data for machine learning. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem = Technologies of Engineering and Information Systems*. 2021;(4):70–79. (In Russ.) EDN QROXYD
3. Sazonov M.A., Yakovlev A.V., Kozhanchikov M.O., Maznichenko A.A. Development of promising methods for searching and classifying text information from open sources on the Internet. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii = Control Systems and Information Technologies*. 2023;2(92):92–95. (In Russ.) EDN QOMDON
4. Baranchikov A.I., Fedosova E.B. Application of data mining methods for analyzing and identifying patterns in relational databases. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023;2(50):40–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-2-40-45>. EDN CIBVDW
5. Nabiullin D.A., Kononova V.V., Novikova S.V. Method of automated tagging of big data using neural networks. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2021;24(6):103–107. (In Russ.) EDN PJNLIK
6. Sabitov A.A., Minnikhanov R.N., Dagaeva M.V., et al. Methods for intellectual analysis of text data for emergency response services. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT = Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT*. 2020;(7):84–87. EDN NMCBWD
7. Lomakina L.S., Subbotin A.N. Classification of streaming data based on the Bayesian criterion. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2020;8(1):18. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.034>. EDN ULSSNK
8. Andreev A.V. Artificial intelligence and its role in processing big data. *Umnaya tsifrovaya ekonomika = Smart Digital Economy*. 2023;3(1):65–69. (In Russ.)
9. Lane H., Hapke H., Howard C. Natural language processing in action. St. Petersburg: Peter; 2020. 576 p.
10. Baulina A.R., Resan M.T., Yanaeva M.V. Systems for text search, processing and analysis of natural language. *Obshchestvoznaniye i sotsial'naya psikhologiya = Social Science and Social Psychology*. 2022;9(39):101–104. (In Russ.)
11. Ivanova G.S., Martynyuk P.A. Analysis of methods for extracting information from text data. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primeneniye = Neurocomputers: Development, Application*. 2022;24(3):18–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j19998554-202203-02>
12. Kadermyatova L.M., Tutubalina E.V. Analysis of models of vector representations of words in the problem of marking semantic roles in Russian-language texts. *Elektronnye biblioteki = Electronic Libraries*. 2020;23(5):1026–1043. (In Russ.)
13. Leichter S.V., Chukanov S.N., Chukanov I.S., Shirokov I.V. Data analysis. Omsk: Omskii gosudarstvennyi universitet im. F.M. Dostoevskogo; 2022. 108 p. (In Russ.) EDN WHSYZW

14. Phat H.N., Anh N.T.M. Vietnamese text classification algorithm using long short term memory and word2vec. *Informatika i Avtomatizatsiya*. 2020;19(6):1255–1279. <https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.6.5>. EDN MFDPBK
15. Ogarok A.L., Zhavoronkova O.G. Methods of semantic processing of unstructured text information. *Informatizatsiya i svyaz' = Informatization and Communication*. 2022;(6):44–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2022-13-6-44-48>
16. Ogarok A.L. Mathematical model of the process of semantic processing of text information. *Informatizatsiya i svyaz' = Informatization and Communication*. 2021;(6):87–91. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2021-12-6-87-91>
17. Popov O.R., Grebenyuk E.V. Algorithms for constructing intelligent systems for processing text information for the problem of opinion analysis. *Intellectual'nye resursy – regional'nomu razvitiyu = Intellectual Resources for Regional Development*. 2021;(2):104–110.
18. Kazantsev A.A., Prokhorov M.V., Khudyakova P.S. Review of approaches to text classification using current methods. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi = Economics and Quality of Communication Systems*. 2021;1(19):57–67. (In Russ.) EDN ZUJEVN
19. Semina T.A. Analysis of text sentiment: modern approaches and existing problems. *Sotsial'nye i gumanitarnye nauki. Otechestvennaya i zarubezhnaya literatura. Seriya 6: Yazykoznanie = Social and Humanitarian Sciences. Domestic and Foreign Literature. Episode 6: Linguistics*. 2020;4:47–63. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Ефанов Сергей Валерьевич, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: nshysh@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-3117-5595

Sergei V. Efanov, Post-Graduate
Student, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: nshysh@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-3117-5595

Иванова Елена Николаевна, кандидат
технических наук, доцент кафедры
вычислительной техники, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: verksel@mail.ru,
ORCID: 0009-0003-4466-5928

Elena N. Ivanova, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Computer Science,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: verksel@mail.ru,
ORCID: 0009-0003-4466-5928

Чернецкая Ирина Евгеньевна, доктор
технических наук, заведующий кафедрой
вычислительной техники, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: white731@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-8254-9606

Irina E. Chernetskaya, Doctor
of Sciences (Engineering), Head
of the Department of Computer Science,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: white731@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-8254-9606

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-36-47>



UDC 004.82

Application of mathematical models in predicting drug dosage and its efficacy

Mohamed Chahine¹, Nikolaos Tzenios², Ksenia V. Zavidovskaya¹,
Lyudmila P. Lazurina¹ ✉, Yulia M. Dotsenko

¹ Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
3 Karl Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

² Charisma University, Grace Bay, Turks and Caicos Islands

✉ e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

Abstract

The purpose of the research is to form a comprehensive understanding of how mathematical models are used to interpret complex dynamics related to the distribution, metabolism and excretion of drugs in the human body. The use of mathematical models to predict the required dose of drug prescriptions and establish its effectiveness means a paradigm shift in the field of pharmacology.

Methods. The methodology used in this study was aimed at identifying and analytically reviewing articles that correspond to the objectives of the study. The publications included in the analysis were analyzed and data extracted, focusing on key information such as the mathematical modeling methodology used, the exact predicted treatment effects, the populations studied, long-term prognostic effects, and the assessment of the use of various drug dosing regimens.

Results. In total, 12 publications were analyzed, which used four different methodologies: models with the effects of several different conditions, models that take into account the occurrence of various discrete events, models based on the effects of informative signs taking into account the physiology of individuals, as well as survival models and generalized linear models.

Conclusion. The conducted study of the current state of mathematical modeling in medical research for the purpose of comparative effectiveness is intended for practicing scientists and doctors in conducting further research and introducing innovations. Despite the challenges, the potential impact of these models aimed at bridging the gap between the controlled clinical environment and the real health context is undeniable. The use of mathematical modeling methods to predict the dosage of medicines will improve the quality and effectiveness of personalized medical appointments in the coming years.

Keywords: mathematical modeling; forecasting; efficacy; drug.

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

For citation: Mohamed Chahine, Nikolaos Tzenios, Zavidovskaya K.V., Lazurina L.P., Dotsenko Y.M. Application of mathematical models in predicting drug dosage and its efficacy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the South-west State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(3):36–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-36-47>

Received 16.07.2024

Accepted 12.08.2024

Published 30.09.2024

© Mohamed Chahine, Nikolaos Tzenios, Zavidovskaya K. V., Lazurina L. P., Dotsenko Y. M., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024;14(3):36–47

Применение математических моделей для прогнозирования дозировки лекарств и их эффективности

Шехине Мохамад Туфик¹, Тзениос Николаос², К. В. Завидовская¹,
Л. П. Лазурина¹ ✉, Ю. М. Доценко¹

¹ Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

² Университет Харизмы, Грейс-Бей, острова Теркс и Кайкос

✉ e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

Резюме

Цель работы заключается в формировании всестороннего понимания того, как математические модели применяются для интерпретации сложной динамики, связанной с распределением, метаболизмом и выведением лекарств в организме человека. Использование математических моделей для прогнозирования необходимой дозы назначений лекарственных препаратов и установления его эффективности означает изменение парадигмы в области фармакологии.

Методы, использованные в данном исследовании, были направлены на выявление и аналитический обзор статей, соответствующих целям исследования. Публикации, включенные в анализ, были подвергнуты анализу и извлечению данных, сосредоточив внимание на ключевой информации, такой как используемая методология математического моделирования, точные прогнозируемые эффекты лечения, изучаемые популяции, долгосрочные прогностические эффекты и оценка применения различных режимов дозирования препаратов.

Результаты. Всего было проанализировано 12 публикаций, в которых использовались четыре различные методологии: модели с воздействием нескольких различных состояний; модели, учитывающие возникновение разнообразных дискретных событий; модели, основанные на воздействии информативных признаков с учетом физиологии индивидов, а также модели выживания и обобщенные линейные модели.

Заключение. Проведенное исследование текущего состояния математического моделирования в медицинских исследованиях с целью сравнительной эффективности предназначено для практикующих научных работников и врачей при проведении дальнейших исследований и внедрении инноваций. Несмотря на существование проблем, потенциальное влияние этих моделей направлено на преодоление разрыва между контролируемой клинической средой и реальным контекстом здравоохранения неоспоримо. Применение математических методов моделирования для прогнозирования дозировки лекарственных средств позволит повысить качество и эффективность персонализированных медицинских назначений в ближайшие годы.

Ключевые слова: математическое моделирование; прогнозирование; эффективность; лекарственные назначения.

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

Для цитирования: Возможность интеграции нейроинтерфейсов для создания комбинированной системы управления протезами: краткий обзор / Шехине Мохамад Туфик, Тзениос Николаос, К. В. Завидовская, Л. П. Лазурина, Ю. М. Доценко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 36–47. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-36-47>

Поступила в редакцию 16.07.2024

Подписана в печать 12.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Introduction

Within the dynamic realm of pharmaceutical research and clinical practise, the

optimisation of drug dosages emerges as a crucial and central obstacle. The advancement of novel methodologies that reconcile

scientific knowledge with patient well-being has been motivated by the objective of optimising therapeutic effectiveness while mitigating potential negative outcomes. The core of this revolutionary approach is centred around the utilisation of mathematical models, which has brought about a significant change in our comprehension of pharmacokinetics, pharmacodynamics, and the personalised reaction to medication treatment.

For decades, pharmacologists, doctors, and researchers have been captivated by the complex interplay between drug dosage and efficacy. The persistent problem has prompted the emergence of mathematical models as a potent tool that not only enriches our understanding of drug behaviour within the human body but also facilitates accurate forecasts of optimal dosages customised for specific patients.

This paper undertakes a thorough investigation of the "Utilisation of mathematical models for the purpose of predicting drug dosage and evaluating its effectiveness". As we navigate the complex terrain of mathematical modelling in the realm of medication dosage prediction, it becomes evident that the integration of computational methodologies and pharmaceutical sciences is not just a choice, but a need in our quest for enhanced safety and efficacy in pharmacological treatments.

A mathematical model functions as an outline for comprehending and simulating natural occurrences or intricate systems [1]. The utilisation of these models is of great significance as they serve as indispensable instruments for acquiring insights and knowledge pertaining to the system they depict. Mathematical models are of great significance in the field of drug development.

Physiology-based models provide a comprehensive comprehension of the biological mechanisms involved, aiding researchers in establishing appropriate initial dosages for experimental pharmaceuticals [2].

Pharmacokinetic and pharmacodynamic models take into account the processes of drug absorption, distribution, metabolism, and elimination inside the body, as well as the impact of these medications on physiological systems. With the assistance of these individuals, researchers are able to optimise the dosages utilised in subsequent investigations, so guaranteeing the appropriate quantity of the medication is administered to achieve optimal therapeutic efficacy while minimising any adverse reactions. The disparity between the results obtained from randomised controlled trials (RCTs) and the actual impact observed in real-world situations has been referred to as the "efficacy-effectiveness gap" [3]. Various strategies have been proposed to address this disparity and to forecast the practical efficacy of randomised controlled trials (RCTs) based on evidence synthesis models. Mathematical models have the capacity to simulate the progression of a disease for either an individual or a cohort of patients, considering different interventions and conditions.

This work aims to provide a comprehensive understanding of how mathematical constructs facilitate the interpretation of complex dynamics associated with drug distribution, metabolism, and elimination in the human body. This application facilitates a dynamic collaboration between the disciplines of mathematics and medicine, the integration of data and decision-making processes, and the convergence of scientific advancements with patient care. The utilisation of these models and the effective

management of pharmacological therapy in an ever-changing landscape is a shared obligation, necessitating precision, empathy, and a steadfast dedication to the welfare of the individuals under our care.

Materials and methods

The methodology employed in this research focused on identifying and selecting articles that meet specific criteria aligned with the research objectives.

Articles were considered eligible if they applied any mathematical modeling approach to make predictions concerning treatment effects. The anticipated purpose of these models was to offer valuable insights into dimensions that were not explicitly examined in the current Randomised Controlled Trials (RCTs). The scope of predictions encompassed articles that provided prognostications regarding the impact of treatments on variables that extended beyond those specifically investigated in previous randomised controlled trials (RCTs). This entailed prognostications pertaining to diverse demographics, diverse healthcare environments, enduring consequences, or diverse administration schedules.

Articles that failed to explicitly discuss the shift from treatment efficacy, as assessed in controlled clinical trial environments, to the real-world application of treatment effectiveness were not included in the analysis. This criterion ensured that the selected research were focused on bridging the gap between controlled clinical environments and real healthcare contexts.

In order to ascertain pertinent publications, an exhaustive review of the literature was undertaken across many scholarly databases, including PubMed, Web of Science, Scopus, and pertinent medical journals, among others. The search technique

comprised a combination of keywords and controlled language topics linked to mathematical modeling, therapeutic effects, prediction, populations, locations, long-term results, and dosing regimens. The utilisation of Boolean operators, specifically AND and OR, was employed in order to enhance the precision of the search queries and guarantee their relevancy.

Articles that did not satisfy the inclusion criteria or were clearly excluded were omitted. The remaining items were subjected to a comprehensive examination of their complete texts.

The publications included in the analysis were subjected to data extraction, focusing on key information such as the mathematical modelling methodology employed, the precise treatment effects projected, the populations or locations being studied, the long-term results investigated, and the various dosage regimens evaluated.

A quality assessment was conducted on each chosen article to assess the rigour and validity of the mathematical modelling approach and the methodology used to address the gap between efficacy and effectiveness. The objective of this study was to ascertain the dependability of the predictions generated by the modelling process.

Results and their discussion

Four articles employed multi-state models. The models under consideration are characterised as time-dependent stochastic processes, wherein a discrete collection of potential outcomes, sometimes referred to as states, are defined. The model provides an explanation of the probability associated with transitioning from one condition to another. A distinction is made between population-level and individual-level multi-state models. The latter are

alternatively referred to as microsimulation models (MSMs) [4]. Both population-level models and Microsimulation Models (MSMs) frequently exhibit a characteristic known as the Markov property. This property implies that the transition probabilities between different states are considered to be independent of the past, given the current state. In the realm of population health research, Markov cohort models, also known as population-level multi-state Markov models, are widely utilized for analytical purposes.

Population-level multi-state models offer a robust framework for examining the transitions between various health states within a given population. These models provide insight into the enduring effects of medication therapies, enabling a thorough assessment of the influence of dose approaches on overall health results. Briggs and Sculpher assert that population level multi-state models are highly appropriate for the purpose of simulating the progression of chronic diseases [5]. The patient's clinical condition or health status is characterised by many states. The states are considered to be mutually exclusive, indicating that it is not possible for a patient to simultaneously exist in many states. There are two types of models: discrete models and continuous-time models.

In discrete-time models, transitions occur exclusively at specific time intervals. The temporal duration between consecutive time points can be referred to as a cycle, while the likelihood of transitioning from one state to another during a single cycle is denoted as the transition probability. In a theoretical framework consisting of a set of n states, the whole set of potential transition probabilities can be represented and organised in a transition matrix with dimensions

$(n \times n)$. Certain transitions may be prohibited, resulting in a zero value in the matrix. This reduces the number of probabilities that need to be evaluated. For instance, individuals in a deceased state are unable to undergo more transitions.

Microsimulation models (MSM) are utilised to replicate the life paths of individual patients, encompassing the complexities inherent in their distinct experiences within the healthcare system. The use of mathematical simulation models (MSMs) has been employed in the examination of health policy inquiries pertaining to many medical conditions, including cancer screening and the management of diabetes, cardiovascular disease, stroke, osteoporosis, and liver disease [6]. Multistate models (MSMs) can be classified into two categories: discrete-time models and continuous-time models.

We have identified two articles through the utilisation of mainstream media (MSM). In their study, Smolen et al. made predictions regarding the likelihood of stroke within a span of five years for a cohort of individuals diagnosed with asymptomatic carotid artery stenosis. The researchers employed a simulation approach using discrete states to estimate the occurrence and timing of patient mortality or stroke events. To establish the accuracy of the model, the authors conducted a comparison between the model's predictions and the observed stroke-free survival rates and stroke occurrences in a population that was similar in nature.

Discrete event simulation models provide a detailed viewpoint on patient experiences by simulating healthcare events as distinct entities. Through this action, they offer significant contributions to the understanding of clinical workflow dynamics and

the impact of various dosage regimens on patient trajectories. The utilisation of discrete event simulation enables the integration of discrete and continuous outcomes [7]. Examples of events may include strokes, fluctuations in blood pressure, emergence of new lesions on magnetic resonance imaging, or advancement on the extended disability status scale. The Markov property may or may not be present in DES models. The DES models offer a structured approach for conducting stochastic simulations at the individual level.

The utilisation of discrete event simulation models has been a prevalent practise in the field of operations research for an extended period of time, as highlighted by Guo et al. [8] This approach is particularly valuable in addressing the challenge of resource allocation within a context of limited availability.

Physiology-based models extensively explore the molecular foundations of drug behavior within the human body. These models take into account physiological processes, drug distribution specific to organs, and complex pharmacokinetic-pharmacodynamic connections in order to forecast drug concentrations at the cellular and tissue levels. Physiology-based models enable the ongoing modelling of disease-relevant systems in a human person over time. The Archimedes Model, as described by Schlessinger and Eddy, is an illustrative instance of a physiology-based model that employs algebraic and ordinary differential equations to depict fundamental elements of human physiology, disease, and the reaction to medical interventions [9]. Continuous functions are used to explain the biological variables and their interactions, allowing for varying values at different points in time, as opposed to a fixed number of states

or discrete occurrences [10]. The biomarker values of each patient, such as blood pressure, cholesterol, bone mineral density, patency of coronary arteries, contractility of the myocardium, and cardiac output, have the potential to vary over time. The selection of the model design is determined by the biological characteristics of the disease, the mechanism via which the intervention operates, and the data that is accessible.

At present, Archimedes encompasses a range of indications including coronary artery disease, diabetes and its associated consequences, congestive heart failure, stroke, and hypertension [11]. One potential use of this approach is the evaluation of various therapies, guidelines, or disease management programmes. By including comorbidities, it becomes possible to make predictions about long-term results or outcomes within distinct populations. The process of validation was conducted by juxtaposing the results of the model with the data derived from significant clinical studies [12].

In the study conducted by Schuetz et al., the Archimedes Model was employed to forecast the potential outcomes of varying dosages and types of statins (namely, rosuvastatin 20 mg vs. atorvastatin 40 mg and rosuvastatin 40 mg vs. atorvastatin 80 mg) in terms of the occurrence of initial major cardiovascular events among individuals diagnosed with diabetes [13].

Survival models and generalized linear models are statistical methodologies that offer frameworks for the analysis of time-to-event data and the examination of the association between variables and pharmacological responses. These findings provide a strong basis for comprehending the influence of various dosages on the outcomes of survival and other related measures.

The utilisation of predictive models that extend beyond the limited follow-up period provided by randomised controlled trials (RCTs) is valuable in informing decisions pertaining to pharmaceuticals and other medical procedures [14]. Survival analysis employs several methodologies, including nonparametric methods such as the Kaplan-Meier estimator, semi-parametric methods like Cox regression, and parametric methods based on survival distributions such as the exponential, Weibull, Gompertz, and others.

Two research were identified that utilised survival models in order to forecast the relative effectiveness. In their study, Clarke et al. utilised simulations grounded in multiple survival models to predict the prevalence of significant complications and mortality associated with diabetes [15]. The interventions consisted of two different regimens for controlling blood glucose levels: intense and conventional. The outcomes of patients who were randomly assigned to either conventional or intensive blood glucose control in the UKPDS study [16] were predicted by the model over their lives. In their study, Clarke et al. employed proportional hazards Weibull regression to analyse the occurrence of diabetes-related complications [17]. Additionally, logistic and Gompertz regression models were utilised to examine diabetes-related mortality. The researchers conducted a comparison between the projected cumulative occurrence of various complications and mortality rates with the actual cumulative occurrence. This was accomplished by employing non-parametric (life table) methodologies for calculation.

The conventional assumption in linear models is that the dependent variable is characterised by continuity and follows a

normal distribution. Generalised linear models (GLMs) are an extension of linear models that allow for the analysis of data with response variables that do not follow a normal distribution. The listed research employ extrapolation techniques to predict outcomes over extended timeframes beyond the scope of the randomised controlled trials (RCTs) under consideration.

In their study, Hughes and Dubois employed a Generalised Linear Model (GLM) to make predictions on the efficacy and expenses associated with various therapies for overactive bladder and urge urine incontinence, taking into account the temporal dimension [18]. The study involved a comparison of oxybutynin extended-release and tolterodine extended-release, as well as tolterodine immediate-release, oxybutynin immediate-release, and placebo. The estimation of the frequency of incontinent episodes per week was conducted using a negative binomial distribution function. This estimation was based on individual patient data obtained from many randomised controlled trials, with a median treatment length of 4-5 weeks. The estimated frequency was then extrapolated to represent a one-year period. The data pertaining to adverse events was obtained from randomised controlled trials (RCTs). Multiple sensitivity assessments were conducted. In order to assess internal validation, the projected values were compared to the observed data. No external validation was conducted.

The application of mathematical models in the prediction of drug dose and effectiveness is a continuously expanding and dynamic area of study that holds the potential to revolutionise the processes of drug development, testing, and administration. Within this discourse area, we shall explore the fundamental discoveries, ramifications,

and obstacles that emerge from the use of diverse mathematical models in the field of pharmacology and personalised medicine.

Mathematical models, including physiology-based models and pharmacokinetic-pharmacodynamic models, are of great significance in optimising the process of drug development. These models enable researchers to make decisions based on data throughout all stages of the research process, ranging from preclinical investigations to clinical trials. Through the utilisation of these models, the pharmaceutical sector has the capacity to mitigate the expensive and time-intensive elements associated with drug development, leading to enhanced operational efficiency and potentially expedited availability of groundbreaking therapeutic interventions.

One of the most notable advantages of mathematical modelling is in its potential to make significant contributions to the field of personalised medicine. Through the incorporation of patient-specific data encompassing genetics, demographics, and clinical characteristics, these models facilitate the customization of drug dosages and treatment regimens to suit the unique needs of individual patients. This technique not only improves the effectiveness of therapy but also reduces the occurrence of negative side effects, so promoting the emergence of a new age in precision medicine. With the accumulation of further patient data and the advancement of modelling approaches, it is foreseeable that there will be an enhanced level of customization in medication therapy.

Each of the research presented in the analysis exhibited certain limitations. One of the primary limitations lies in the absence of validation regarding the prediction performance of the utilised models. Among

the models examined, a mere three models conducted external validation by employing data distinct from that which was utilised throughout the model's development. The availability or accessibility of appropriate data for external assessment may have been limited or challenging. However, it is important to note that the absence of external validation is a significant constraint, as highlighted by Altman et al. [19] Decisions must not to be predicated upon forecasts derived from inadequately verified models.

Another constraint pertains to the Markov assumption. A significant number of the models were dependent on the utilisation of the Markov property. This was seen to be true even for models that are based on microsimulation or discrete event simulation (DES), which do not need the need for this assumption. The evolution of diseases is a multifaceted phenomenon, and the incorporation of dependence structures that utilise historical data is frequently crucial in constructing simulation models that accurately reflect reality. One possible approach to tackle this matter could involve the utilisation of random effects, as suggested by Karon et al. [20] Models can be formulated in a manner that ensures the Markov assumption is valid, given a certain set of random effects that are not directly seen.

Although mathematical models provide significant potential, they are not devoid of obstacles. The challenges surrounding data quality and availability continue to be of utmost importance. The precision of model predictions is dependent upon the calibre and volume of input data. Maximising the utility of these models necessitates the assurance of data integrity and accessibility. In addition, it is important to note that model validation is a continuous process. To ensure the reliability and accuracy

of model-driven decisions, it is imperative to establish standardised validation techniques.

Ethical considerations assume significant importance, particularly within the realm of personalised treatment. The utmost importance is in safeguarding privacy, ensuring informed consent, and upholding appropriate practises in the utilisation of patient data. The establishment of explicit ethical rules and regulations is of utmost importance in order to effectively manage the utilisation of sensitive medical information within the context of mathematical modelling.

The seamless integration of mathematical models into clinical practise is crucial in order to fully harness their potential. Healthcare practitioners greatly benefit from the utilisation of Clinical Decision Support Systems (CDSS) that integrate these models. Nevertheless, the achievement of successful integration necessitates more than just the establishment of technology infrastructure. It also calls for comprehensive training and education programmes to guarantee that healthcare practitioners possess the necessary skills to accurately understand and use insights obtained from models in the context of actual patient care.

The potential for mathematical modelling to play a significant role in predicting drug dosage and assessing efficacy is highly encouraging. Continuing research is expected to further improve current models, incorporate novel methodologies, and deepen our comprehension of intricate pharmacological mechanisms. Enhanced data gathering techniques, such as the incorporation of real-world evidence, will serve to enhance the precision and reliability of these models. Furthermore, it is imperative to emphasise the significance of multidisciplinary

collaboration among mathematicians, doctors, and regulatory agencies in order to facilitate the ongoing advancement and acceptance of these models.

Conclusions

The use of mathematical models into the domains of pharmacology and healthcare signifies a significant advancement, holding the potential to revolutionise drug development, patient care, and personalised medicine. As the conclusion of this examination of mathematical modelling approaches nears, it is vital to contemplate the significant ramifications, advancements, and obstacles that have arisen as a result of effectively utilising these models.

The utilisation of mathematical models has significantly transformed the approach to medication development. Physiology-based models have played a crucial role in facilitating the identification of safe starting doses, while pharmacokinetic and pharmacodynamic models have been important in optimising dosages for clinical investigations. The utilisation of these models has significantly expedited the drug development process and resulted in cost reduction. Through the facilitation of data-driven decision-making, chatbots have become essential assets in the pharmaceutical industry's pursuit of innovation and operational effectiveness.

In our research, we observed a relatively limited number of studies that successfully bridged the gap between the efficacy data derived from Randomized Controlled Trials (RCTs) and the real-world effectiveness of drug interventions using mathematical models. Despite this, our comprehensive review of relevant models and their applications offers valuable insights for readers aiming to develop a

deeper understanding of the current landscape of mathematical modeling in predicting the relative effectiveness of drug interventions within the realm of comparative effectiveness research.

A notable finding from our review is that many of the identified models, which successfully navigate the transition from efficacy to real-world effectiveness, are Markov multi-state models. While these models have proven effective in numerous instances, we recognize that they are not the sole approach available. Physiology-based models, though theoretically promising, come with their own set of challenges. The development of such models demands an extensive amount of information and substantial effort. These highly intricate structures may be most suitable for scenarios where copious data and comprehensive biological knowledge are readily accessible.

Looking ahead, we anticipate significant growth in predictive modeling within comparative effectiveness research. Both in terms of applications and methodological

advancements, this field is poised for expansion. As technology continues to evolve and our understanding of biological processes deepens, we foresee a proliferation of innovative modeling approaches. This growth will be instrumental in informing healthcare decisions, optimizing treatment strategies, and ultimately improving patient outcomes.

In conclusion, our examination of the current landscape of mathematical modeling in comparative effectiveness research reveals opportunities for further exploration and innovation. While challenges exist, the potential impact of these models in bridging the gap between controlled clinical environments and real-world healthcare contexts is undeniable. We encourage researchers, clinicians, and policymakers to embrace and contribute to the burgeoning field of predictive modeling, as it holds the promise of enhancing the quality and effectiveness of healthcare interventions in the years to come.

References

1. Hartmanshenn C., Scherholz M., Androulakis I.P. Physiologically-based pharmacokinetic models: approaches for enabling personalized medicine. *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*. 2016;(43):481–504.
2. Marsousi N., Desmeules J.A., Rudaz S., Daali Y. Usefulness of PBPK Modeling in Incorporation of Clinical Conditions in Personalized Medicine. *J. Pharm. Sci.* 2017;106(9):2380–2391.
3. Krauss M., Tappe K., Schuppert A., Kuepfer L., Goerlitz L. Bayesian Population Physiologically-Based Pharmacokinetic (PBPK) Approach for a Physiologically Realistic Characterization of Interindividual Variability in Clinically Relevant Populations. *PLoS One*. 2015;10(10):0139423. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139423>
4. Fan C., Basharat Z., Mah K., Wei C.R. Computational approach for drug discovery against *Gardnerella vaginalis* in quest for safer and effective treatments for bacterial vaginosis. *Sci. Rep.* 2024;14(1):17437. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68443-2>
5. Djuris J., Cvijic S., Djekic L. Model-Informed Drug Development: In Silico Assessment of Drug Bioperformance following Oral and Percutaneous Administration. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2024;17(2):177. <https://doi.org/10.3390/ph17020177>

6. Wang Y., Zhu H., Madabushi R., Liu Q., Huang S.M., Zineh I. Model-informed drug development: Current US regulatory practice and future considerations. *Clin. Pharmacol. Ther.* 2019;105(4):899–911. <https://doi.org/10.1002/cpt.1363>
7. Cvijić S., Ignjatović J., Parojčić J., Ibrić S. The emerging role of physiologically-based pharmacokinetic/biopharmaceutics modeling in formulation development. *Arh. Farm.* 2021;71:318–335. <https://doi.org/10.5937/arhfarm71-32479>
8. Kesisoglou F., Chung J., van Asperen J., Heimbach T. Physiologically based absorption modeling to impact biopharmaceutics and formulation strategies in drug development-industry case studies. *J. Pharm. Sci.* 2016;105(9):2723–2734. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2015.11.034>
9. Abbiati R.A., Manca D. A modeling tool for the personalization of pharmacokinetic predictions. *Comput. Chem. Eng.* 2016;91:28–37. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.008>
10. Dar K.B., Bhat A.H., Amin S., Hamid R., Anees S., Anjum S., Reshi B.A., Zargar M.A., Masood A., Ganie S.A. Modern Computational Strategies for Designing Drugs to Curb Human Diseases: A Prospect. *Curr. Top. Med. Chem.* 2018;18(31):2702–2719.
11. Singh K., Bhushan B., Singh B. Advances in Drug Discovery and Design using Computer-aided Molecular Modeling. *Curr. Comput. Aided. Drug. Des.* 2024;20(5):697–710. <https://doi.org/10.2174/1573409920666230914123005>
12. Razia I.T., Kanwal A., Riaz H.F., Malik A., Ahsan M., Khan M.S., Raza A., Sabir S., Sajid Z., Khan M.F., Tahir R.A., Sehgal S.A. Recent Trends in Computer-aided Drug Design for Anti-cancer Drug Discovery. *Curr. Top. Med. Chem.* 2023;23(30):2844–2862.
13. Hasan R., Alsaiari A.A., Fakhurji B.Z., Molla M.H.R., Asseri A.H., Sumon A.A., Park M.N., Ahammad F., Kim B. Application of Mathematical Modeling and Computational Tools in the Modern Drug Design and Development Process. *Molecules.* 2022;27(13):4169.
14. Atanasov A.G., Zotchev S.B., Dirsch V.M., Orhan I.E., Banach M., Rollinger J.M., Barreca D., Weckwerth W., Bauer R., Bayer E.A., et al. Natural Products in Drug Discovery: Advances and Opportunities. *Nat. Rev. Drug. Discov.* 2021;20:200–216.
15. Atanasov A.G., Waltenberger B., Pferschy-Wenzig E.M., Linder T., Wawrosch C., Uhrin P., Temml V., Wang L., Schwaiger S., Heiss E.H., et al. Discovery and Resupply of Pharmacologically Active Plant-Derived Natural Products: A Review. *Biotechnol. Adv.* 2015;33:1582–1614.
16. Li C.Q., Lei H.M., Hu Q.Y., Li G.H., Zhao P.J. Recent Advances in the Synthetic Biology of Natural Drugs. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2021;9:640. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021>
17. Rudrapal M., Khairnar S.J., Jadhav A.G. Drug Repurposing (DR): An Emerging Approach in Drug Discovery. In: *Drug Repurposing*. IntechOpen; 2020. 234 p.
18. Biala G., Kedzierska E., Kruk-Slomka M., Orzelska-Gorka J., Hmaidan S., Skrok A., Kaminski J., Havrankova E., Nadaska D., Malik I. Research in the Field of Drug Design and Development. *Pharmaceuticals (Basel).* 2023;16(9):1283.
19. Gunnarsson E.B., Kim S., Choi B., Schmid J.K., Kaura K., Lenz H.J., Mumenthaler S.M., Foo J. Understanding patient-derived tumor organoid growth through an

integrated imaging and mathematical modeling framework. *PLoS. Comput. Biol.* 2024;20(8):e1012256.

20. Ncube N.B., Tukulula M., Govender K.G. Leveraging computational tools to combat malaria: assessment and development of new therapeutics. *J. Cheminform.* 2024;16(1):50.

Информация об авторах / Information about the Authors

Shehine Mohamad Tufik, Associate Professor of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kursk, Russian Federation, e-mail: chahine@kursksmu.net, ORCID: 0000-0001-8504-2418

Nikolaos Tzenios, Professor of Public Health and Medical Research, Charisma University, Grace Bay, Turks and Caicos Islands, e-mail: chahine@kursksmu.net, ORCID: 0000-0002-6679-2296

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

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

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

Шехине Мохамад Туфик, доцент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: chahine@kursksmu.net, ORCID: 0000-0001-8504-2418

Тзениос Николаос, профессор общественного здравоохранения и медицинских исследований, Университет Харизмы, Грейс-Бей, острова Теркс и Кайкос, e-mail: chahine@kursksmu.net, ORCID: 0000-0002-6679-2296

Ксения В. Завидовская, ассистент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knvz@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0786-4533

Юлия М. Доценко, ассистент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yuliadoczenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8458-9083

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

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-48-62>



УДК 004.932

Информационно-вычислительная система на основе смарт-контрактов для проведения онлайн-голосований

А. А. Герасев¹, И. Н. Ефремова²✉, И. С. Архипова², Р. Н. Камалов²

¹ Компьютерная академия ТОР
ул. Ленина, д. 60, г. Курск 305000, Российская Федерация

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

✉ e-mail: efremova-in@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Актуальной проблемой в системах голосования является непредотвращение мошенничества и необеспечение честности выборов. Поэтому актуальна задача построения системы безопасных и прозрачных голосований.

Цель исследования – спроектировать и разработать информационно-вычислительную систему на основе смарт-контрактов для проведения онлайн-голосований.

Методы. Представленная система имеет вид децентрализованной системы, которая может преодолеть ряд ограничений, таких как вероятность человеческой ошибки, фальсификации результатов голосования и проблемы с доступностью, используя технологию блокчейн, которая обеспечивает защиту от несанкционированного доступа и прозрачное ведение записей.

Использование технологии смарт-контрактов также гарантирует, что процесс голосования будет автоматизированным, прозрачным и безопасным. Благодаря возможности выполнять самовыполняющиеся контракты на основе predetermined правил, смарт-контракты могут устранить необходимость в посредниках, снизить вероятность ошибок и обеспечить высокую степень подотчетности.

Результаты. Для того чтобы оценить эффективность разработанной системы, было проведено тестирование, после чего произведен сравнительный анализ с другими аналогичными системами.

Система может гарантировать, что голоса подсчитаны точно, и ими нельзя манипулировать, тем самым повышая доверие к результатам процесса голосования. Кроме того, система потенциально может снизить затраты, связанные с традиционными методами голосования, и улучшить доступность для избирателей, поскольку к ней можно получить удаленный доступ через веб-интерфейс.

В целом система будет интересна различным организациям и частным лицам, стремящимся провести безопасные и прозрачные процессы голосования.

Заключение. Использование данного программного продукта обеспечит безопасность и удобство при участии в различных онлайн-голосованиях, надежное хранение голосов избирателей и предоставление детальной статистики по проведенным голосованиям.

Ключевые слова: блокчейн; ethereum; смарт-контракт; транзакция; информационно-вычислительная система; проектирование.

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

Для цитирования: Информационно-вычислительная система на основе смарт-контрактов для проведения онлайн-голосований / А. А. Герасев, И. Н. Ефремова, И. С. Архипова, Р. Н. Камалов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 48–62. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-48-62>

Поступила в редакцию 11.07.2024

Подписана в печать 10.08.2024

Опубликована 30.09.2024

© Герасев А. А., Ефремова И. Н., Архипова И. С., Камалов Р. Н., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024;14(3):48–62

Information and computing system based on smart contracts for online voting

Alexey A. Gerasyov¹, Irina N. Efremova²✉,
Izabella S. Arhipova², Ruslan N. Kamalov²

¹ TOP Computer Academy
60 Lenina Str., Kursk 305000, Russian Federation

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

✉ e-mail: efremova-in@inbox.ru

Abstract

The purpose of research. The actual problem in voting systems is not the prevention of fraud and the failure to ensure the integrity of elections. Therefore, the task of building a system of safe and transparent voting is urgent.

The purpose of the research is design and develop an information and computing system based on smart contracts for online voting.

Methods. The presented system has the form of a decentralized system that can overcome a number of limitations, such as the likelihood of human error, falsification of voting results and problems with accessibility, using blockchain technology, which provides protection against unauthorized access and transparent record keeping.

The use of smart contract technology also ensures that the voting process will be automated, transparent and secure. Thanks to the ability to execute self-executing contracts based on predefined rules, smart contracts can eliminate the need for intermediaries, reduce the likelihood of errors and ensure a high degree of accountability.

Results. In order to evaluate the effectiveness of the developed system, testing was carried out, after which a comparative analysis was made with other similar systems.

The system can ensure that votes are counted accurately and cannot be manipulated, thereby increasing confidence in the results of the voting process. In addition, the system can potentially reduce the costs associated with traditional voting methods and improve accessibility for voters, since it can be accessed remotely via a web interface.

In general, the system will be of interest to various organizations and individuals seeking to conduct safe and transparent voting processes.

Conclusion. The use of this software product will provide security and convenience when participating in various online voting, reliable storage of votes and the provision of detailed statistics on the conducted voting.

Keywords: blockchain; ethereum; smart contract; transaction; information and computing system; design.

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

For citation: Gerasyov A.A., Efremova I.N., Arhipova I.S., Kamalov R.N. Information and computing system based on smart contracts for online voting. *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(3):48–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-48-62>

Received 11.07.2024

Accepted 10.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

С развитием технологий возрастает потребность в создании систем голосования, которые объединяют в себе безопасность и прозрачность, способствуя честности выборов и предотвращению

возможных случаев мошенничества [1]. Традиционные методы голосования подвержены недостаткам, таким как возможность человеческих ошибок, риски фальсификации результатов голосования и ограничения в доступности [2].

Однако развивающиеся децентрализованные системы голосования могут эффективно преодолеть эти ограничения, применяя блокчейн-технологии, которая гарантирует защиту от несанкционированного доступа и обеспечивает прозрачное ведение записей [3].

Использование технологии смарт-контрактов также обеспечивает автоматизацию, прозрачность и безопасность голосования [4]. Благодаря возможности создания контрактов, которые выполняются автоматически на основе заданных правил, смарт-контракты могут исключить необходимость посредников, уменьшить вероятность ошибок и обеспечить высокую степень ответственности [4].

Также пандемия COVID-19 подчеркнула потребность в удобных и доступных системах голосования на

расстоянии. Децентрализованные системы голосования предоставляют безопасный и доступный способ для граждан [5], позволяя им голосовать, не выходя из дома и не посещая физически избирательные участки [6]. В целом направление имеет важное значение [7], так как третирует актуальную проблему – необходимость безопасных и прозрачных систем голосования, способствующих честному проведению выборов и обеспечению большей доступности для избирателей [8; 9].

В таблице 1 представлены требования высокого уровня к программе (ТВУ). Они представляют собой функциональные требования к программной среде, содержащиеся в техническом задании.

В таблице 2 рассмотрим требования низкого уровня к программе.

Таблица 1. Требования высокого уровня к программе

Table 1. High level requirements for the program

Номер ТВУ	Содержание ТВУ
ТВУ-1	Возможность просмотра списка всех голосований
ТВУ-2	Возможность получить информацию о конкретном голосовании
ТВУ-3	Возможность создать новое голосование
ТВУ-4	Возможность проголосовать за кандидата
ТВУ-5	Возможность просмотра результатов голосования
ТВУ-6	Возможность автозавершения голосования
ТВУ-7	Возможность ручного завершения голосования

Таблица 2. Требования низкого уровня к программе

Table 2. Low level requirements for the program

Номер ТВУ	Содержание ТВУ
ТВУ-1	Каждый пользователь должен подключить аккаунт перед просмотром списка всех голосований
ТВУ-2	Каждый пользователь должен иметь определенное количество криптовалюты для оплаты комиссии
ТВУ-3	Каждый пользователь должен установить параметры при создании нового голосования
ТВУ-4	Каждый зарегистрированный в голосовании пользователь может проголосовать
ТВУ-5	Каждый пользователь может ознакомиться с результатами любого голосования
ТВУ-6	Каждый пользователь может узнать время окончания голосования

Материалы и методы

Блокчейн – это общедоступная база данных, которая обновляется и совместно используется многими компьютерами в сети [10].

Блок относится к данным и состоянию, хранящимся в последовательных группах, известных как *блоки*. Если вы отправляете ЕТН кому-то другому, данные

транзакции должны быть добавлены в блок, чтобы она была успешной [11].

Цепочка относится к тому факту, что каждый блок криптографически ссылается на своего родителя. Другими словами, блоки соединяются цепочкой вместе. Данные в блоке не могут быть изменены без изменения всех последующих блоков [12], что потребовало бы консенсуса всей сети (рис. 1).

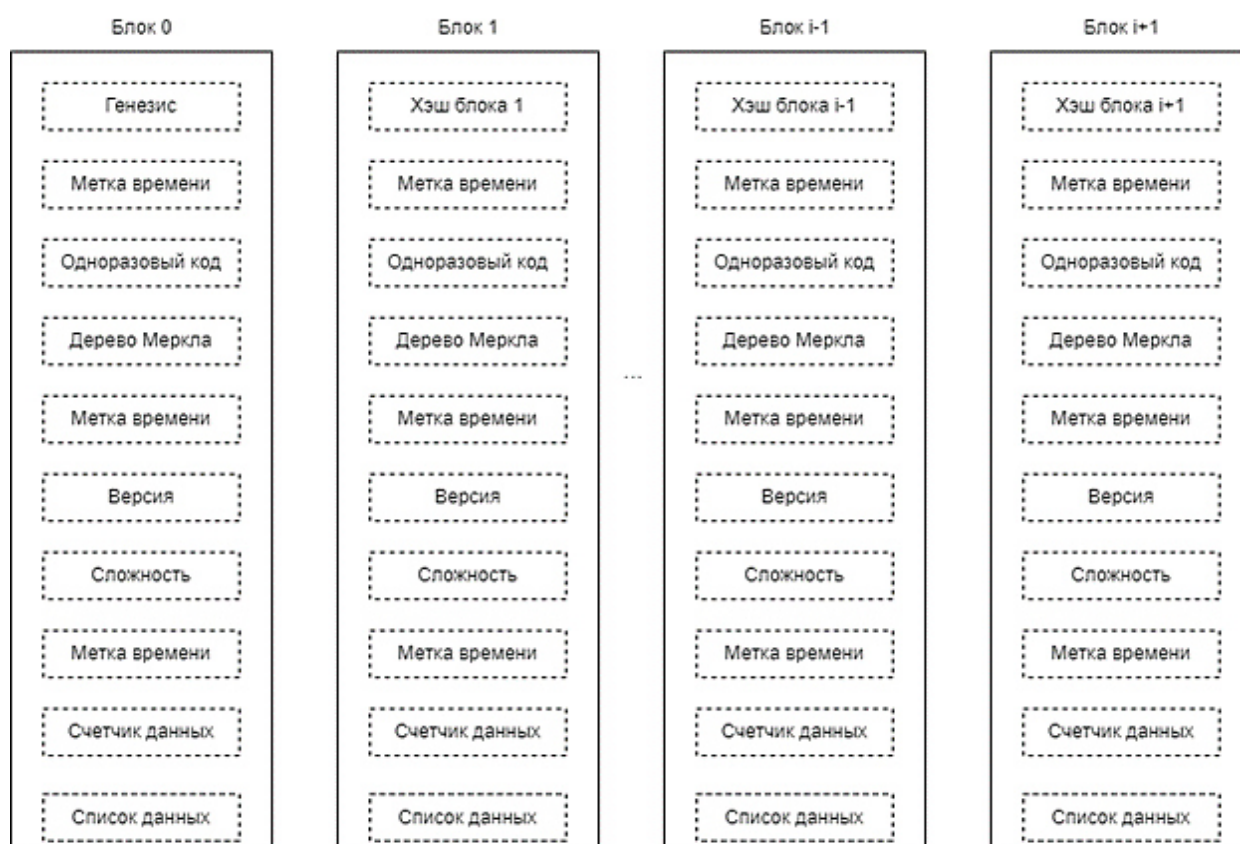


Рис. 1. Схематичное представление структуры блокчейна

Fig. 1. Schematic representation of the blockchain structure

Каждый компьютер в сети должен согласовать каждый новый блок и цепочку в целом. Эти компьютеры известны как *узлы*. Узлы гарантируют, что все, кто взаимодействует с блокчейном, имеют одинаковые данные. Чтобы

выполнить это распределенное соглашение, блокчейнам необходим механизм консенсуса [13; 14].

Существуют несколько методов принятия решений на основе консенсуса. Ethereum использует механизм

консенсуса, основанный на доказательстве доли участия [15]. Любой, кто хочет добавить новые блоки в цепочку, должен внести ЕТН – родную валюту Ethereum – в качестве залога и запустить программное обеспечение для проверки. Затем эти *валидаторы* могут быть

выбраны случайным образом, чтобы предложить блоки, которые другие валидаторы проверяют и добавляют в блокчейн. Существует система поощрений и штрафов, которые сильно стимулируют участников быть честными и максимально доступными онлайн (рис. 2).

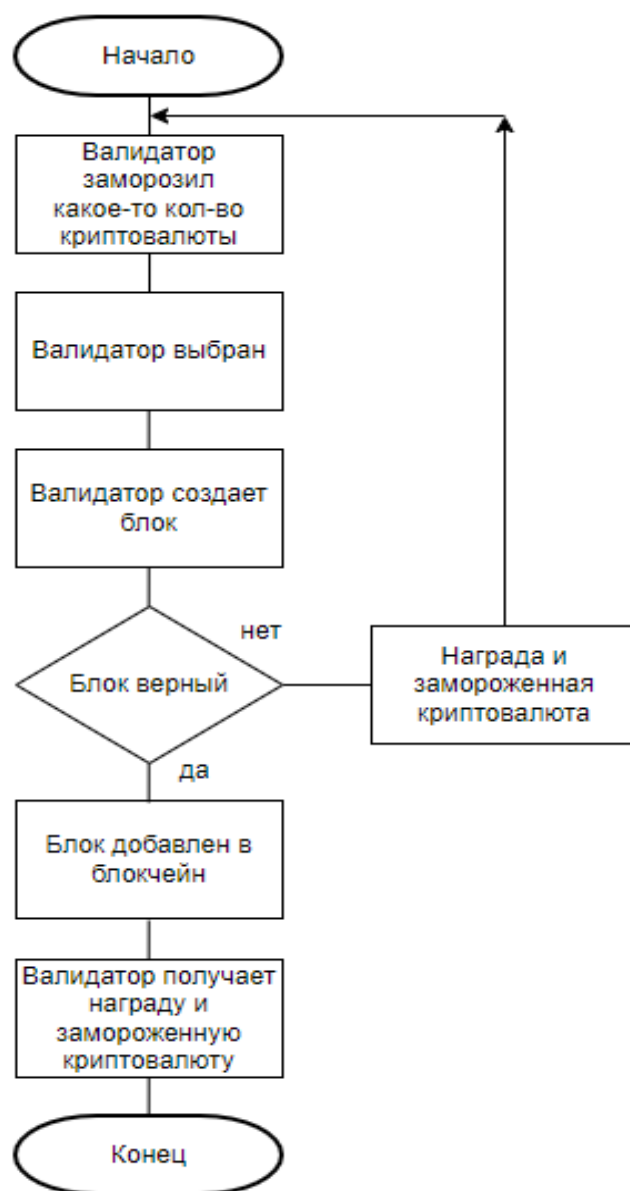


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычитание фона [16]

Fig. 2. Background subtraction algorithm flowchart [16]

При разработке и тестировании данной программы необходимо использовать

систему с параметрами, представленными ниже (табл. 3).

Таблица 3. Необходимые для тестирования и разработки параметры**Table 3.** Parameters required for testing and development

Название параметра	Значение
Процессор	AMD Ryzen 7 5800H
Оперативная память	16Гб
Жесткий диск	256Гб
Графический контроллер	AMD Radeon™ Graphics
Частота оперативной памяти	3200МГц
Разрядность системы	64-разрядная

Для работы с написанием исходного кода информационно-вычислительной системы должна быть выбрана среда разработки Microsoft Visual Studio Code, так как в ней имеется большое количество надстроек для разных языков программирования:

- язык гипертекста HTML5 – для создания интерфейса пользователя;
- язык каскадной разметки стилей CSS3 – для оформления интерфейса пользователя;
- язык программирования JavaScript – для реализации обработки событий и для написания модульных тестов;
- язык программирования Solidity – для написания логики смарт-контрактов;
- фреймворк hardhat – для разработки смарт-контрактов;
- фреймворк NextJS – для удобной организации веб-страниц, а также для маршрутизации;
- модуль prettier – для форматирования кода;
- модуль solidity-coverage – для определения процента покрытия функций тестами;

– модули chai и ethereum-waffle – для написания модульных тестов;

– модуль dotenv – для установки переменных окружения;

– модуль ethers – для отправки запросов в блокчейн;

– модуль hardhat-gas-reporter – для определения стоимости вызова функций смарт-контракта;

– модуль hardhat-contract-sizer – для определения размера смарт-контрактов;

– модуль gelatonetwork – для отложенного запуска функций смарт-контрактов;

– модули nomiclabs и nomicfoundation – для тестирования, просмотра транзакций, подтверждения смарт-контрактов;

– модуль openzeppelin – для контроля прав доступа к функциям смарт-контрактов.

Разрабатываемая информационно-вычислительная система будет использоваться в качестве базы данных распределенный реестр – блокчейн [17].

Для моделирования предметной области и функционирования программной системы необходимо использовать язык UML.

Для модульного тестирования функций смарт-контрактов будут разработаны unit-тесты.

В таблице 4 представлены основные сущности и типы связей для них, используемые в базе данных информационно-вычислительной системы.

Таблица 4. Основные сущности и типы связей для них

Table 4. Basic entities and types of relationships for them

Основные сущности	Связь	Кратность связи
Address – Voting	Принадлежит	1 – *
Address – VotingEngine	Принадлежит	1 – 1
VotingEngine – Voting	Принадлежит	1 – *

На рисунке 3 представлена диаграмма концептуальных классов информационной части программно-вычислительной системы.

В таблице 5 демонстрируются главные сущности и виды взаимосвязей между ними, которые используются в разделе разрабатываемой информационно-вычислительной системы, отвечающем за голосование.

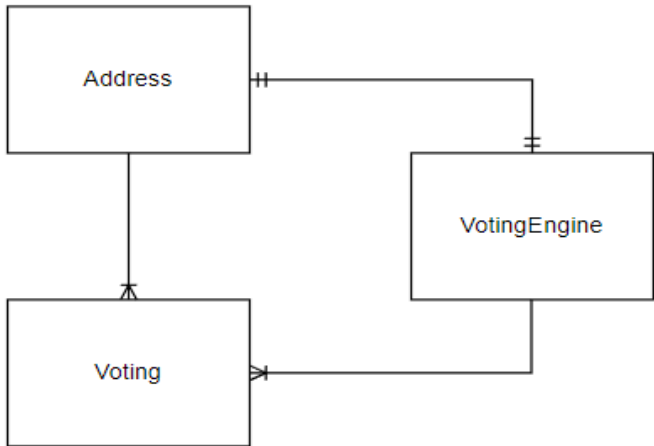


Рис. 3. Концептуальная модель предметной области базы данных

Fig. 3. Conceptual model of a database domain

Таблица 5. Главные сущности и виды взаимосвязей между ними

Table 5. Main entities and types of relationships between them

Основные сущности	Связь (ассоциация)	Кратность связи
VotingEngine – Voting	1 – 0..*	Порождает
Voting – Ownable	1 – 1	Наследует
VotingEngine – Ownable	1 – 1	Наследует

На рисунке 4 представлена концептуальная модель предметной области

для части разрабатываемого приложения, отвечающей за голосование.

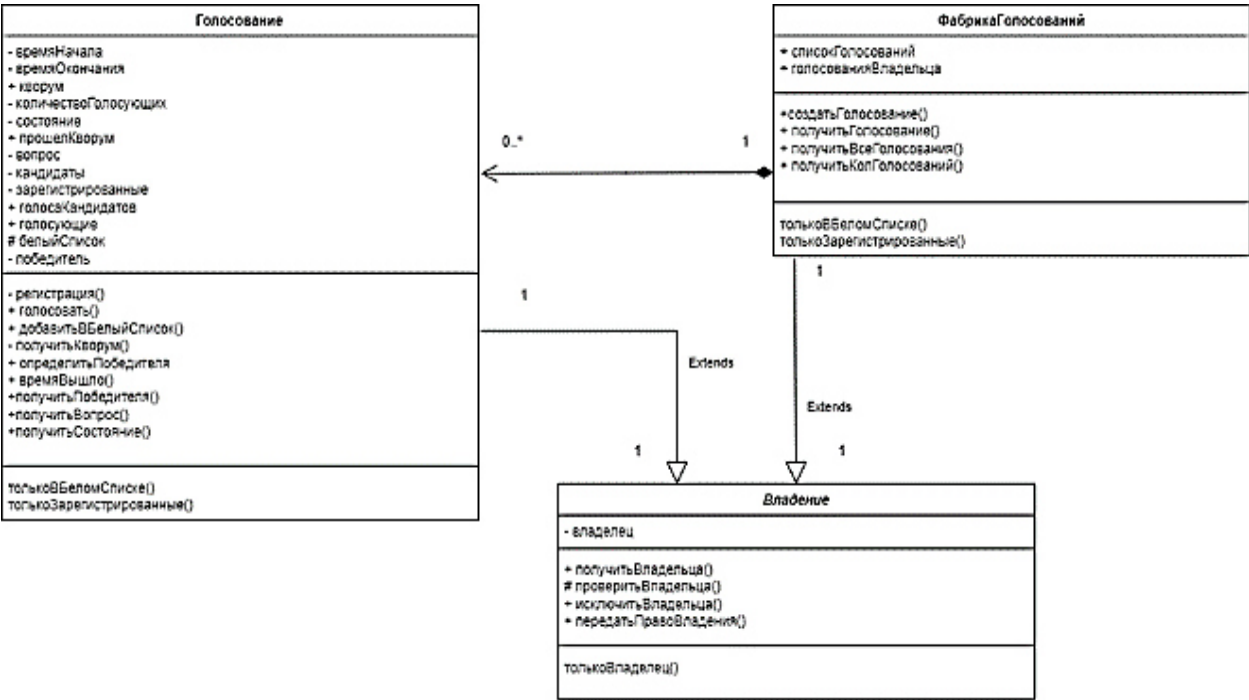


Рис. 4. Концептуальная модель предметной области для части разрабатываемого приложения, отвечающей за голосование

Fig. 4. Conceptual domain model for the part of the application being developed that is responsible for voting

Разрабатываемая информационно-вычислительная система должна иметь клиент-серверную архитектуру. На компьютере клиента устанавливается веб-браузер. На сервере устанавливаются следующие программные модули:

- компонент `CreateForm`. Предназначен для представления формы создания голосования;
- компонент `Card`. Предназначен для представления голосования в виде карточки на главной странице;
- компонент `AddVoters`. Предназначен для добавления адресов голосующих;
- компонент `Footer`. Предназначен для представления нижней части веб-сайта;

- компонент `Header`. Предназначен для представления верхней части веб-сайта;
- компонент `Navbar`. Предназначен для представления навигационной панели;
- компонент `Radio`. Предназначен для представления пункта выбора кандидата;
- компонент `TimePicker`. Предназначен для работы с временем;
- компонент `DatePicker`. Предназначен для работы с датой;
- компонент `VotingInfo`. Предназначен для представления информации о голосовании;
- компонент `create`. Предназначен для представления страницы создания голосования;

- компонент `index`. Предназначен для представления главной страницы;
- компонент `results`. Предназначен для представления страницы результатов голосования;
- компонент `ConnectButton`. Предназначен для представления виджета подключения криптокошелька;
- компонент `constants`. Содержит файлы с константами;

- компонент `styles`. Содержит стили CSS;

- компонент `[id]`. Предназначен для динамического создания информации о голосовании по его `id`.

На рисунке 5 представлена диаграмма компонентов разрабатываемого приложения.

На рисунке 6 представлена диаграмма развертывания разрабатываемого приложения.

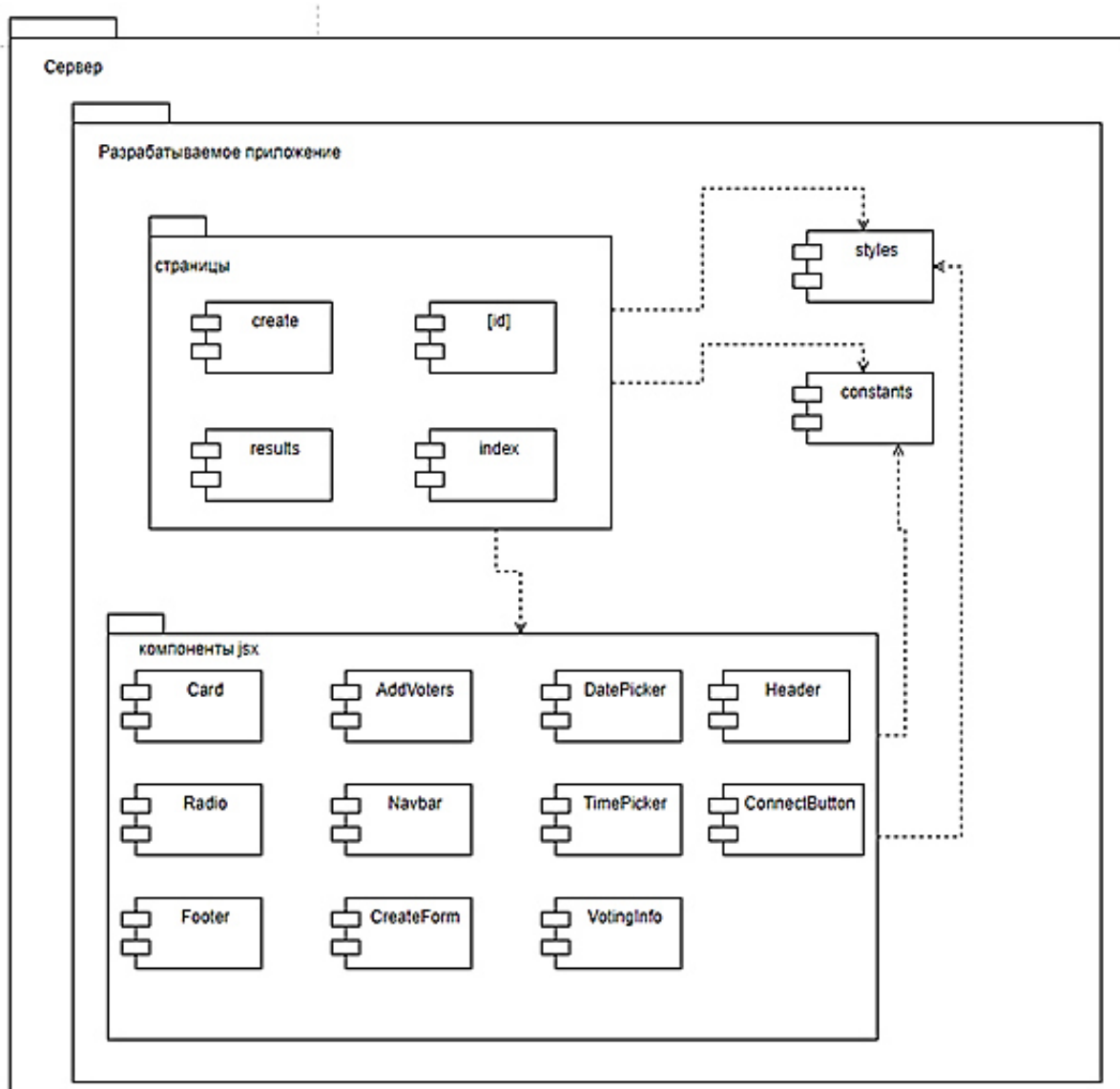


Рис. 5. Диаграмма компонентов разрабатываемого приложения

Fig. 5. Diagram of components of the application being developed

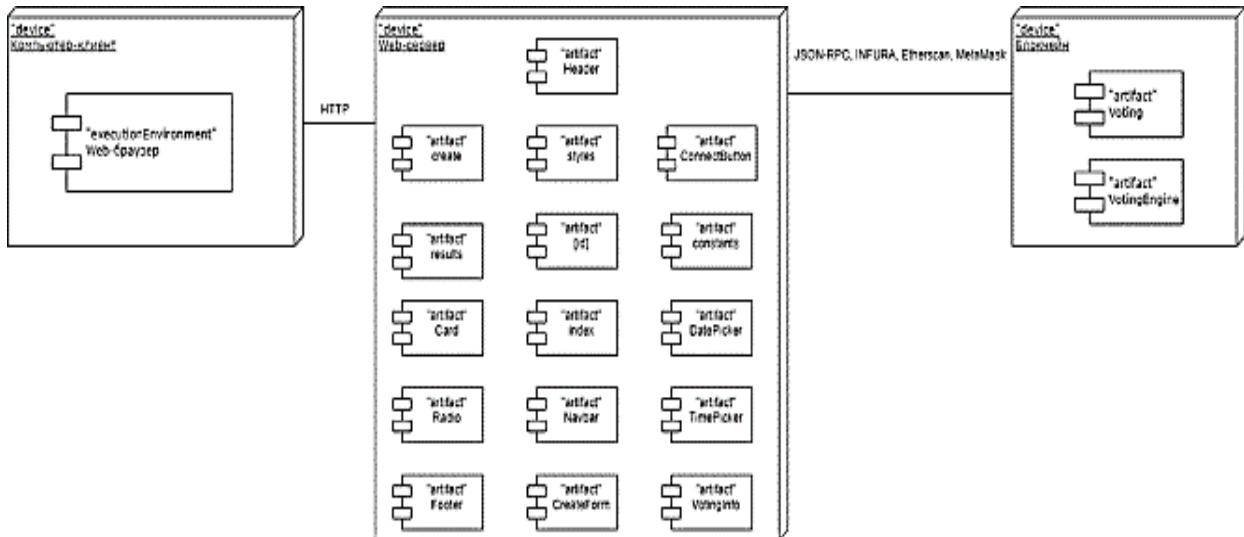


Рис. 6. Диаграмма развертывания для разрабатываемого приложения

Fig. 6. Deployment diagram of the application being developed

На рисунке 7 представлена диаграмма классов части информационно-вычислительной системы, отвечающей

за создание и функционирование голосований.

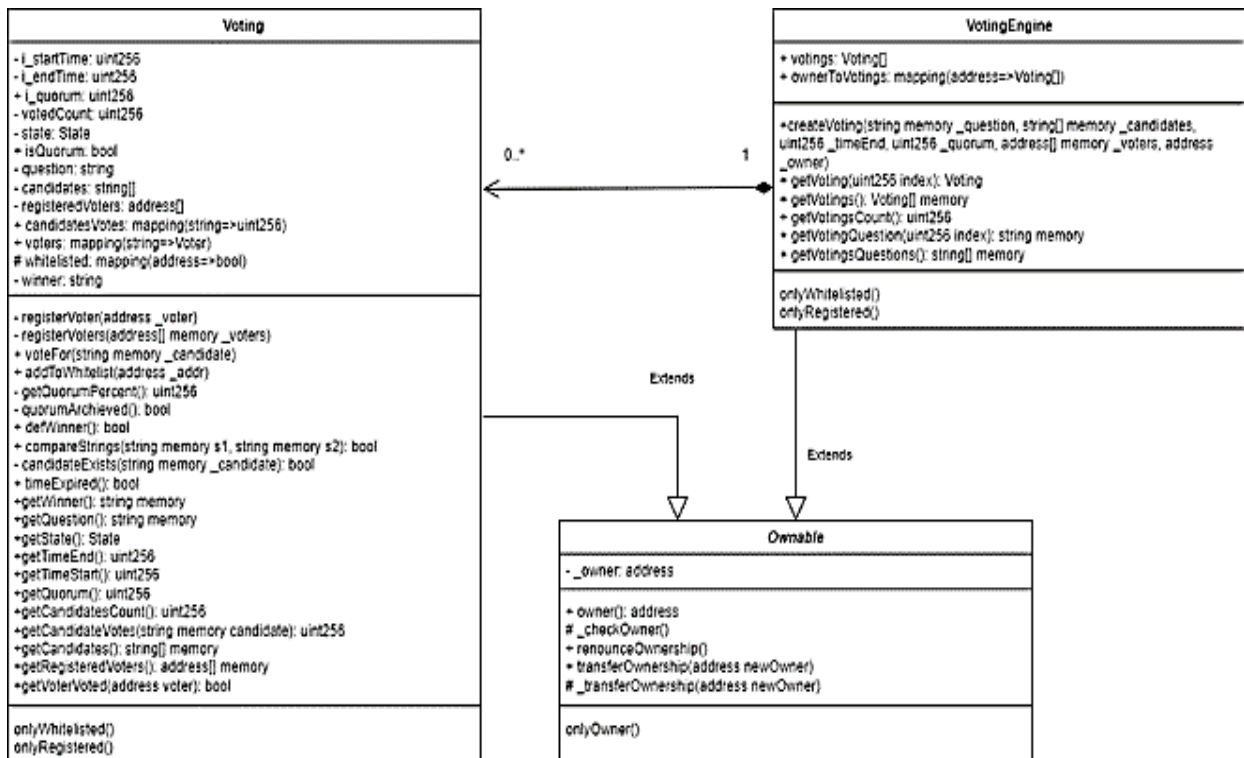


Рис. 7. Диаграмма классов для части информационно-вычислительной системы, отвечающей за создание и функционирование голосований

Fig. 7. Class diagram for the part of the information computing system responsible for the creation and operation of voting

Результаты и их обсуждение

Для того чтобы оценить эффективность разработанной системы, было проведено тестирование, в ходе которого проверялись основные функциональные возможности программного обеспечения, а также его надежность, производительность и безопасность. Тестирование позволило выявить возможные ошибки и недочеты в системе, которые могли негативно сказаться на ее работе и удовлетворении потребностей пользователей.

После того как был завершен этап разработки и тестирования, был проведен сравнительный анализ полученных

результатов и функциональности системы с другими аналогичными решениями, чтобы определить преимущества и недостатки разработанной системы по сравнению с конкурентами. Этот анализ позволил лучше понять, какие улучшения и доработки необходимо внести в систему смарт-контрактов, чтобы она стала более конкурентоспособной и удовлетворяла потребностям пользователей.

Существуют программные реализации систем голосований – WE.Vote, Polys, Voatz. Сравнительный анализ существующих решений и разрабатываемого решения (DVote) представлен ниже (табл. 6).

Таблица 6. Главные сущности и виды взаимосвязей между ними

Table 6. Main entities and types of relationships between them

Решение	WE.Vote	Polys	Voatz	DVote
Шифрование	✓ Использует шифрование и биометрию	✓ Использует шифрование	✓ Использует шифрование и биометрию	✓ Использует шифрование
Удобство	✓ Простой и интуитивный интерфейс	✓ Простой и интуитивный интерфейс	✓ Относительно простой интерфейс	✓ Простой и интуитивный интерфейс
Гибкость	✓ Гибкие настройки	✓ Гибкие настройки	✗ Ограниченные настройки	✓ Гибкие настройки
Децентрализация	✓ Децентрализованная система	✓ Децентрализованная система	✗ Централизованная система	✓ Децентрализованная система
Конфиденциальность	✓ Не раскрывает личную информацию			
Бесплатность	✓ Условно бесплатно	✗ Платно	✗ Платно	✓ Бесплатно
Доступность в других странах	✓ Доступна в различных странах	✓ Доступна в различных странах	✗ Ограничена США	✓ Доступна в различных странах
Прозрачность	✓ Построен на блокчейне	✓ Построен на блокчейне	✗ Централизованная система	✓ Построен на блокчейне
Масштабируемость	✓ Масштабируется хорошо			
Открытость	✗ Закрытый код			✓ Открытый код
Устойчивость к атакам	✓ Использует криптографические механизмы			

Из полученных данных можно сделать вывод, что разрабатываемое решение (DVote) имеет преимущества в открытости и полной бесплатности по сравнению с другими решениями.

Система позволяет обеспечить безопасное проведение онлайн-голосований с хранением всех данных в блокчейне, вследствие чего разработанный программный продукт может гарантировать, что голоса подсчитаны точно и ими нельзя манипулировать, тем самым повышая доверие к результатам процесса голосования. Помимо этого, использование смарт-контрактов потенциально может снизить затраты, связанные с традиционными методами голосования, автоматизировать подсчет голосов и объявление результатов, что значительно сократит время и ресурсы, необходимые для ручного подсчета голосов и проверки, а также использование разработанной системы может улучшить доступность для избирателей, поскольку к ней можно получить удаленный доступ через веб-интерфейс. Также разработанная система может быть использована в других областях применения [18; 19; 20].

Выводы

Информационно-вычислительная система на основе смарт-контрактов для проведения онлайн-голосования предоставляет возможность проводить выборы более эффективно и безопасно. Результаты и их обсуждение играют важную роль в обеспечении прозрачности и доверия к данному процессу.

Система будет интересна различным организациям и частным лицам, стремящимся провести безопасные и прозрачные процессы голосования, таким как правительственные органы, политические партии, промышленные объединения, активисты, некоммерческие организации, университеты и т. д. Благодаря своим функциям и возможностям система предоставляет надежный и проверенный инструмент для демократического участия и принятия решений на различных уровнях, с минимизацией возможности фальсификации и манипуляции результатами голосования.

Использование данного решения обеспечит безопасность и удобство при участии в различных онлайн-голосованиях, надежное хранение голосов избирателей и предоставление детальной статистики по проведенным голосованиям.

Список литературы

1. Крылов А. А. Блокчейн в государственной политике и управлении // Социальная политика и социальное партнерство. 2021. № 6. С. 422–431.
2. Романова И. В., Лаврик Т. М. Применение цифровых технологий в сфере корпоративных отношений // Право: история и современность. 2021. № 2 (15). С. 137–142.
3. Волос А. А., Волос Е. П. Перспективы применения смартконтрактов в корпоративных отношениях // Право и экономика. 2020. № 6. С. 34–39
4. Дмитриев Н. Д. Основные плюсы применения технологии блокчейн при принятии управленческих решений // Экономика и управление: сборник научных трудов. СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2018. С. 123–128.

5. Новоселова Л., Медведева Т. Блокчейн для голосования акционеров // *Хозяйство и право*. 2017. № 10. С. 10–21.
6. Санникова Л. В. Блокчейн в корпоративном управлении: проблемы и перспективы // *Право и экономика*. 2019. № 4. С. 27–36.
7. Фролов А. В., Титова А. А., Верещагина Е. А. Электронное голосование без раскредитивания конфиденциальной информации // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2022. № 6. С. 41–48.
8. Татарышкина И. С., Тюрин М. И. К вопросу применения блокчейна в корпоративном управлении // *Право и экономика*. 2023. № 11. С. 19–24.
9. Бэла С. Б. Развитие корпоративного управления с помощью сервисов электронного голосования // *Управленческие науки*. 2020. Т. 10, № 2. С. 74–87.
10. Душаева А. А. Что такое смарт-контракт что нас ждет в будущем? // *Юридическая наука: история и современность*. 2018. № 1. С. 57–62.
11. Генкин А., Михеев А. Блокчейн: как это работает и что ждет нас завтра. М.: Альпина Паблишер, 2018. 592 с.
12. Бондарь К. А. Технология блокчейн и появление смарт-контрактов в современной действительности // *Проблемы науки*. 2020. № 6 (54). С. 71–73.
13. Трубочкина Н. К., Поляков С. К. Система электронного голосования на основе технологии блокчейн с использованием смарт-контракта // *Информационные технологии*. 2019. № 2. С. 75–85.
14. Ben Ayed A. A conceptual Secure Blockchain - Based Electronic Voting System // *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*. 2017. Vol. 9, N 3. P. 1–9.
15. Арутюнов В. В., Авралева И. Ю. Технология блокчейн. Начало, астояще, будущее // *Вестник РГГУ. Серия: Информатика. Информационная безопасность. Математика*. 2021. № 4. С. 30–46.
16. Евсюков Д. С., Лебеденко А. В. Механизм установления подлинностей действий в системах, построенных на децентрализованной системе блокчейн. URL: <https://lektsia.com/18x5206.html?ysclid=m1rxlcdag270118001> (дата обращения: 10.06.2024).
17. ThatsTheSpirit. URL: <https://github.com/ThatsTheSpirit/nextjs-smartcontract-voting-system> (дата обращения: 10.06.2024).
18. Ефремов В. В., Ефремова И. Н., Емельянова Н. А. О методах цифровой обработки информации в медицине // *Наука и образование в жизни современного общества: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции*. Тамбов: Консалтинговая компания «Юком», 2015. Т. 7. С. 57–59.
19. Сидоров Д. П., Камаева А. А. Технология блокчейн и возможности ее применения в учебном процессе // *Образовательные технологии и общество*. 2019. № 3. С. 94–101.
20. Социально-информационный портал для студентов российских вузов в виде мобильного приложения «Зачёт» / С. А. Немченко, С. А. Сохина, Е. А. Петрик, И. Н. Ефремова // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Лингвистика и педагогика*. 2023. № 3. С. 158–173.

References

1. Krylov A.A. Blockchain in public policy and management. *Social'naya politika i social'noe partnerstvo = Social Policy and Social Partnership*. 2021;(6):422–431. (In Russ.)
2. Romanova I.V., Lavrik T.M. Application of digital technologies in the field of corporate relations. *Pravo: istoriya i sovremennost' = Law: History and Modernity*. 2021;(2):137–142. (In Russ.)
3. Volos A.A., Volos E.P. Prospects for the use of smart contracts in corporate relations. *Pravo i ekonomika = Law and Economics*. 2020;(6):34–39. (In Russ.)
4. Dmitriev N.D. The main advantages of using blockchain technology in making management decisions. In: *Ekonomika i upravlenie: sbornik nauchnykh trudov SPbGEU = Economics and Management: Collection of scientific works*. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi ekonomicheskii universitet; 2018. P. 123–128. (In Russ.)
5. Novoselova L., Medvedeva T. Blockchain for shareholder voting. *Hozyajstvo i pravo = Entrepreneurship and Law*. 2017(10):10–21. (In Russ.)
6. Sannikova L.V. Blockchain in corporate governance: problems and prospects. *Pravo i ekonomika = Law and Economics*. 2019;(4):27–36. (In Russ.)
7. Frolov A.V., Titova A.A., Vereshchagina E.A. Electronic voting without declassification of confidential information. *Promyshlennye ASU i kontrolyery = Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2022;(6):41–48. (In Russ.)
8. Tataryshkina I.S., Tyurin M.I. On the issue of blockchain application in corporate management. *Pravo i ekonomika = Law and Economics*. 2023; (11):9–24. (In Russ.)
9. Bela S.B. Development of corporate governance using electronic voting services. *Upravlencheskie nauki = Managerial Sciences*. 2020;10(2):74–87. (In Russ.)
10. Dushaeva A.A. What is a smart contract? What awaits us in the future? *Yuridicheskaya nauka: istoriya i sovremennost' = Legal Science: History and Modernity*. 2018;(1):57–62. (In Russ.)
11. Genkin A., Mikheev A. Blockchain: how it works and what awaits us tomorrow. Moscow: Al'pina Publisher; 2018. 592 p. (In Russ.)
12. Bondar K.A. Blockchain technology and the emergence of smart contracts in modern reality. *Problemy nauki = Problems of Science*. 2020;(6):71–73. (In Russ.)
13. Trubochkina N.K., Polyakov S.K. Electronic voting system based on Blockchain technology using a smart contract. *Informacionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2019;(2):75–85. (In Russ.)
14. Ben Ayed A.A conceptual Secure Blockchain – Based Electronic Voting System. *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*. 2017;9(3):1–9.
15. Arutyunov V.V., Avraleva I.Yu. Blockchain technology. The beginning, the present, the future. *Vestnik RGGU. Seriya: Informatika. Informacionnaya bezopasnost'. Matematika = RGGU Bulletin. Series: Information Science. Information Security. Mathematics*. 2021;(4):30–46. (In Russ.)
16. Evsyukov D.S., Lebedenko A.V. Mechanism for establishing the validity of actions in systems built on a decentralized blockchain system. (In Russ.) Available at: <https://lektsia.com/18x5206.html?ysclid=m1rxlcdag270118001> (accessed 10.06.2024).

17. ThatsTheSpirit. Available at: <https://github.com/ThatsTheSpirit/nextjs-smartcontract-voting-system> (accessed 10.06.2024).
18. Efremov V.V., Efremova I.N., Yemelyanova N.A. On methods of digital information processing in medicine. In: *Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshchestva: Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Science and education in the life of modern society: Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference*. Vol. 7. Tambov: Konsalt-ingovaya kompaniya «Yukom»; 2015. P. 57–59. (In Russ.)
19. Sidorov D.P., Kamaeva A.A. Blockchain technology and the possibilities of its application in the educational process. *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo = Educational Technologies and Society*. 2019;(3):94–101. (In Russ.)
20. Nemchenko S.A., Sokhina S.A., Petrik E.A., Efremova I.N. Social information portal for students of Russian universities in the form of a mobile application «Offset». *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Lingvistika i pedagogika = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;(3):158–173. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Герасев Алексей Александрович, инженер,
Компьютерная академия TOP,
г. Курск, Российская Федерация.
e-mail: 1999bag@gmail.com,
ORCID: 0009-0000-4339-4060

Alexey A. Gerasyov, Ingeneer, TOP Computer
Academy, Kursk, Russian Federation,
e-mail: 1999bag@gmail.com,
ORCID: 0009-0000-4339-4060

Ефремова Ирина Николаевна, кандидат
технических наук, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: efremova-in@inbox.ru,
ORCID: 0000-0001-5644-2674

Irina N. Efremova, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Program Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: efremova-in@inbox.ru,
ORCID: 0000-0001-5644-2674

Архипова Изабелла Сергеевна, магистрант
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: izabella00arhipova@mail.ru,
ORCID: 0009-0003-6018-9191

Izabella S. Arhipova, Undergraduate
of the Department of Program Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: izabella00arhipova@mail.ru,
ORCID: 0009-0003-6018-9191

Камаллов Руслан Наврузович, магистрант
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ruslan18.01@mail.ru,
ORCID: 0009-0007-0435-2758

Ruslan N. Kamalov, Undergraduate
of the Department of Program Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: ruslan18.01@mail.ru,
ORCID: 0009-0007-0435-2758

Метод определения влияния дестабилизирующих факторов цифровых фильтров на многокритериальный синтез средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств

И. Г. Бабанин¹ ✉, Е. Ю. Бабанина¹, О. Ю. Михайлова¹, А. В. Хмелевская¹

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

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Резюме

Цель исследования – разработка метода определения влияния дестабилизирующих факторов в нерекурсивных цифровых фильтрах частотной селекции на целевую функцию многокритериального структурно-параметрического синтеза средств радиосвязи с полезной нагрузки авиационных робототехнических устройств.

Методы. При проведении исследований получены математические выражения зависимости вероятности ошибки на бит (BER) от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигналов через симметричные нерекурсивные цифровые фильтры с квадратурной амплитудной модуляцией позиционностью не более 4096, неравномерностями сигнального созвездия не более 5. Полученные результаты необходимы для выполнения многокритериального синтеза радиосистем, адаптивных к когнитивно сформированному полётному заданию.

Результаты. В ходе проведенных исследований: 1) продемонстрирована математическая модель структурно-параметрического синтеза средств радиосвязи с авиационными робототехническими устройства, в основу которой положены критерии минимизации: электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости; излучения вне полосы рабочих частот; пик-фактора сигналов; действия узкополосных, широкополосных и структурных помех в радиоканале при заданной пропускной способности; использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды; 2) выявлена аналитическая зависимость влияния параметров одного из нескольких структурно-функциональных узлов (цифровых фильтров частотной селекции) на критерии синтеза средств связи. Рассмотрены аппроксимирующие функции вида – Кайзера, Тьюки, Барлетта-Хана, Чебышева. Показано влияние порядка фильтра на эквивалент энергетического проигрыша в информационных линиях связи авиационных робототехнических устройств.

Заключение. Представлен метод определения влияния неравномерности АЧХ симметричного нерекурсивного цифрового фильтра в устройствах приёма и обработки радиосигналов многокритериальных средств связи с полезной нагрузкой авиационных робототехнических устройств. Предложенный подход повышает достоверность определения значений критериев минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости, излучения вне рабочей полосы частот, а также использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды.

Ключевые слова: радиопередающие устройства; радиоприёмные устройства; эквивалентные энергетические потери; сложная электромагнитная обстановка; программно-конфигурируемые радиосистемы.

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

Для цитирования: Бабанин И. Г., Бабанина Е. Ю., Михайлова О. Ю., Хмелевская А. В. Метод определения влияния дестабилизирующих факторов цифровых фильтров на многокритериальный синтез средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 3. С. 63–87. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-63-87>

Поступила в редакцию 05.07.2024

Подписана в печать 04.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Method for determining the effect of destabilizing factors of digital filters on the multicriteria synthesis of radio communications of aviation robotic devices

Ivan G. Babanin¹ ✉, Ekaterina Yu. Babanina¹, Olesya Yu. Mikhailova¹,
Alena V. Khmelevskaya¹

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

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Abstract

The purpose of the research is development of a method for determining the influence of destabilizing factors, such as the unevenness of the amplitude-frequency response (AFC) and the nonlinearity of the phase-frequency response (FFC), in non-recursive digital frequency selection filters on the target function of multicriteria structural-parametric synthesis of radio communications from the payload of aviation robotic devices.

Methods. In conducting scientific research, probability theory, mathematical statistics, statistical radio engineering and computational mathematics were used. The study obtained mathematical expressions of the dependence of the probability of error per bit (BER) on the average signal-to-noise ratio when signals pass through symmetrical non-recursive digital filters with quadrature amplitude modulation with a positivity of no more than 4096, signal constellation irregularities of no more than 5, which are the basis for the energy balance of radio lines with aviation robotic devices. The expressions obtained are one of the "foundations" for the implementation of a multi-criteria synthesis of radio systems adaptive to a cognitively formed flight task. In this paper, all the results of the probability of reliability of the received data by means of communication are reflected for the case of rigid decision-making (Gray coding).

Results. In the course of the conducted research: 1) a mathematical model of the structural-parametric synthesis of radio communications with aviation robotic devices is demonstrated, which is based on the criteria for minimizing: electronic computing resources with a given noise immunity; radiation outside the operating frequency band; peak factor signals; the effects of narrowband, broadband and structural interference in the radio channel at a given bandwidth; the use of structural and functional nodes specific to the existing information and communication environment; 2) the analytical dependence of the influence of the parameters of one of several structural and functional nodes - digital filters of frequency selection, on the criteria for the synthesis of communication means has been revealed. The paper considers the most common approximating functions - Kaiser, Tukey, Barlett-Khan, Chebyshev, and also shows the influence of the filter order on the equivalent of energy loss in information communication lines of aviation robotic devices.

Conclusion. The scientific article presents a method for determining the effect of the uneven frequency response of a symmetrical non-recursive digital filter in devices for receiving and processing radio signals of multicriteria means of communication with the payload of aviation robotic devices. The proposed approach increases the reliability of determining the values of criteria for minimizing electronic computing resources for a given noise immunity, radiation outside the operating frequency band, as well as the use of structural and functional nodes characteristic of the existing information and communication environment.

Keywords: radio transmitting devices; radio receiving devices; equivalent energy losses; complex electromagnetic environment; software-defined radiosystems.

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

For citation: Babanin I. G., Babanina E. Yu., Mikhailova O. Yu. Khmelevskaya A. V. A Method for determining the effect of destabilizing factors of digital filters on the multicriteria synthesis of radio communications of aviation robotic devices. *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(3):63–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-63-87>

Received 05.07.2024

Accepted 04.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Своевременная передача информации является основой функционирования современного общества. В средствах связи большинства действующих систем формирование трактов осуществляется в установленных частотных диапазонах с заданными сигнально-кодowymi конструкциями [1].

Однако современное использование частотного ресурса средствами радиосвязи крайне неэффективно. Возникает проблема выделения новых радиочастотных полос для беспроводных средств, оказывающих предоставление телематических услуг. Прежняя политика распределения частот ГКРЧ малоэффективна. Возникшее противоречие способно разрешить использование когнитивных радиосистем [2].

Помимо электромагнитной обстановки перспективные системы должны учитывать тип, важность предоставляемых услуг, способы доставки. Так, в работах [3], [4] и [5] показаны методы

многокритериального синтеза радиотрактов, адаптивных к помеховой обстановке. Предложенный подход синтеза не затрагивает аспекты структурно-параметрического формирования приемно-передающих устройств средств связи с учётом влияния внутренних и внешних дестабилизирующих факторов, использования уже сформированной на территории инфраструктуры.

Так, актуальна задача синтеза средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств с учетом вышеизложенных недостатков.

Материалы и методы

Для осуществления структурно-параметрического синтеза средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств, адаптивных к внутренним и внешним дестабилизирующим факторам, необходимо сформировать критерии [6]:

1) критерий минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости:

$$\min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_1}^{\text{треб}} \right) \right\}, \text{ при } P_{\text{ош}}^{\text{треб}} = \text{const}, \quad (1)$$

где $d_2(\cdot)$ – евклидово расстояние между двумя элементами; E_b – энергия сигнала на бит на входе решающего устройства (РУ) демодулятора; N_0 – спектральная плотность мощности шума (СПМШ); $\Delta_{\text{пот}}$ – энергетические потери шумовой и нешумовой природы в радиотракте; $\left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_1}^{\text{треб}}$ – требуемое отношение сигнал-шум для элемента a из подмножества A_1 , необходимое для обеспечения

вероятности ошибки на бит $P_{\text{ош}}^{\text{треб}}$; A – множество размерностью $[5, M, N]$ из элементов набора параметров структурно-функциональных узлов радиотракта.

Для обеспечения минимизации электронно-вычислительных ресурсов в структурно-функциональных узлах радиотракта необходимо рассмотреть модифицированное уравнение энергетического баланса [7]:

$$P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} - q = \underbrace{\left(L_0^* + L_G^* + L_R^* + L_P^* + L_C^* + L_M^* + L_D^* + L_{PM}^* \right)}_{\text{внешние дестабилизирующие факторы}} + \underbrace{\left(\Delta_{\text{пер}} + \Delta_{\text{пр}} \right)}_{\text{внутренние дестабилизирующие факторы}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пер}}$ – излучаемая мощность передающего устройства; $G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления антенны передающего устройства; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления антенны приёмного устройства, $q = (E'_b/N'_0)_a^{\text{треб}}$ – отношение сигнал-шум на входе счетно-решающего устройства приемного устройства для обеспечения заданной вероятности ошибки на бит; L_0^* – затухание в свободном пространстве; L_G^* – затухание в атмосферных газах; L_R^* – затухание в гидрометеорах; L_P^* – затухание из-за деполяризации при распространении; L_C^* –

затухание из-за рефракции и погрешности наведения антенных систем друг на друга; L_M^* – потери, вызванные многолучевых распространением сигнала; L_D^* – потери из-за эффекта Доплера; L_{PM}^* – потери из-за остаточного влияния помех; $\Delta_{\text{пер}}$ – потери, вызванные дестабилизирующими факторами в радиопередающем устройстве; $\Delta_{\text{пр}}$ – потери, вызванные дестабилизирующими факторами в элементах устройства приёма и обработки радиосигналов [8].

На данный момент в современных средствах радиосвязи используются реализации архитектур программно-конфигурируемого радио (ПКР) трёх

поколений. В первом поколении ПКР цифровая обработка сигналов осуществляется на нулевой частоте (ОЧ), во втором – на промежуточной частоте (ПЧ), в третьем – на радиочастоте (РЧ) [2].

Структурно-функциональная схема приемно-передающих устройств второго поколения [9], как наиболее распространенного технического решения, показана ниже (рис. 1).

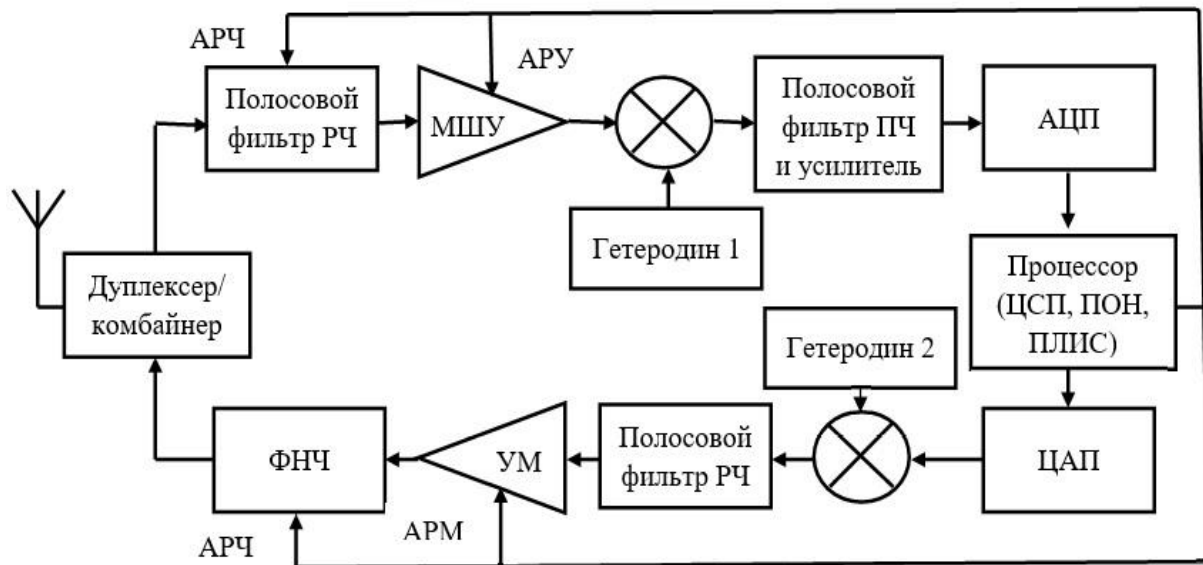


Рис. 1. Структурно-функциональная схема приемно-передающего устройства, построенного по технологии ПКР 2 поколения: АРЧ – автоматическая регулировка частоты; АРУ – автоматическая регулировка усиления; АРМ – автоматическая регулировка мощности; МШУ – малошумящий усилитель; УМ – усилитель мощности; ФНЧ – фильтр низких частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЦСП – цифровой сигнальный процессор; ПОН – процессор общего назначения; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

Fig. 1. Structural and functional diagram of a receiving and transmitting device built using 2nd generation RCC technology: AFC – automatic frequency control; AGC – automatic gain control; AWP – automatic power control; LNA – low noise amplifier; PA – power amplifier; LPF – low pass filter; ADC – analog-to-digital converter; DAC – digital-to-analog converter; DSP – digital signal processor; PON – general purpose processor; FPGA – programmable logic integrated circuit

Исходя из представленной выше архитектуры построения современных

средств связи внутренними источниками энергетических потерь являются [10]:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{пер}} + \Delta_{\text{пр}} = & K_{\text{апр}} + \Delta_{\text{фидер}} [K_{\text{шфидер}}(f)] + \Delta_{\text{дк}} [K_{\text{шдк}}(f)] + \Delta_{\text{мшу}} [K_{\text{шмшу}}(f)] + \\ & + \sum_{i=1}^I \Delta_{\text{пф}}^i (\delta_{\text{ачх}}^i) + \sum_{m=1}^M \Delta_{\text{пф}}^m (\delta_{\text{фчх}}^m) + \sum_{p=1}^P \Delta_{\text{см}}^p [K_{\text{шсм}}^p(f)] + \sum_{j=1}^J \Delta_{\text{гет}}^j [G_{\text{в}}^j] + \\ & + \sum_{d=1}^D \Delta_{\text{упч}}^d [K_{\text{шупч}}^d(f)] + \Delta_{\text{свнч}} (\delta_f) + \Delta_{\text{свтч}} (\delta_0) + \Delta_{\text{увс}} (\delta_u) + \\ & + \Delta_{\text{рас}} (\delta_d) + \Delta_{\text{омси}} (\delta_{\text{мси}}) + \Delta_{\text{ацп}} (N_{\text{разр}}) + \Delta_{\text{ум}} (K_{\text{нел}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $K_{\text{апр}}$ – коэффициент шума приёмной антенны; $\Delta_{\text{фидер}}[K_{\text{шфидер}}(f)]$ – энергетические потери в фидерных линиях; $\Delta_{\text{дк}}[K_{\text{шдк}}(f)]$ – энергетические потери в дуплексере / комбайнере; $\Delta_{\text{мшу}}[K_{\text{шмшу}}(f)]$ – энергетические потери в малошумящем усилителе (МШУ) с шумовой температурой $K_{\text{шмшу}}(f)$; $\Delta_{\text{пф}}^i(\delta_{\text{ачх}}^i)$ – эквивалент энергетических потерь в i -м фильтре частотной селекции с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики $\delta_{\text{ачх}}$; $\Delta_{\text{пф}}^m(\delta_{\text{фчх}}^m)$ – эквивалент энергетических потерь в m -м частотной селекции с нелинейностью его фазочастотной характеристики $\delta_{\text{фчх}}$; $\Delta_{\text{см}}^p[K_{\text{шсм}}^p(f)]$ – энергетические потери в p -м смесителе, обусловленные тепловыми шумами с $K_{\text{шсм}}^p(f)$; $\Delta_{\text{гет}}^j[G_{\text{в}}^j]$ – энергетические потери, обусловленные неидеальностью сгенерированного амплитудно-фазового спектра j -го гетеродина [11]; $\Delta_{\text{упч}}^d[K_{\text{шупч}}^d(f)]$ – энергетические потери d -го усилителя промежуточной частоты с коэффициентом шума $K_{\text{шупч}}^d(f)$; $\Delta_{\text{свнч}}(\delta_f)$ – эквивалент энергетических потерь в системе восстановления несущей частоты (СВНЧ) с погрешностью восстановления гармонического несущего колебания δ_f ; $\Delta_{\text{свтч}}(\delta_0)$ – эквивалентные энергетические потери системы восстановления тактовой частоты (СВТЧ), обусловленные погрешностью восстановления тактовой частоты демодулятора δ_0 ; $\Delta_{\text{увс}}(\delta_u)$ – эквивалентные энергетические потери погрешностью поддержания уровня сигнала δ_u на входе демодулятора;

$\Delta_{\text{рас}}(\delta_d)$ – эквивалентные энергетические потери, вызванные рассогласованием частотных характеристик δ_d формирующего и комплексно-сопряженного с ним согласованного фильтров; $\Delta_{\text{омси}}(\delta_{\text{мси}})$ – эквивалентные энергетические потери из-за остаточной межсимвольной интерференции (МСИ) $\delta_{\text{мси}}$; $\Delta_{\text{ацп}}(N_{\text{разр}})$ – энергетические потери в усилителе мощности из-за нелинейных искажений $K_{\text{нел}}$; $\Delta_{\text{ацп}}(N_{\text{разр}})$ – энергетические потери в АЦП заданной разрядностью, вызванные ошибками квантования.

Необходимо заметить, что данные дестабилизирующие факторы можно классифицировать как вариативные и неизменные. Неизменные потери – это потери, которые невозможно компенсировать методами цифровой обработки. Вариативные потери – потери, значения которых можно изменить за счет задействования больших электронно-вычислительных ресурсов [12].

Задача критерия минимизации электронно-вычислительных ресурсов сводится к нахождению параметров структурно-функциональных узлов из заданной номенклатуры с потерями, наиболее приближенными к заданной вероятности ошибки;

2) критерий минимизации излучения вне полосы рабочих частот:

$$\min_A \left\{ h \left(10 \lg [G_{A_2}(f) - G_{\text{лог}}(f)] \right) \right\}, \quad (4)$$

где $h(\cdot)$ – «штрафная» функция на спектр излучаемого сигнала; $G_{A_2}(f)$ – спектральная плотность мощности (СПМ)

сформированного сигнала; $G_{\log}(f)$ – спектральная маска на излучаемый сигнал; A_2 – двумерное подмножество из структурно-функциональных элементов с различными параметрами данного критерия.

СПМ формируемого сигнала обеспечивается использованием [13]:

- а) диапазонных частотно-селектирующих фильтров;
- б) усилителей мощности;
- в) набором приемно-передающих антенно-фидерных устройств.

Данный критерий позволяет формировать устройства связи с эквивалентной изотропной излучаемой мощностью (ЭИИМ), не превышающей установленные нормы ГКРЧ в заданных диапазонах частот [14];

3) критерий минимизации действия узкополосных, широкополосных и структурных помех в радиоканале при заданной пропускной способности:

$$\min_A \left(d_2 \left(G_{opt}(f), G_{A_3}(f) \right) \right), \quad (5)$$

где $G_{opt}(f), G_{A_3}(f)$ – нормированные эталонная и принятая спектральная плотность мощности (СПМ) радиосигналов; A_3 – двумерное подмножество из структурно-функциональных элементов с различными параметрами данного критерия.

Выполнение данного критерия достигается использованием устройств режекции, прямого расширения спектра (ПРС) с рядом чирп-последовательностей и псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) [15]. В случае действия широкополосных, узкополосных и структурных помех в канале связи синтезируемая система «отстраивается» в свободный диапазон частот от помех, в

противном случае при синтезе необходим режекторный фильтр с целью исключения воздействия узкополосных, структурных помех и устройство прямого расширения спектра с длиной чирп-последовательности для необходимого и достаточного обеспечения заданной пропускной способности;

4) критерий минимизации пик-фактора формируемого сигнала:

$$\min_A \left(\frac{D(P_{A_4})}{m(P_{A_4})} \right), \quad (6)$$

где $D(P_{A_4})$ – дисперсия сформированной сигнально-кодовой конструкции (СКК); $m(P_{A_4})$ – математическое ожидание сформированной СКК; A_4 – двумерное подмножество из структурно-функциональных элементов с различными параметрами данного критерия.

Выполнение данного критерия обеспечивается за счет применения ортогонального частотного мультиплексора (OFDM), использования формирователей СКК с различными коэффициентами неравномерности сигнального созвездия (χ) [16];

5) критерий минимизации использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды [17]:

$$\min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_5}^{\text{треб}} \right) \right\} \\ \text{при } P_{\text{ощ}}^{\text{треб}} = \text{const}. \quad (7)$$

Данный критерий позволяет установить приоритет на использование объектов сигнально-кодовых конструкций сотовых, ячеистых, спутниковых систем радиодоступа, развернутых в данном

квадранте местности. Кроме того, возможно построение организационно-скрытных радиотрактов [18].

Для выполнения наиболее эффективного структурно-параметрического

синтеза средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств к сложившейся ЭМО необходимо ввести следующую целевую функцию:

$$F(A) = k_1^* M_1^* \min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{a_{1,n}}^{\text{треб}} \right) \right\} +$$

$$+ k_2^* M_2^* \min_A \left\{ h \left(10 \lg [G_{a_{2,n,m}}(f) - G_{\log}(f)] \right) \right\} + k_3^* M_3^* \min_A \left(d_2 (G_{\text{opt}}(f), G_{A_3}(f)) \right) +$$

$$+ k_4^* M_4^* \min_A \left(\frac{D(P_{A_4})}{m(P_{A_4})} \right) + k_5^* M_5^* \min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_5}^{\text{треб}} \right) \right\},$$

где $k_1^* - k_5^*$ – коэффициенты важности критериев; $M_1^* - M_5^*$ – нормирующие множители; $\sum_{n=1}^5 k_n^* = 1$.

Результатом синтеза средства радиосвязи будет набор структурных элементов с параметрами при минимальном значении целевой функции $F(A)$ (рис. 2).

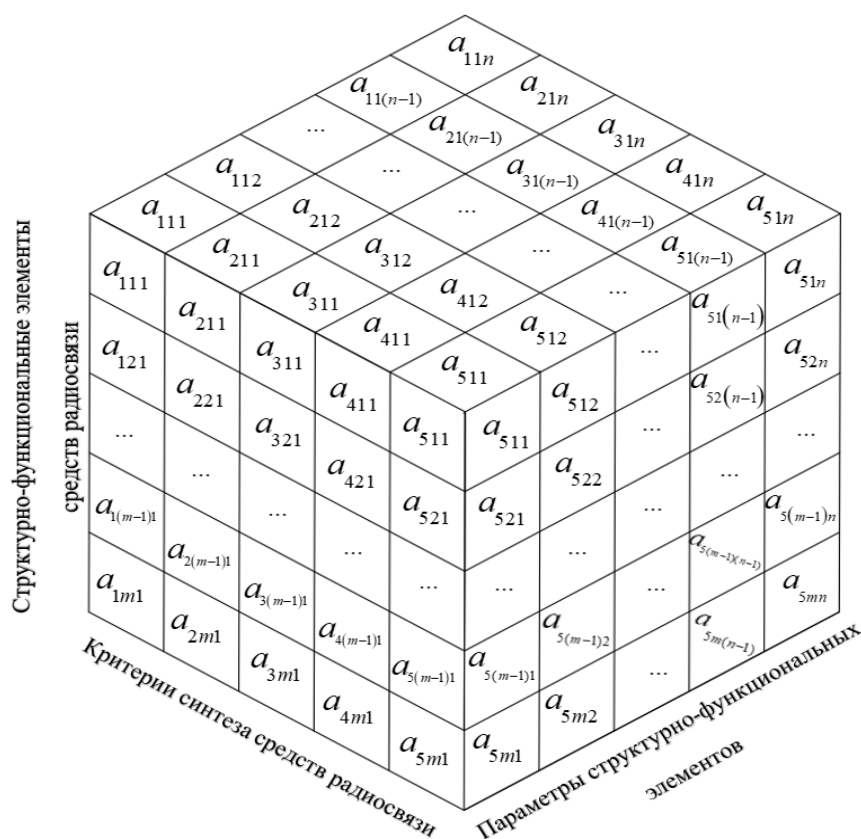


Рис. 2. Многокритериальное структурно-параметрическое множество по достижению целевой функции синтеза средств радиосвязи

Fig. 2. Multi-criteria structural-parametric set for achieving the objective function of radio communication synthesis

Задание необходимых режимов работы формируемого радиотракта осуществляется коэффициентами $k_1^* - k_5^*$.

Метод оценки дестабилизирующих факторов в нерекурсивном цифровом фильтре

Рассмотрим один из вышепредставленных факторов, оказывающих негативное влияние на критерии минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости, минимизации внеполосного излучения, минимизации использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды, – неравномерность амплитудно-частотной и нелинейность фазочастотной характеристик нерекурсивного фильтра частотной селекции, вызванная ограничением импульсной характеристики (ИХ) [19].

Из анализа работ [19] выявлено, что при синтезе средств радиосвязи с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) кратностью $M \geq 5$ в нерекурсивных цифровых фильтрах (НЦФ) приёмно-селектирующего устройства (ПСУ) начинают проявляться потери нешумовой природы. В связи с этим актуальна задача разработки математического аппарата по установлению зависимости эквивалента энергетического проигрыша в исследуемом узле от отношения сигнал-шум на входе решающего устройства радиоприёмника.

В фильтрах частотной селекции необходимо выделить два дестабилизи-

рующих фактора: неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), нелинейность фазочастотной характеристики (ФЧХ). Второй фактор в процессе моделирования исключен путем применения симметричных НЦФ типа 1.

Рассмотрим далее методику оценки влияния дестабилизирующих факторов, а именно неравномерности АЧХ фильтра на эквивалент энергетического проигрыша.

Сигнал на выходе аналого-цифрового преобразователя

$$x(k) = s(k t_d) = s_I(k) \cos(k \omega_0) + s_Q(k) \sin(k \omega_0), \quad (8)$$

где $\omega_d = 2\pi/t_d$ – циклическая частота дискретизации; k – номер отсчета; $s_I(k)$, $s_Q(k)$ – огибающие радиосигнала по синфазному и квадратурному каналам устройства приёма и обработки.

В расчетах эквивалента энергетического проигрыша в фильтрах частотной селекции дисперсия шума постоянна.

После АЦП – изучаемый фильтр частотной селекции с заданными весовыми коэффициентами.

Радиосигнал на выходе цифрового селектирующего устройства определяется полным разностным уравнением

$$y(k) = \sum_{n=0}^N b(n) x(k-n) - \sum_{m=1}^M a(m) y(k-m). \quad (9)$$

КАМ-сигнал на выходе демодулирующего устройства (ДУ) будет определяться как

$$y_I'(k) = y(k) \cos(k\omega_0) = (a(k) \cos(k\omega_0) + b(k) \sin(k\omega_0)) \cos(k\omega_0) = \\ = \frac{1}{2} a(k) + \frac{1}{2} a(k) \cos(2k\omega_0) + \frac{1}{2} b(k) \sin(2k\omega_0), \quad (10)$$

$$y_Q' = y(k) \sin(k\omega_0) = (a(k) \cos(k\omega_0) + b(k) \sin(k\omega_0)) \sin(k\omega_0) = \\ = \frac{1}{2} b(k) - \frac{1}{2} b(k) \cos(2k\omega_0) + \frac{1}{2} a(k) \sin(2k\omega_0), \quad (11)$$

где $y_I(k) = a(k) \cos(k\omega_0)$;
 $y_Q(k) = b(k) \sin(k\omega_0)$.

Для подавления составляющих с частотой $2\omega_{0b}$ используется фильтр нижних частот ФНЧ.

Квадратурные составляющие сигналы на входе оптимального комплексного фильтра:

$$x_I'(k) = \frac{1}{2} a(k), \quad x_Q'(k) = \frac{1}{2} b(k). \quad (12)$$

АЧХ оптимального фильтра (согласованного фильтра, СФ) определяется как

$$h_{si}(n) = s_I(-k), \quad h_{sq}(n) = s_Q(-k). \quad (13)$$

Необходимо отметить, что достоверность принимаемых данных в системе будет полностью определяться взаимной согласованностью АЧХ оптимального фильтра с амплитудным спектром сигнала. При этом достоверность принимаемых данных будет снижена:

1) из-за искажений амплитудного спектра сигнала в радиоканале;

2) из-за finитности импульсной характеристики селектирующего фильтра (рис. 3).

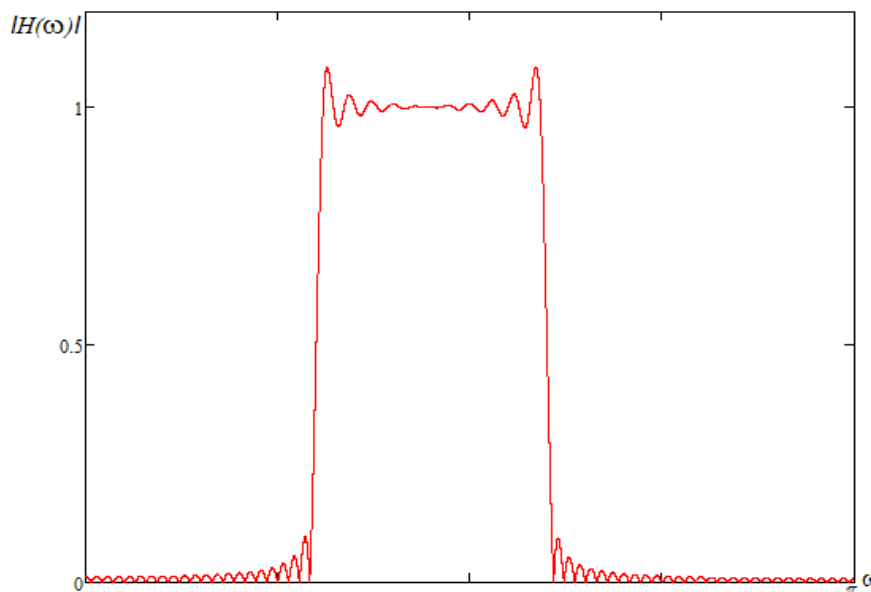


Рис. 3. Проявление явления Гиббса на амплитудно-частотную характеристику селектирующего фильтра

Fig. 3. The manifestation of the Gibbs phenomenon on the amplitude-frequency response of the selected filter

В проводимом эксперименте оценки эквивалента энергетического проигрыша в селектирующем фильтре потери из-за «искусственного» рассогласования АЧХ оптимального фильтра с ФНЧ демодулирующего устройства пренебрегаются.

Эквивалент энергетического проигрыша из-за несогласованности сигнала с оптимальным фильтром (Гцф) определяется

$$G_{\text{цф}} = \frac{q_{\text{sf_ideal}}}{q_{\text{sf_real}}}, \quad (14)$$

где $q_{\text{sf_ideal}}$, $q_{\text{sf_real}}$ – отношение сигнал-шум на выходе комплексного оптимального фильтра в случае прохождения через идеальный и исследуемый селективные фильтры соответственно.

$$\begin{aligned} P_{BP}(q_{\text{avrgen}}) = & \frac{4}{L} \cdot \left(H_1 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) \right)^2 + \right. \\ & + H_2 \cdot 0,5 \cdot \left(1 + \Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) \right) \cdot \Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) + \\ & \left. + H_3 \cdot \left(\Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) \right)^2 \right), \end{aligned} \quad (16)$$

где $q_{\text{lgen}} = f(q_{\text{avrgen}}) = \text{const} \cdot q_{\text{avrgen}}$, причем const – это множитель при q_{lgen} в левой части выражения (17); L – позиция модуляции, H_3 , H_2 , H_1 – количество векторов в сигнальном созвездии с заданными пределами условных вероятностей правильного приёма в одном из квадрантов.

Математическая зависимость между средним и минимальным значениями отношения сигнал-шум:

$$q_{\text{avrgen}} = \sum_{mp} \left(\frac{U_{mp}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot q_{\text{lgen}} \cdot \frac{4}{L}, \quad (17)$$

Также в работе следует рассматривать вклад, внесенный селектирующим фильтром, в значение межсимвольной интерференции.

Для памяти радиоканала не превышающей 10:

$$\begin{aligned} P_{\text{osh}}(q_{\text{avr_gen}}) &= P_{\text{osh}}(q_{\text{avr}} + q_{\text{MSI}}), \\ q_{\text{MSI}} &= \sum_{i=1}^M q_{i\text{MSI}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где M – память радиоканала; q_{MSI} – отношение сигнал-шум с учётом межсимвольной интерференции; $q_{i\text{MSI}}$ – отношение сигнал-шум с учётом межсимвольной интерференции от i -го символа.

Вероятность правильного приема для одной из «четвертей» констелляционной плоскости определяется как

где m , p – количество уровней по в сигнальной матрице; q_{lgen} – минимальное отношение сигнал-шум; U_{mp} – значение вектора сигнала.

Если память радиоканала свыше 10 символов, необходимо использовать выражение

$$\begin{aligned} P_{\text{osh}} = & \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(uh_0)}{u} \times \\ & \times \exp(-0,5u^2\sigma^2) \prod_{k \neq 0}^k \cos(uh_k) du, \end{aligned} \quad (18)$$

где u – напряжение на входе системы;
 h_k – отклик системы в k -отчете; σ –
 среднеквадратическое отклонение.

Нормирующие коэффициенты пиковых значений при расчете эквивалента энергетических потерь в НЦФ для сигналов с КАМ определяются как:

$$\begin{aligned} q_{\text{avrgen-64}} &= 0,872 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-256}} &= 0,817 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-1024}} &= 0,792 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-4096}} &= 0,779 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-32}} &= 1,027 q_{\text{avrgen-16}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Учет неравномерности созвездия χ осуществляется следующими поправками, представленными ниже (табл. 1).

Таблица 1. Поправка в среднее отношение сигнал-шум для учёта коэффициента неравномерности созвездия [20]

Table 1. Correction of the average signal-to-noise ratio to account for the coefficient irregularities of the constellation [20]

Позиционность модуляции L	Коэффициент неравномерности созвездия χ	Поправка k , $\times 10^{-5}$	Позиционность модуляции L	Коэффициент неравномерности созвездия χ	Поправка k , $\times 10^{-5}$
16	1	100000	32	1	100000
	2	91688		2	91159
	3	86946		3	85429
	4	83848		4	81471
	5	81808		5	78478
64	1	100000	128	1	100000
	2	93750		2	94483
	3	89260		3	90132
	4	85655		4	86572
	5	82996		5	83664
256	1	100000	512	1	100000
	2	96321		2	97048
	3	93053		3	94434
	4	90424		4	91958
	5	88073		5	89761
1024	1	100000	2048	1	100000
	2	96667		2	98470
	3	94836		3	96987
	4	93232		4	95547
	5	91681		5	94150
4096	1	100000	8192	1	100000
	2	99099		2	99027
	3	98039		3	98263
	4	97002		4	97510
	5	96154		5	96768

Расчет эквивалента энергетического проигрыша цифрового селектирующего фильтра (дБ) определяется как

$$\begin{aligned} \text{ЭЭП} &= q_{\text{avrgen}}(n^*, L) - q_{\text{avrgen}}(\infty, L) \\ &\text{при } P_{\text{osh}} = \text{const}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $P_{\text{osh}}(q_{\text{avrgen}}) = 1 - P_{BP}(q_{\text{avrgen}})$; n^* – порядок исследуемого КИХ-фильтра.

Результаты и их обсуждение

На базе предложенной методики расчета эквивалента энергетического проигрыша в селектирующих фильтрах показаны математические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум для следующих нерекурсивных типов фильтров [19]:

$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(k-1)}{(n-1)r} \right) \right), & 1 \leq k \leq \frac{(n-1)r}{2} + 1, \\ 1, & \frac{(n-1)r}{2} + 1 \leq k \leq n - \frac{(n-1)r}{2}, \\ \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(k-n)}{(n-1)r} \right) \right), & n - \frac{(n-1)r}{2} \leq k \leq n. \end{cases} \quad (22)$$

При $r = 0$ окно Тьюки прямоугольное, а при $r = 1$ вырождается в окно Ханна.

На рисунках 4–7 представлены аналитические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при

Весовое окно Чебышева определяется как [19]:

$$S(w) = \frac{\cos \left((n-1) \arccos \left(\alpha \cos \left(\pi \frac{\omega}{\omega_d} \right) \right) \right)}{\text{ch}((n-1) \text{arch}(\alpha))}, \quad \alpha = \text{ch} \left(\frac{\text{arch}(10^{\beta/20})}{n-1} \right), \quad (23)$$

где β – степень подавления боковых лепестков в децибелах; n – количество отчётов окна.

- Кайзера;
- Тьюки;
- Чебышева;
- Бартлетта-Ханна.

Весовое окно Кайзера определяется как

$$w(k) = \frac{\left| I_0 \left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2k-n-1}{n-1} \right)^2} \right) \right|}{|I_0(\beta)|}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (21)$$

где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Весовое окно Тьюки определяется как

прохождении сигналов с КАМ различной позиционности, неравномерностью сигнального созвездия $\chi = 1$ через симметричный НЦФ 80 порядка с весовыми функциями Кайзера ($\beta = 9$), Тьюки ($r = 0,5$).

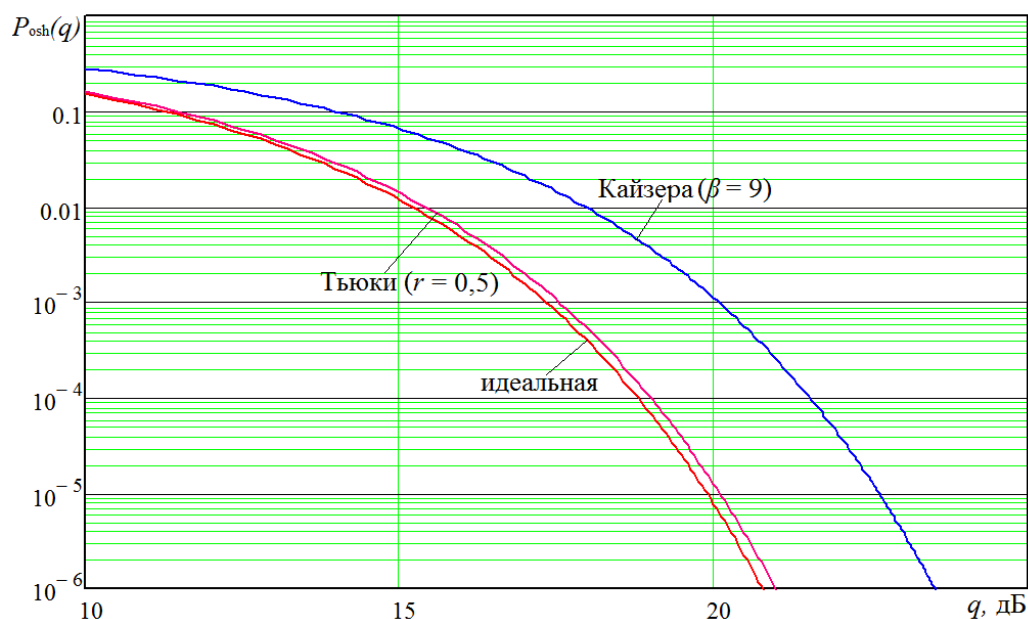


Рис. 4. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-16 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюкиг = 0,5

Fig. 4. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a KAM-16 signal through filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tucker = 0,5

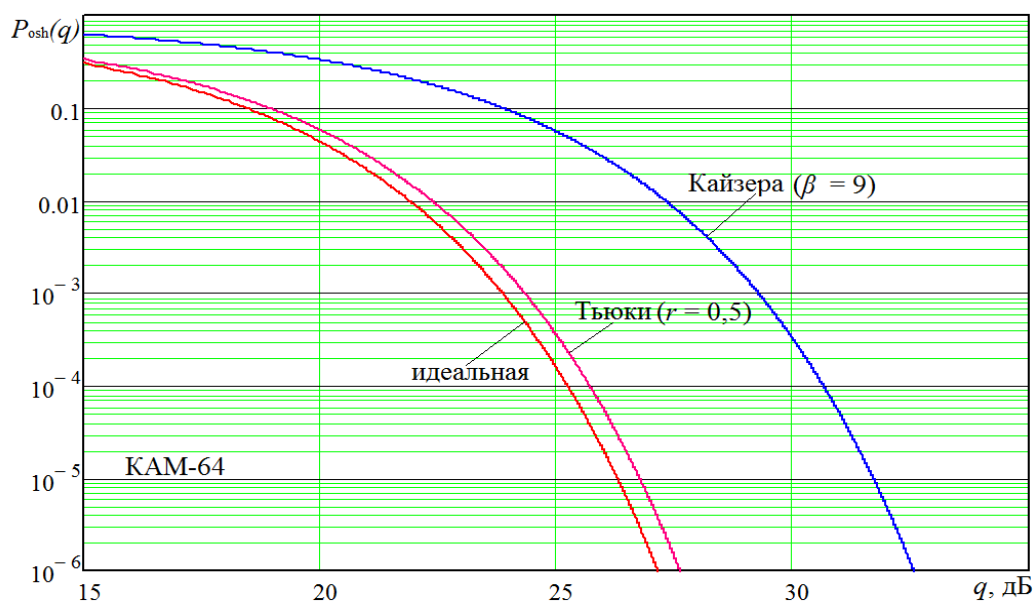


Рис. 5. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-64 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюкиг = 0,5

Fig. 5. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a KAM-64 signal through filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tucker = 0,5

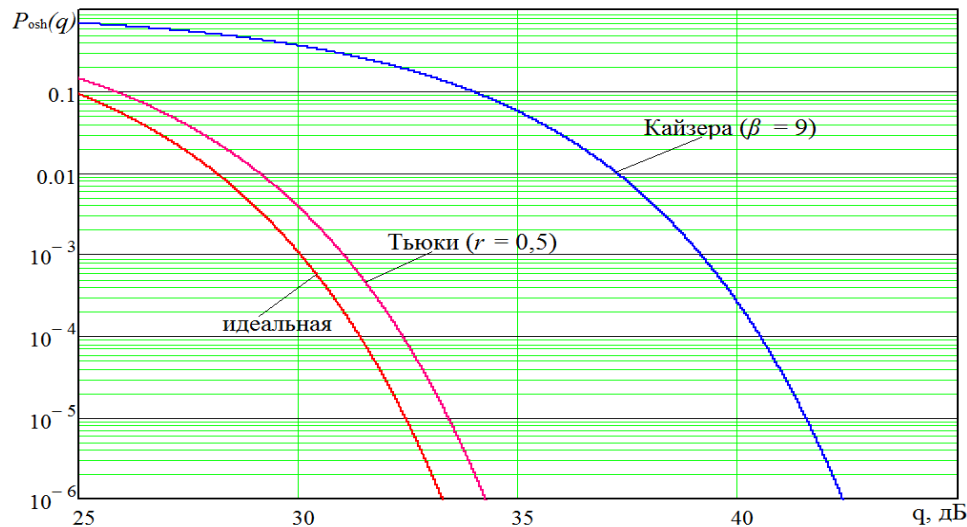


Рис. 6. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-256 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюкиг = 0,5

Fig. 6. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a KAM-256 signal through filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tucker = 0,5

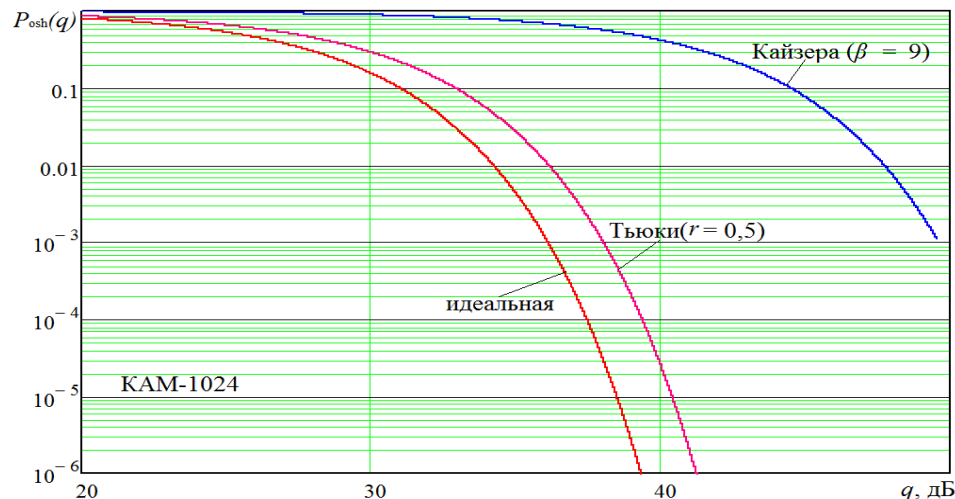


Рис. 7. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-1024 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюкиг = 0,5

Fig. 7. Dependence of the error probability per symbol on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM signal with a positionality of 1024 through symmetrical non-recursive filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tukey $r = 0,5$

Весовое окно Бартлетта-Ханна определяется как [19]:

$$w(k) = 0,62 - 0,48 \left| \frac{k-1}{n-1} - 0,5 \right| - 0,38 \cos \left(2\pi \frac{k-1}{n-1} \right). \quad (24)$$

На рисунках 8–11 представлены аналитические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигналов с КАМ различной позиционности, неравномерностью

сигнального созвездия $\chi = 1$ через симметричный НЦФ 80 порядка с весовыми

функциями Чебышева ($\beta = 40$ дБ), Барлетта-Ханна.

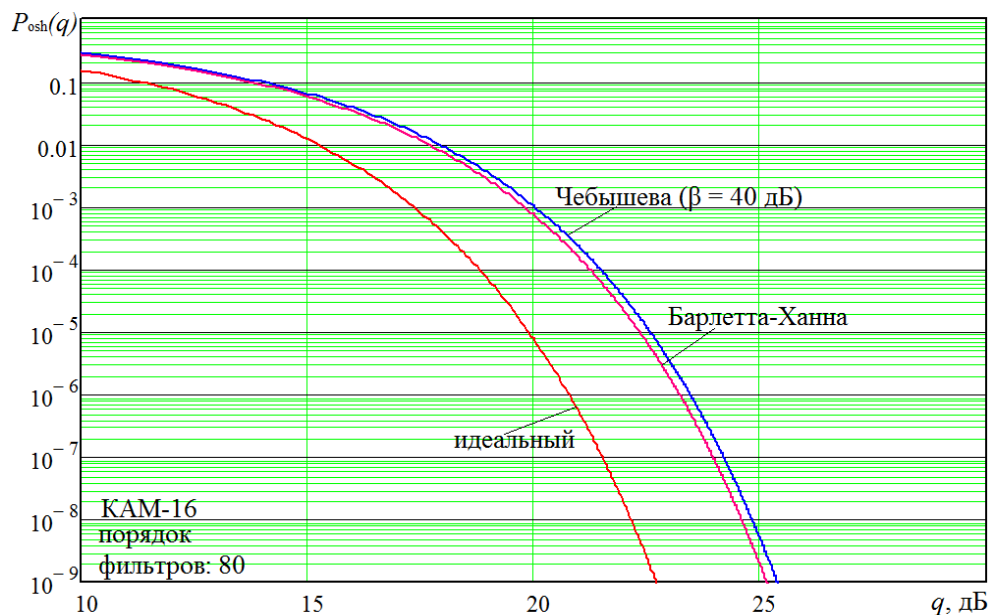


Рис. 8. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-16 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта – Ханна

Fig. 8. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-16 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett – Hanna

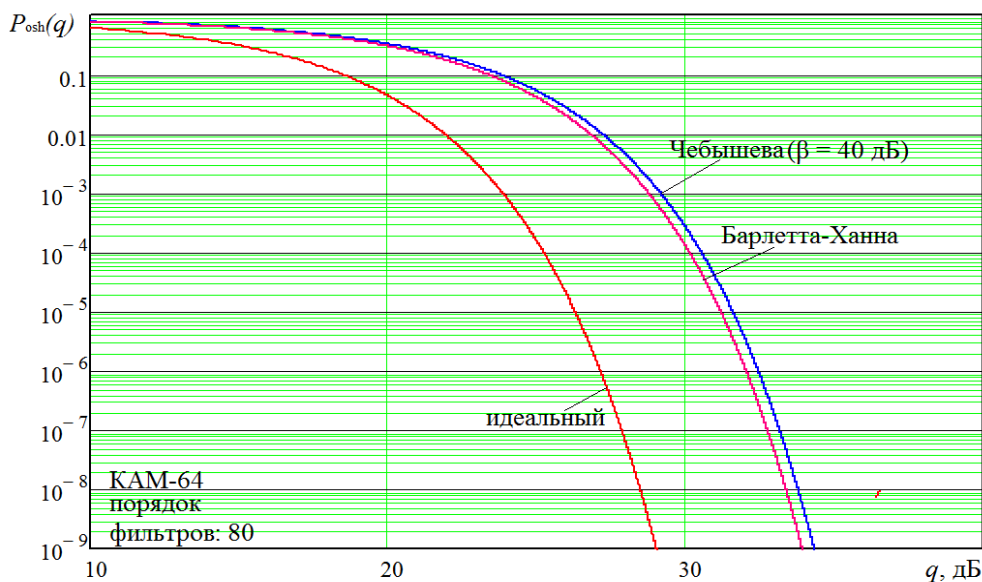


Рис. 9. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-64 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта – Ханна

Fig. 9. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-64 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett – Hanna

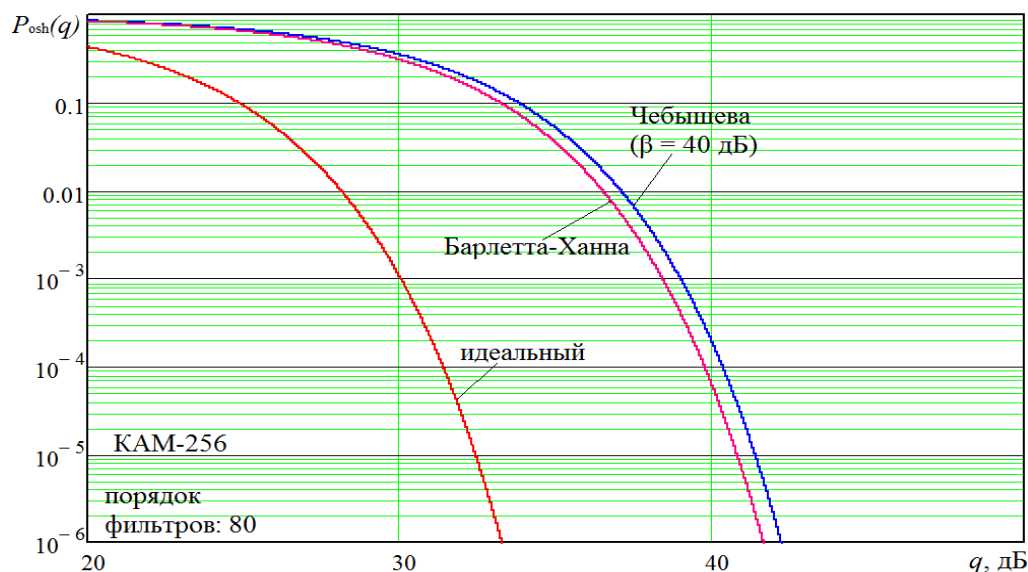


Рис. 10. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-256 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта-Ханна

Fig. 10. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-256 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett-Hanna

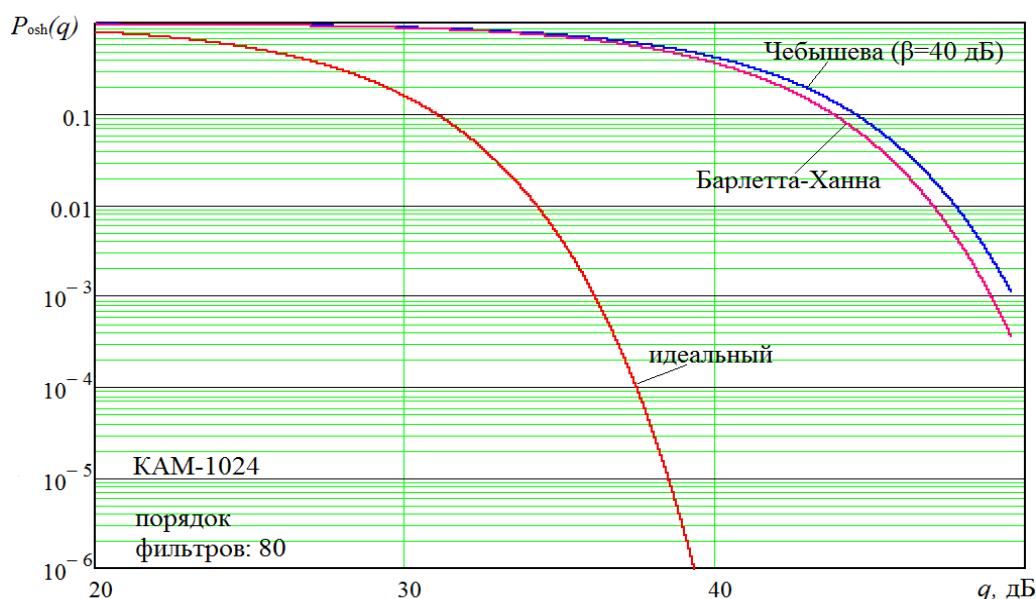


Рис. 11. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-1024 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта-Ханна

Fig. 11. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-1024 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett-Hanna

На рисунках 12–17 показаны математические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от

отношения сигнал-шум при прохождении сигналов с КАМ-16, -64, -1024 через нерекурсивные фильтры с весовым

окном Кайзера ($\beta = 7$, $\beta = 9$) (порядок фильтров: 80, 100, 120) [19].

Из анализа матзависимостей при повышении порядка фильтра с 80 до 120 эквивалент энергетического проигрыша,

вызванный неравномерностью АЧХ, снижаются для КАМ-16 на 0,15 дБ, КАМ-64 – на 0,33 дБ, КАМ-1024 – на 0,92 дБ ($P_{\text{osh}} = 10^{-6}$, весовая функция Кайзера, $\beta = 7$).

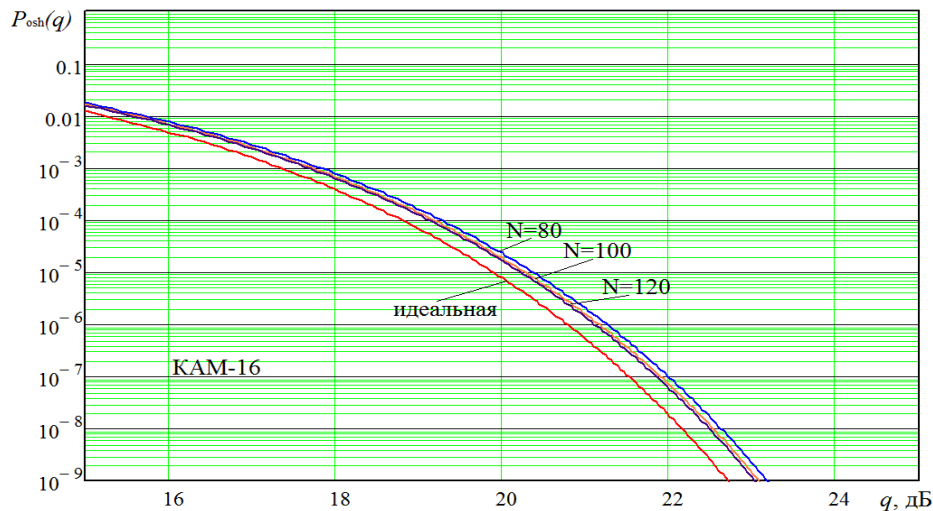


Рис. 12. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 7$) сигнала с КАМ-16 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 12. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 7$) of a signal from QAM-16 (filter order: 80, 100, 120)

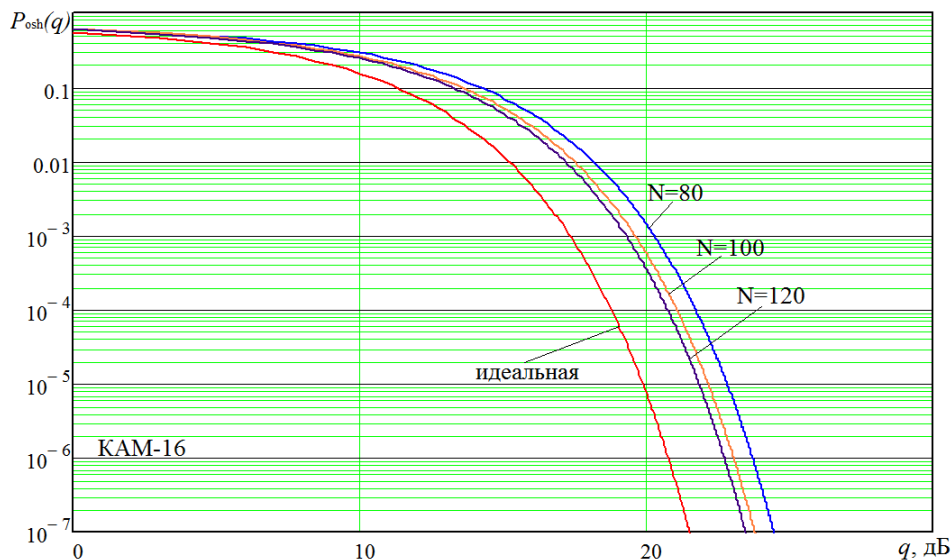


Рис. 13. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 9$) сигнала с КАМ-16 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 13. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 9$) of a signal from QAM-16 (filter order: 80, 100, 120)

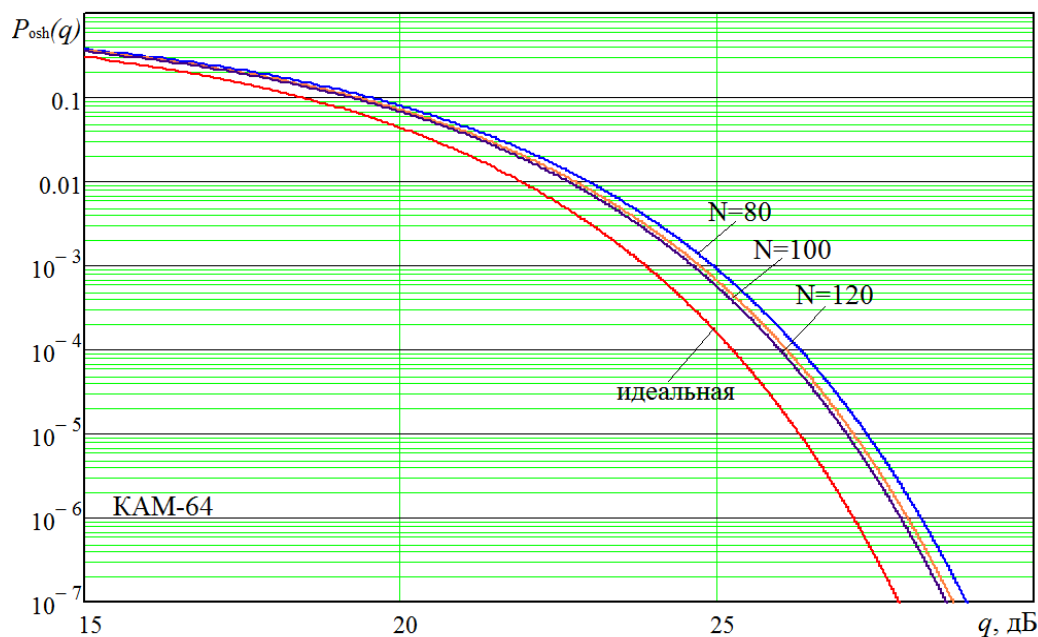


Рис. 14. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 7$) сигнала с КАМ-64 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 14. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 7$) of a signal from QAM-64 (filter order: 80, 100, 120)

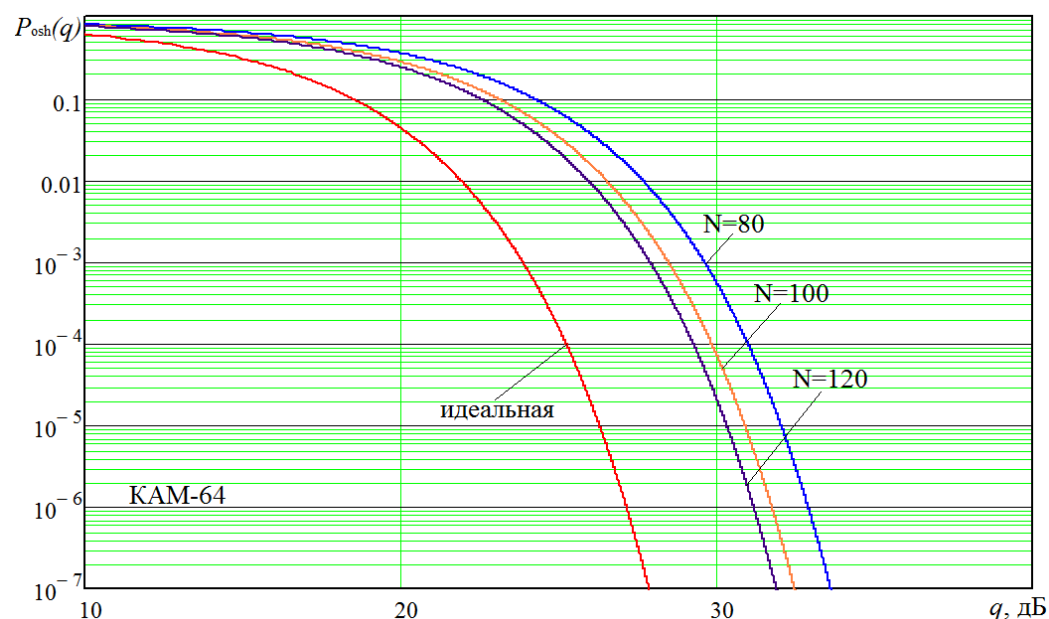


Рис. 15. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 9$) сигнала с КАМ-64 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 15. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 9$) of a signal from QAM-64 (filter order: 80, 100, 120)

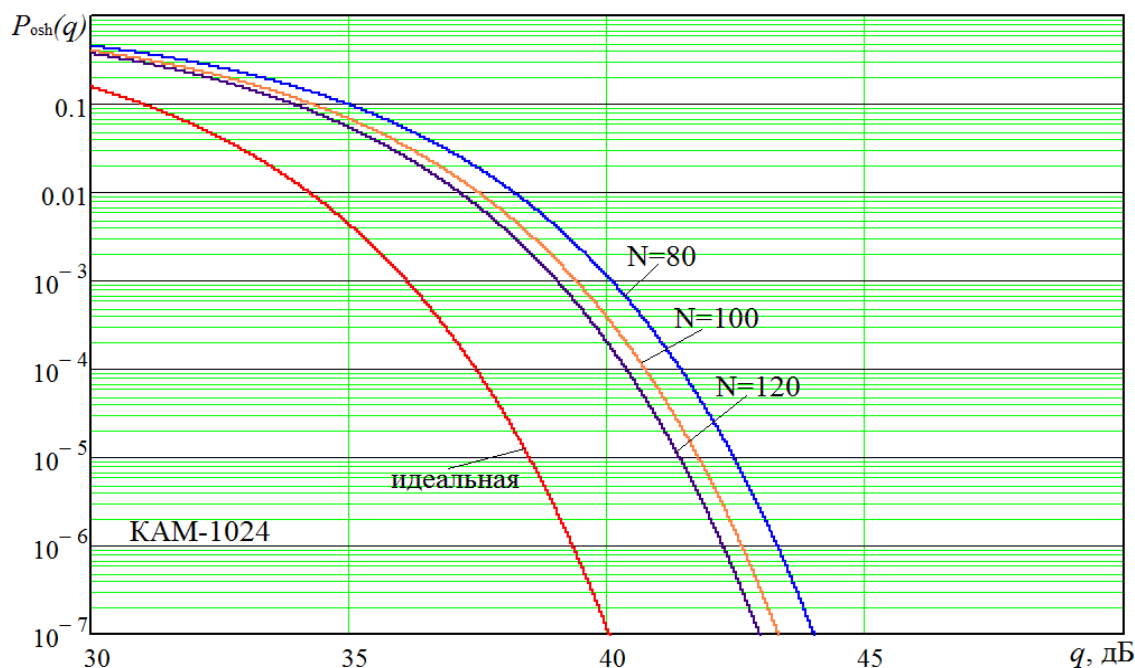


Рис. 16. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 7$) сигнала с КАМ-1024 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 16. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 7$) of a signal from QAM-1024 (filter order: 80, 100, 120)

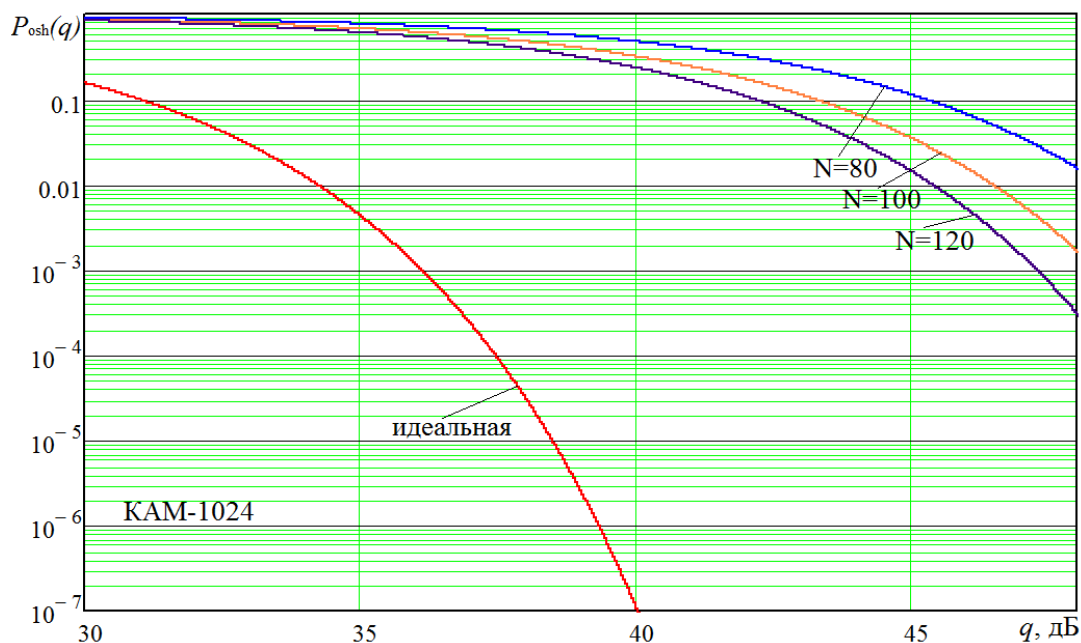


Рис. 17. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 9$) сигнала с КАМ-1024 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 17. Dependences of losses in the reliability of the received data on the ratio signal-to-noise when passing through a non-recursive filter with a weight Kaiser window ($\beta = 9$) of the signal from KAM-1024 (filter order: 80, 100, 120)

Оцененный эквивалент энергетического проигрыша фильтра Кайзера ($\beta = 9$) при приеме сигналов с КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024 при $P_{\text{osh}} = 10^{-6}$, порядке фильтра – 80 соответственно равен: 2,25; 3,87; 7,5; 11,22 дБ.

Выводы

В работе показана методика расчета эквивалента энергетических потерь в селектирующих фильтрах, которая позволяет в дальнейшем провести

обоснованное предъявление требований к параметрам фильтров при синтезе многокритериальных средств радиосвязи.

Предложенный метод повышает достоверность определения значений критериев минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости, а также минимизации использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды.

Список литературы

1. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего обнаружения источника возгорания / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. Н. Брежнева [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 93–110.
2. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 372 с.
3. Лисничук А. А. Процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора и повышения структурной скрытности систем передачи информации // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 77. С. 17–28.
4. Лисничук А. А. Многокритериальный синтез радиосигналов с прямым расширением спектра для адаптивных к узкополосным и структурным помехам систем передачи информации // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 19–23.
5. Многокритериальный подход к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов сложных технических объектов / С. Н. Кириллов, А. А. Лисничук, П. С. Писака [и др.] // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 75. С. 3–14.
6. Концепция построения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчелиных семей / И. Г. Бабанин, Е. Ю. Бабанина, А. А. Боголюбская [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 8–26.
7. 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.

8. Метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга источников радиоизлучения с квадратурной амплитудной модуляцией спутниковых систем связи / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин, Е. Ю. Бабанина, А. В. Хмелевская // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 41–63.
9. Фокин Г. А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов // Труды учебных заведений связи. 2019. № 5 (1). С. 78–94.
10. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Модифицированная математическая модель приемного тракта цифровых линий связи // Телекоммуникации. 2022. № 6. С. 16–23.
11. Леон Г., Коптев Д. С. Оценка влияния качества функционирования гетеродинов радиоприемных устройств на помехозащищенность приема цифровых сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Системы формирования и обработки сигналов в области бортовой связи. 2023. Т. 6, № 1. С. 264–268.
12. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстродействующей обработке символьной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–119.
13. Плугатарев А. В., Егоров С. И., Локтионов А. П. Метод определения источника сообщений на основе обработки времени их поступления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26, № 3. С. 81–97.
14. Прототип приемопередающего оборудования скоростной передачи данных в частотном диапазоне 57–64 ГГц / О. В. Болховская, Г. А. Ермолаев, С. Н. Трушков, А. А. Мальцев // Труды учебных заведений связи. 2023. № 9 (2). С. 23–39.
15. Кулешова Е. А., Таныгин М. О. Исследование характеристик современных генераторов псевдослучайных последовательностей // Телекоммуникации. 2023. № 7. С. 28–39.
16. Лисничук А. А., Батищев А. В. Двухкритериальный синтез OFDM-сигналов для повышения энергетической эффективности и помехоустойчивости // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 76. С. 3–16.
17. Липатников В. А., Петренко М. И. Модель самоорганизующейся сети радиосвязи, функционирующей в сложной сигнально-помеховой обстановке / В. А. Липатников // Труды учебных заведений связи. 2023. № 9 (2). С. 72–80.
18. Способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MavLink при управлении автономными БПЛА / А. В. Хмелевская, А. Е. Севрюков, А. А. Севрюков [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 122–141.
19. Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Методологические основы выбора параметров фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь

в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2020. 136 с.

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

References

1. Tomakova R.A., Filist S.A., Brezhnev A.N., et al. Method and algorithm of autonomous flight trajectory planning of an unmanned aerial vehicle when monitoring the fire situation in order to detect the source of ignition early. *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(1):93–110. (In Russ.)

2. Galkin V.A. Fundamentals of software-configurable radio. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2023. 372 p. (In Russ.)

3. Lisnichuk A.A. The procedure of multicriteria synthesis of OFDM radio signals to reduce the peak coefficient and increase the structural secrecy of information transmission systems. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(77):17–28. (In Russ.)

4. Lisnichuk A.A. Multicriteria synthesis of radio signals with direct spectrum expansion for information transmission systems adaptive to narrowband and structural interference. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2022;(1):19–23. (In Russ.)

5. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Pisaka P.S., et al. Multicriteria approach to selection procedures for encoding telemetric radio signals of complex technical objects. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(75):3–14. (In Russ.)

6. Babanin I.G., Babanina E.Y., Bogolyubskaya A.A., et al. The concept of building an intelligent information and telecommunications system for monitoring and managing the vital activity of bee colonies. *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):8–26. (In Russ.)

7. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)

8. Babanin I.G., Mukhin I.E., Babanina E.Y., Khmelevskaya A.V. Method of parametric synthesis of electromagnetic access systems for radio monitoring of radio sources with

quadrature amplitude modulation of satellite communication systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(4):41–63. (In Russ.)

9. Fokin G.A. Principles and technologies of digital communication based on software-configurable radio: an overview of current trends in the field of creating a complex of training specialists. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2019;5(1):78–94. (In Russ.)

10. Dovbnya V.G., Koptev D.S. Modified mathematical model of the receiving path of digital communication lines. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2022;(6):16–23.

11. Leon G., Koptev D.S. Assessment of the influence of the quality of functioning of radio receiver heterodynes on the noise immunity of receiving digital signals with quadrature amplitude modulation. *Sistemy formirovaniya i obrabotki signalov v oblasti bortovoi svyazi = Signal Generation and Processing Systems in the Field of On-board Communications*. 2023;6(1):264–268. (In Russ.)

12. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. Methods of improving the selected image area with high-speed processing of symbolic information. *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):106–119. (In Russ.)

13. Plugatarev A.V., Egorov S.I., Loktionov A.P. A method for determining the source of messages based on processing the time of their receipt. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. = Proceedings of the Southwest State University*. 2022;26(3):81–97. (In Russ.)

14. Bolkhovskaya O.V., Ermolaev G.A., Trushkov S.N., Maltsev A.A. Prototype of high-speed data transmission equipment in the frequency range 57–64 GHz band. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2023;9(2):23–39. (In Russ.)

15. Kuleshova E.A., Tanygin M.O. Investigation of the characteristics of modern pseudorandom sequence generators. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2023;(7):28–39. (In Russ.)

16. Lisnichuk A.A., Batishchev A.V. Two-criteria synthesis of OFDM signals to improve energy efficiency and noise immunity. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(76):3–16. (In Russ.)

17. Lipatnikov V.A., Petrenko M.I. Model of a self-organizing radio communication network operating in a complex signal-interference environment. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2023;9(2):72–80. (In Russ.)

18. Khmelevskaya A.V., Sevryukov A.E., Sevryukov A.A., et. al. A method for implementing cryptographic protection of channels for organizing communication using the MAVLink protocol when controlling autonomous UAVs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika*.

Meditinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2022;12(4):122–141. (In Russ.)

19. Babanin I.G., Mukhin I.E., Koptev D.S. Methodological foundations for the selection of parameters of frequency selection filters taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvenyi universitet; 2020. 136 p. (In Russ.)

20. Filist S.A., Tomakova R.A., Nefedov N.G., et al. Intelligent image processing system obtained from unmanned aerial vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2022;12(4):64–85. (In Russ.)*

Информация об авторах / Information about the Authors

Бабанин Иван Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanin_ivan@bk.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Ivan G. Babanin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanin_ivan@bk.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Бабанина Екатерина Юрьевна, ассистент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanina@internet.ru, ORCID: 0009-0001-8014-6506

Ekaterina Yu. Babanina, Assistant of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanina@internet.ru, ORCID: 0009-0001-8014-6506

Михайлова Олеся Юрьевна, студент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mikhailova.olesya.u@gmail.com, ORCID: 0009-0003-0018-9595

Olesya Yu. Mikhailova, Student of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mikhailova.olesya.u@gmail.com, ORCID: 0009-0003-0018-9595

Хмелевская Алена Валентиновна, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecture of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0009-0003-0018-9595

Исследование влияния линейных и угловых девиаций БЛА на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности, получаемых в режиме прямолинейного горизонтального полёта

В. Г. Андронов¹✉, А. А. Чуев¹

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Цель исследования – оценка совместного и раздельного влияния линейных и угловых отклонений БЛА от траектории прямолинейного горизонтального полёта на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности.

Методы. Получение количественных оценок основано на исследовании чувствительности модели, описывающей функциональную связь между параметрами отклонений БЛА от заданной траектории и изменениями продольных и поперечных параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, обусловленными этими отклонениями.

Результаты. Разность продольных параллаксов в условиях отсутствия линейных девиаций БЛА независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия всегда положительна и с ростом уровня угловых девиаций возрастает, а поперечных – отрицательна и уменьшается, причём величина первой в три раза больше, чем второй. Разность поперечных параллаксов в условиях отсутствия угловых девиаций БЛА при положительной ординате точки в зоне перекрытия положительна, а продольных – отрицательна, а при отрицательной ординате – наоборот. При этом независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия с ростом уровня линейных девиаций БЛА первая возрастает, вторая – убывает, а величина первой в четыре раза больше, чем второй.

Заключение. Величина разностей параллаксов зависит от уровней линейных и угловых девиаций БЛА, возникших в момент регистрации наклонного снимка, а знак – от знака ординаты соответственной точки в зоне перекрытия второй пары снимков. При этом разность продольных параллаксов всегда прямо пропорциональна уровню угловых девиаций и обратно пропорциональна уровню линейных девиаций, а поперечных параллаксов – прямо пропорциональна уровню угловых девиаций при отрицательных значениях ординаты точки и обратно пропорциональна при её положительных значениях.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; параллакс изображений; аэрофотосъемка; обработка перекрывающихся аэрофотоснимков; отклонения от заданной траектории полёта.

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

Для цитирования: Андронов В. Г., Чуев А. А. Исследование влияния линейных и угловых девиаций БЛА на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности, получаемых в режиме прямолинейного горизонтального полёта // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 88–103. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-14-3-88-103>

Поступила в редакцию 16.07.2024

Подписана в печать 11.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Investigation of the influence of linear and angular deviations of UAVS on the change in parallaxes of images of the underlying surface obtained in the mode of rectilinear horizontal flight

Vladimir G. Andronov¹ ✉, Andrey A. Chuev¹

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is assessment of the joint and separate influence of linear and angular deviations of the UAV from the trajectory of rectilinear horizontal flight on the change in parallax images of the underlying surface.

Methods. Quantitative estimates are based on a study of the sensitivity of a model describing the functional relationship between the parameters of UAV deviations from a given trajectory and changes in the longitudinal and transverse parallaxes of overlapping images of the underlying surface caused by these deviations.

Results. The difference of longitudinal parallaxes in the absence of linear deviations of the UAV, regardless of the sign of the ordinate of the point in the overlap zone, is always positive and increases with an increase in the level of angular deviations, and transverse deviations are negative and decrease, and the value of the first is three times greater than the second. The difference of the transverse parallaxes in the absence of angular deviations of the UAV at a positive ordinate point in the overlap zone is positive, and the longitudinal parallaxes are negative, and at a negative ordinate, on the contrary. At the same time, regardless of the sign of the ordinate of the point in the overlap zone, with an increase in the level of linear deviations of the UAV, the first increases, the second decreases, and the value of the first is four times greater than the second.

Conclusion. The magnitude of the parallax differences depends on the levels of linear and angular deviations of the UAV that occurred at the time of registration of the inclined image, and the sign depends on the sign of the ordinate of the corresponding point in the overlap zone of the second pair of images. In this case, the difference of longitudinal parallaxes is always directly proportional to the level of angular deviations and inversely proportional to the level of linear deviations, and transverse parallaxes is directly proportional to the level of angular deviations at negative values of the ordinate of the point and inversely proportional at its positive values.

Keywords: unmanned aerial vehicle; parallax images; aerial photography; processing of overlapping aerial photographs; deviations from a given flight path.

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

For citation: Andronov V.G., Chuev A.A. Investigation of the influence of linear and angular deviations of UAVS on the change in parallaxes of images of the underlying surface obtained in the mode of rectilinear horizontal flight. *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*. 2024;14(3):88–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-88-103>

Received 16.07.2024

Accepted 11.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Одной из тенденций мирового научно-технического прогресса является бурное развитие беспилотных авиационных систем, в особенности мало-размерных БЛА с весом до 5 кг и размахом крыла до двух метров, которые из-за их сравнительно низкой стоимости широко используются для решения различных целевых задач во многих сферах деятельности [1]. Для эффективного решения этих задач большое значение имеет точность выхода таких БЛА к району целевого применения, которая обеспечивается элементами их системы управления [2]. Одним из основных элементов является система навигации, которая, как правило, включает в себя контуры инерциальных и спутниковых измерений и обработки информации, обеспечивающие определение параметров полёта БЛА и их отклонений от программных значений [3]. Совместное использование этих контуров позволяет сочетать свойства инерциальных навигационных систем (ИНС), имеющих пространственную память, но отличающихся накоплением погрешностей во времени, и спутниковых навигационных систем (СНС), характеризующихся отсутствием пространственной памяти, но обладающих высокой точностью определения координат без накопления погрешностей во времени [4].

Характеристики системы навигации БЛА, как и любой сложной технической системы, которая эксплуатируется во

взаимодействии с внешней средой, должны поддерживаться в заданных пределах как в нормальном (штатном) режиме функционирования, так и в условиях внешних воздействий [5]. В первом случае система навигации БЛА обеспечивает периодическое получение высокоточной информации об отклонениях маршрута полёта от программной траектории от СНС, по которой выполняется коррекция непрерывных инерциальных измерений [6]. Во втором случае может произойти снижение её точности, обусловленное влиянием таких внешних воздействий, как сложная электромагнитная обстановка, радиопомехи, порывы ветра, попадание в восходящий поток или воздушную яму [7]. Это приводит, с одной стороны, к потере сигналов от спутников, что вызывает быстрый рост погрешностей инерциальных измерений [8], а с другой – обуславливает возникновение некоординированных, т. е. не связанных с программными маневрами, девиаций БЛА [9]. Совместное воздействие этих факторов может привести к существенному отклонению траектории полёта БЛА от заданной и снижению эффективности решения поставленных задач [10]. В этой связи актуальными являются исследования путей повышения точности инерциально-спутниковой системы навигации БЛА [11], обеспечивающих в условиях внешних воздействий получение и обработку дополнительной навигационной информации о текущем положении и ориентации

БЛА [12]. С этой целью наиболее широко применяется информация, получаемая в результате обработки изображений подстилающей поверхности [13], которые в процессе полёта БЛА непрерывно регистрируются установленной на его борту системой видеонаблюдения, в частности цифровой фотокамерой [14].

Материалы и методы

Одним из перспективных путей повышения точности инерциально-спутниковой системы навигации БЛА в условиях внешних воздействий [15] по изображениям подстилающей поверхности является использование информации об их параллаксах [16]. Методология такого подхода заключается в следующем. Считается, что БЛА совершает движение по заданной траектории, которая представляет собой прямолинейный маршрут [17], параллельный плоскости местного горизонта, и характеризуется отсутствием программных маневров по направлению и высоте полёта [18]. При

этом система автоматического управления БЛА функционирует в режиме стабилизации и с требуемой точностью обрабатывает некоординированные отклонения БЛА от заданной траектории [19]. Для этого датчиками инерциальной навигационной системы непрерывно измеряются параметры полёта БЛА, а также выполняется периодическая коррекция их значений по сигналам навигационных спутников. Наряду с этими навигационными измерениями цифровой фотокамерой с фокусным расстоянием f , установленной на борту БЛА, осуществляется регистрация смежных пар P_j, P_{j+1} перекрывающихся горизонтальных снимков подстилающей поверхности и определение их продольных и поперечных параллаксов (рис. 1): $p_{ш} = x_j(n_i) - x_{j+1}(n_{i+1})$, $q_{ш} = y_j(n_i) - y_{j+1}(n_{i+1})$, где $j = \overline{1, J}$, $x(n_i), y(n_i)$ – плоские координаты изображений точек земной поверхности N_i в зонах перекрытия снимков, $i = \overline{1, I}$.

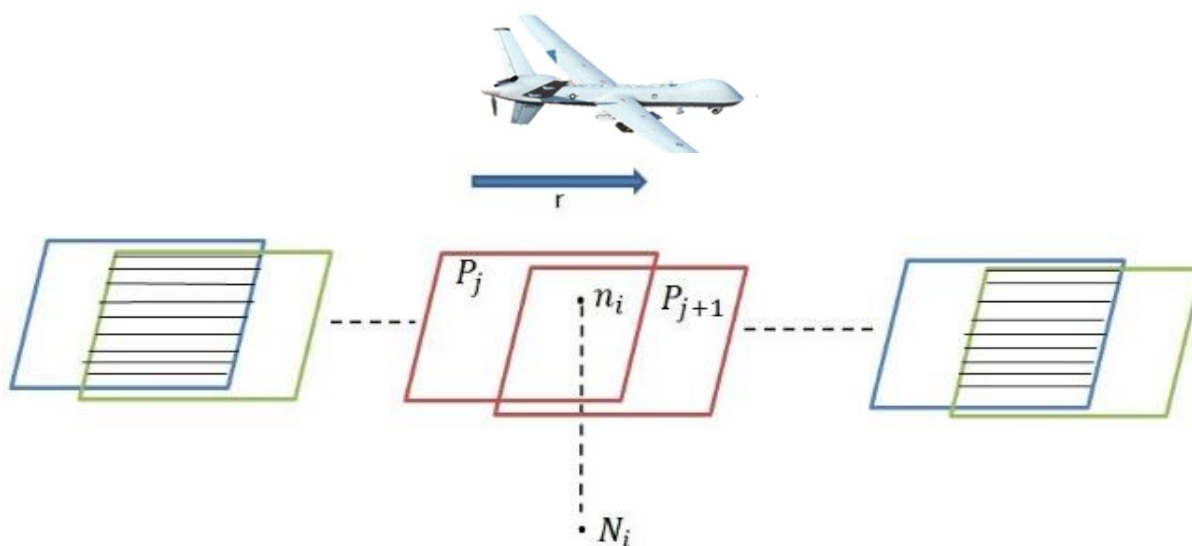


Рис. 1. Режим прямолинейного горизонтального полёта БЛА [20]

Fig. 1. UAV straight-line horizontal flight mode [20]

Полагается, что в какой-то момент полёта БЛА по заданной траектории в результате внешних воздействий происходит потеря сигналов от навигационных спутников. При этом продолжается регистрация перекрывающихся горизонтальных снимков P_{j^*,j^*+1}^* , а ещё через некоторое время, например после получения снимка горизонтального снимка P_1 , возникают некоординированные отклонения БЛА (рис. 2), в условиях которых

регистрируется перекрывающийся с ним снимок P_2 . По условиям задачи считается, что перекрывающиеся горизонтальные снимки $P_j, P_{j+1}, \dots, P_{j^*,j^*+1}^*$ получены с одной высоты полёта, вследствие чего разности параллаксов смежных пар этих снимков: $p_{j,j+1} - p_{j+2,j+3}, \dots, =$
 $= p_{j^*-2,j^*-1} - p_{j^*,j^*+1}^*; q_{j,j+1} - q_{j+2,j+3}, \dots, =$
 $= q_{j^*-2,j^*-1} - q_{j^*,j^*+1}^* -$ должны быть равны нулю.

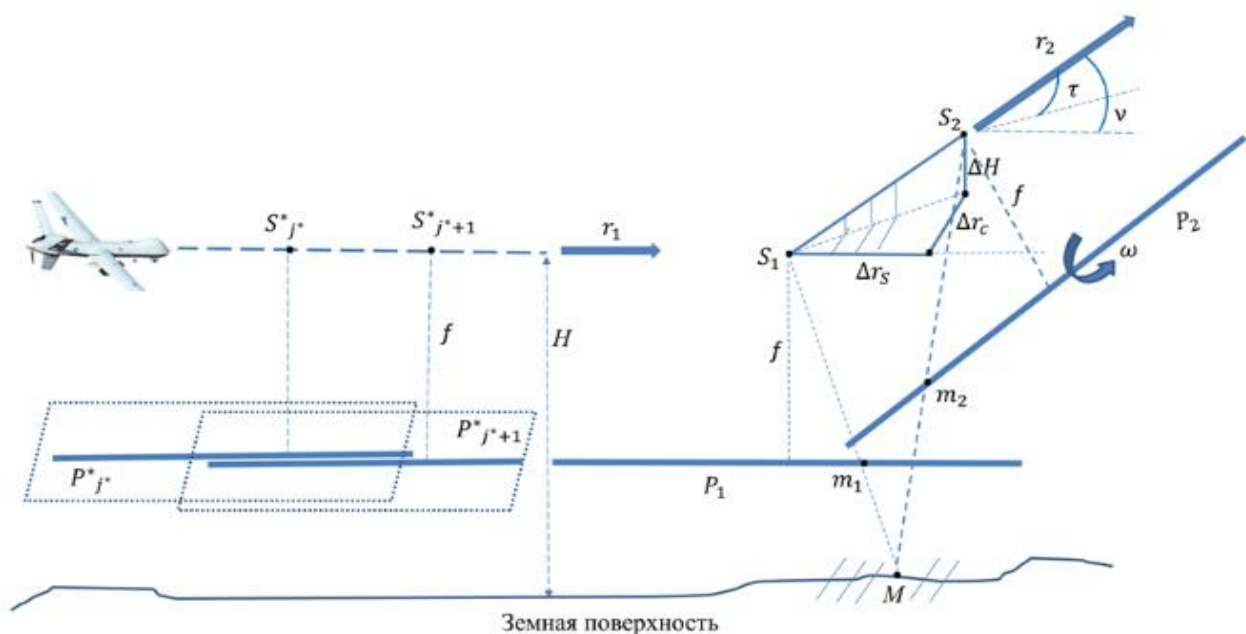


Рис. 2. Иллюстрация отклонений БЛА

Fig. 2. Illustration of UAV deviations

Параметры $\Delta r_c, \Delta H$, характеризующие отклонения возмущённой траектории r_2 БЛА от заданной r_1 по направлению и высоте полёта, вызваны линейными девиациями БЛА. Параметры ν, ω, τ , определяющие изменение ориентации БЛА в результате возникновения некоординированных отклонений,

обусловлены угловыми девиациями БЛА. Эти параметры представляют собой углы тангажа, крена и рыскания БЛА. Угол тангажа – угол ν между продольной осью БЛА, совпадающей с траекторией r_2 , и траекторией r_1 , параллельной плоскости местного горизонта; угол крена – угол ω между поперечной

осью БЛА и плоскостью местного горизонта; угол рыскания – угол τ между продольной осью БЛА при горизонтальной траектории полёта БЛА и её проекцией на горизонтальную плоскость при наклонной траектории.

Для описания линейных и угловых девиаций БЛА разработана математическая модель [18], устанавливающая их функциональную связь с разностями параллаксов Δp , Δq смежных пар снимков:

$$P^* = \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right)v + \frac{x_2 y_2}{f}\omega - y_2 \tau + x_2 \left(1 + \frac{x_2^2}{f}\right)v^2 + x_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}x_2 \tau^2 + 2\frac{x_2^2}{f^2}v\omega - 2\frac{x_2 y_2}{f}v\tau + (x_2^2 - \frac{y_2^2}{f})\omega\tau,$$

$$Q^* = \frac{x_2 y_2}{f}v + \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right)\omega + x_2 \tau + y_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{x_2^2}{f^2}\right)v^2 + y_2 \left(1 + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}y_2 \tau^2 + x_2 \left(1 + 2\frac{y_2^2}{f^2}\right)v\omega + (x_2^2 - \frac{y_2^2}{f})v\tau + 2\frac{x_2 y_2}{f}\omega\tau;$$

x_2, y_2 – плоские координаты точки m_2 в системе координат снимка $P2$ в зоне перекрытия снимков $P1, P2$.

При отсутствии некоординированных отклонений БЛА ($\Delta H = \Delta r_c = v = \omega = \tau = 0$) разности параллаксов равны нулю, а при их возникновении – характеризуют уровень возникающих девиаций БЛА. В этой связи целью работы является оценка степени совместного и раздельного влияния линейных и угловых девиаций БЛА на изменение параллаксов изображений подстилающей поверхности. Методика исследования включает в себя следующую последовательность действий.

$P_{j^* j^*+1}^*$ и $P1, P2$, которая имеет следующий вид:

$$\Delta p = P^* \left(1 + \frac{\Delta H}{H}\right) + x_2 \frac{\Delta H}{H}, \quad (1)$$

$$\Delta q = Q^* \left(1 + \frac{\Delta H}{H}\right) + y_2 \frac{\Delta H}{H} + p_{\text{ш}} \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}, \quad (2)$$

где H – высота съёмки в штатном режиме горизонтального полёта БЛА; Δr_s – расстояние между центрами проекции (центрами тяжести БЛА) $S_{j^*}^*, S_{j^*+1}^*$ в режиме горизонтального полёта БЛА;

Шаг 1. Геометрическое построение макетных снимков $P1, P2$. Выполняется по известной в теории фотограмметрии методологии (рис. 3) на основе характеристик используемой цифровой камеры. В данной работе использовались характеристики цифровой камеры Nikon P700, представленные (табл. 1).

Полученные характеристики макетных снимков для двух вариантов топологии изображения точки местности в зоне перекрытия приведены в таблице 2. При этом будем считать, что плоские координаты точки определяются без ошибок.

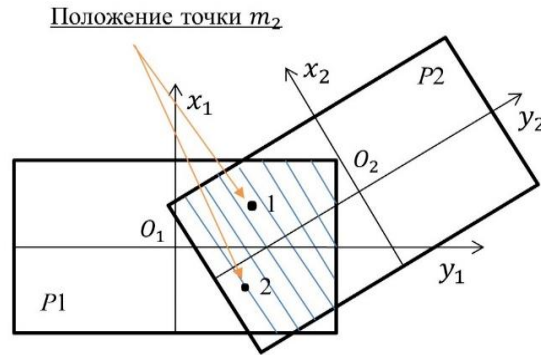


Рис. 3. Макетные снимки

Fig. 3. Mock-up images

Таблица 1. Характеристики цифровой камеры Nikon P700 и съёмки

Table 1. Characteristics of the Nikon P700 digital camera and shooting

Параметры цифровой камеры Digital camera parameters	Параметры съёмки Shooting parameters
Матрица ПЗС: длина 8 мм, ширина 6 мм Число пикселей: 3648 на 2736 Размер пикселя: $2,2 \cdot 10^{-3}$ мм Фокусное расстояние камеры: 2,4 мм	Высота съёмки Н: 285 м Расстояние Δr_s : 95 м Перекрытие: 50%

Таблица 2. Характеристики макетных снимков

Table 2. Characteristics of the mock-up images

Параллаксы пары горизонтальных снимков Parallax of a pair of horizontal images	Формат снимка P2 Snapshot format	Плоские координаты изображения точки местности в зоне перекрытия снимков Flat coordinates of the image of the point of the terrain in the area of overlap of the images
$p_{ш} = 4$ мм, $q_{ш} = 0$	$-4 \text{ мм} \leq x_2 \leq 4 \text{ мм}$ $-3 \text{ мм} \leq y_2 \leq 3 \text{ мм}$	Положение 1 $x_2 = -2$ мм, $y_2 = 1,5$ мм Положение 2 $x_2 = -2$ мм, $y_2 = -1,5$ мм

Шаг 2. Задание различных вариантов сочетаний линейных и угловых девиаций и расчёт разностей параллаксов. Выполняется в соответствии с таблицей 2 и формулами (1) – (2).

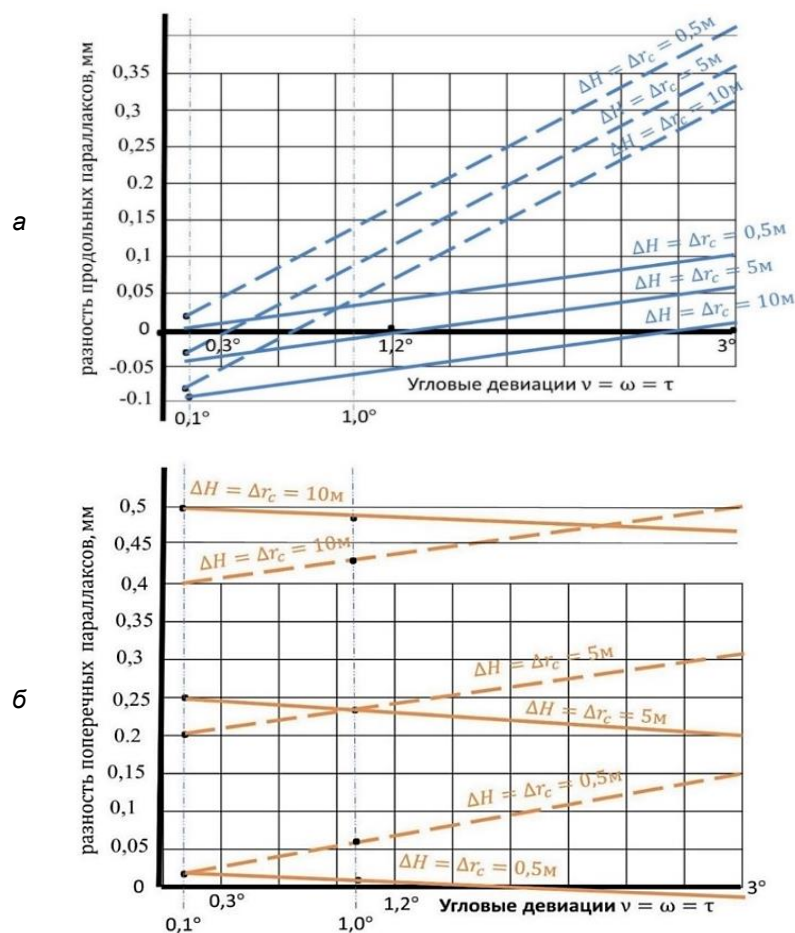
Шаг 3. Сравнение полученных результатов и формирование выводов.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим полученные результаты исследований и обсудим оценки совместного влияния линейных и угловых девиаций БЛА на величину разностей параллаксов смежных пар горизонтальных и горизонтального и наклонного снимков (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3. Оценки суммарного вклада линейных и угловых девиаций БЛА**Table 3.** Estimates of the total contribution of linear and angular deviations of UAV

Разность параллакс, мм Parallax difference, mm	Угловые девиации $\nu = \omega = \tau$, град Angular deviations $\nu = \omega = \tau$, deg								
	0,1°			1°			3°		
	Линейные девиации $\Delta H = \Delta r_c$, м Linear deviations $\Delta H = \Delta r_c$, m								
	0,5	5	10	0,5	5	10	0,5	5	10
Положение 1 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = 1,5$ мм)									
Δp_1	0,01	-0,04	-0,09	0,03	-0,01	-0,05	0,1	0,06	0,02
Δq_1	0,02	0,25	0,5	0,01	0,25	0,5	-0,01	0,2	0,44
Положение 2 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = -1,5$ мм)									
Δp_2	0,01	-0,03	-0,07	0,14	0,1	0,05	0,4	0,36	0,32
Δq_2	0,02	0,2	0,4	0,06	0,23	0,43	0,15	0,31	0,5

**Рис. 4.** Совместное влияние девиаций БЛА на разности параллакс: а – разности продольных параллакс; б – разности поперечных параллакс**Fig. 4.** The joint effect of UAV deviations on parallax differences: а – differences in longitudinal parallaxes; б – differences in transverse parallaxes

Анализ приведенных данных (табл. 3, рис. 4) позволяют отметить следующее. Величина и направленность (увеличение или уменьшение) изменений разностей, как продольных, так и поперечных параллаксов, зависит не только от уровней линейных и угловых девиаций БЛА, но и от знака ординаты точки в зоне перекрытия снимков $P1$, $P2$.

При этом как уровень, так и направленность изменений разностей продольных параллаксов существенно отличаются от поперечных параллаксов. В частности:

1. Величина разности продольных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций и обратно пропорциональна уровню линейных девиаций как при положительных $(+y_2)$, так при отрицательных $(-y_2)$ значениях ординаты точки. При этом уровень разности в области минимальных угловых $(0,1^\circ - 0,5^\circ)$ и линейных $(0,5 - 1, 0 \text{ м})$ девиаций незначителен и не превышает несколько пикселей как при положительных, так и при отрицательных значениях ординаты точки, а при значительных угловых девиациях достигает следующих значений: при 1° – до $14 (+y_2) / 60 (-y_2)$ пикселей, а при 3° – до $45 (+y_2) / 180 (-y_2)$ пикселей. Причём уровень разности при отрицательных значениях ординаты точки в три раза выше, чем при её положительных значениях.

2. Величина разности поперечных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций при отрица-

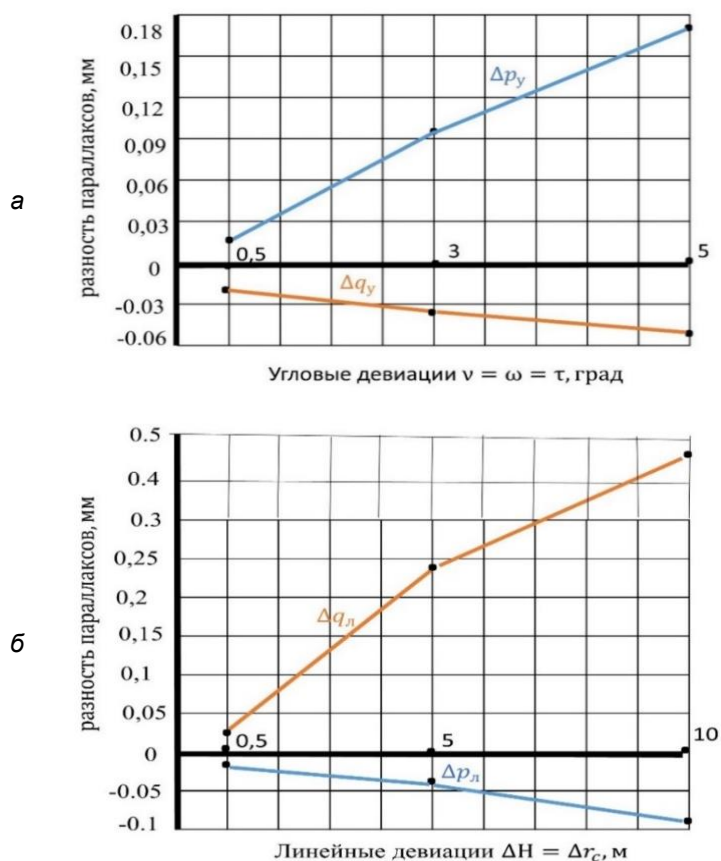
тельных $(-y_2)$ значениях ординаты точки и обратно пропорциональна при её положительных значениях $(+y_2)$. При этом уровень разности в области минимальных угловых $(0,1^\circ - 0,5^\circ)$ и линейных $(0,5 - 1, 0 \text{ м})$ девиаций составляет не менее 10 пикселей, а при значительных линейных девиациях достигает следующих значений: при 5 м – до $115 (+y_2) / 90 (-y_2)$ пикселей, а при 10 м – до $225 (+y_2) / 180 (-y_2)$ пикселей. Причём уровень разности при положительных и отрицательных значениях ординаты точки имеет один порядок.

3. Определяющее влияние на величину разностей продольных и поперечных параллаксов оказывают соответственно угловые и линейные девиации БЛА.

Рассмотрим и сравним между собой степени раздельного влияния угловых и линейных девиаций на разности продольных и поперечных параллаксов. С этой целью введём следующие обозначения: $(\Delta p_y, \Delta q_y)$, $(\Delta p_l, \Delta q_l)$ – разности продольных и поперечных параллаксов, рассчитанные по формулам (1) – (2) при различных значениях угловых девиаций в условиях $\Delta H = \Delta r_c = 0$ и линейных девиаций в условиях $v = \omega = \tau = 0$. Тогда параметры $\Delta p_y, \Delta q_y$ будут характеризовать степень влияния угловых, а $\Delta p_l, \Delta q_l$ – линейных девиаций БЛА. Полученные результаты при положительных и отрицательных значениях ординаты точки в зоне перекрытия представлены в таблице 4 и на рисунках 5, 6.

Таблица 4. Оценки раздельного вклада линейных или угловых девиаций БЛА**Table 4.** Estimates of the separate contribution of linear or angular deviations of UAV

Разность параллакс, мм Parallax difference, mm	Угловые девиации $v = \omega = \tau$, град Angular deviations $v = \omega = \tau$, deg ($\Delta r_c = 0, \Delta H = 0$)			
	0,5°	3°	5°	
	Линейные девиации $\Delta H = \Delta r_c$, м / Linear deviations $\Delta H = \Delta r_c$, m ($v = \omega = \tau = 0$)			
				0,5 5,0 10,0
Точка 1 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = 1,5$ мм)				
Δp_y	0,017	0,103	0,174	
Δq_y	-0,006	-0,034	-0,052	
Δp_d				-0,004 -0,044 -0,088
Δq_d				0,023 0,24 0,474
Точка 2 ($x_2 = -2$ мм, $y_2 = -1,5$ мм)				
Δp_y	0,07	0,4	0,66	
Δq_y	0,02	0,12	0,21	
Δp_d				-0,005 -0,044 -0,088
Δq_d				0,02 0,185 0,37

**Рис. 5.** Разности параллакс при положительной ординате точки:
а – угловые девиации; б – линейные девиации**Fig. 5.** Parallax differences with a positive ordinate point:
а – angular deviations; б – linear deviations

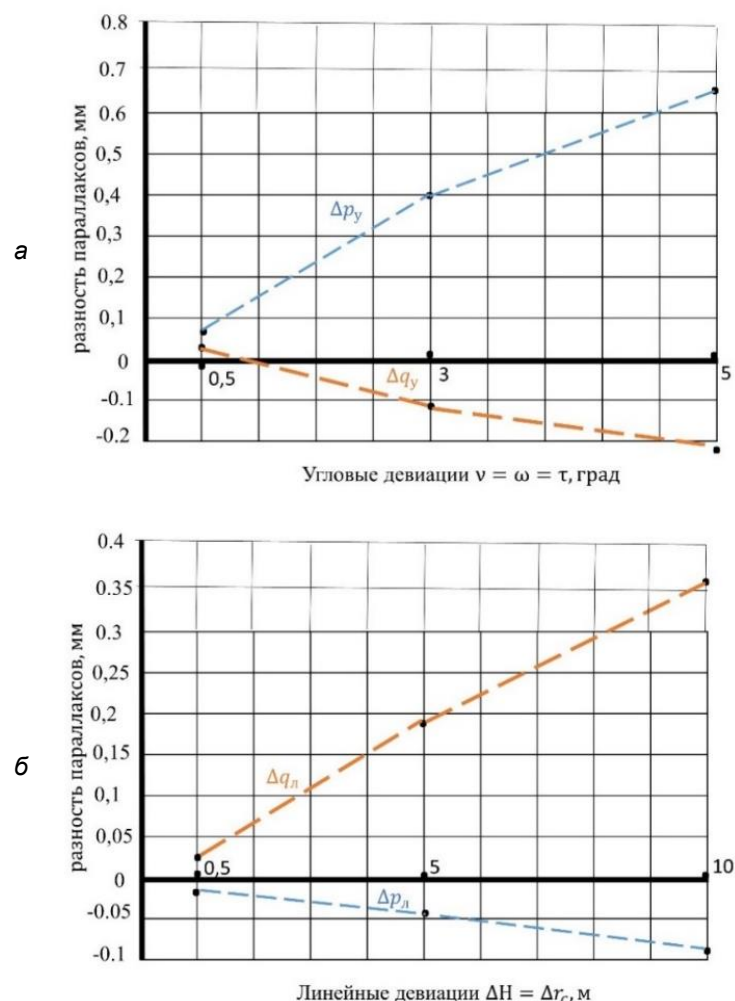


Рис. 6. Разности параллаксов при отрицательной ординате:
а – угловые девиации; б – линейные девиации

Fig. 6. Parallax differences with negative ordinate:
а – angular deviations; б – linear deviations

Анализ представленных в таблице 4 и на рисунках 5, 6 данных позволяет отметить следующее.

1. Разности продольных параллаксов в условиях отсутствия линейных девиаций БЛА независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия положительны, а поперечных – отрицательны, причём с ростом уровня угловых девиаций в диапазоне от $0,5^\circ$ до 5° первые возрастают, вторые – убывают, а величина первых в три раза больше, чем вторых.

2. Разности поперечных параллаксов в условиях отсутствия угловых

девиаций БЛА при положительной ординате точке в зоне перекрытия положительны, а продольных – отрицательны, при отрицательной ординате – наоборот. При этом независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия с ростом уровня линейных девиаций БЛА в диапазоне от 0,5 м до 10 м первые возрастают, вторые – убывают, а величина первых в четыре раза больше, чем вторых.

3. Определяющее влияние на величину разностей продольных и поперечных параллаксов оказывают соответственно угловые и линейные девиации БЛА.

Выводы

1. В процессе прямолинейного горизонтального полёта БЛА с регистрацией перекрывающихся изображений подстилающей поверхности после возникновения некоординированных отклонений БЛА от этой траектории один из перекрывающихся снимков будет горизонтальным, а другой – наклонным. При этом углы наклона (продольного и поперечного) и угол разворота наклонного снимка относительно горизонтального снимка совпадают с углами соответственно тангажа, крена и рыскания БЛА, а ориентация базиса съёмки, соединяющего центры проекций снимков, определяет параметры отклонений БЛА от заданной траектории по высоте и направлению полёта. В случае отсутствия отклонений эти отклонения, а также углы тангажа, крена и рыскания БЛА равны нулю.

2. Углы тангажа, крена и рыскания считаются положительными, если в момент регистрации наклонного снимка продольная и поперечная оси БЛА находятся соответственно выше и ниже плоскости местного горизонта, и при этом продольная ось находится справа относительно направления полёта. Критерием возникновения некоординированных отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полёта БЛА является отличие от нуля разностей параллаксов каких-либо смежных пар снимков, поскольку для любой пары горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полёта БЛА, продольные параллаксы постоянны, а поперечные – равны нулю.

3. Величина разностей параллаксов зависит от уровней линейных и угловых девиаций БЛА, возникших в момент регистрации наклонного снимка, и знака

ординаты соответственной точки в зоне перекрытия второй пары снимков. Уровни и знаки возникающих разностей продольных и поперечных параллаксов существенно отличаются друг от друга. Разность продольных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций и обратно пропорциональна уровню линейных девиаций как при положительных, так при отрицательных значениях ординаты точки, причём при отрицательных значениях ординаты точки она в три раза выше, чем при её положительных значениях. Разность поперечных параллаксов прямо пропорциональна уровню угловых девиаций при отрицательных значениях ординаты точки и обратно пропорциональна при её положительных значениях, а её уровень при положительных и отрицательных значениях ординаты точки имеет один порядок.

4. Определяющее влияние на величину разности продольных параллаксов оказывают угловые, а поперечных – линейные девиации БЛА. При этом разность первых в условиях отсутствия линейных девиаций БЛА независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия всегда положительна и с ростом уровня угловых девиаций возрастает, а вторых – отрицательна и уменьшается, причём величина первой в три раза больше, чем второй. Разность поперечных параллаксов в условиях отсутствия угловых девиаций БЛА при положительной ординате точки в зоне перекрытия положительна, а продольных – отрицательна, а при отрицательной ординате – наоборот. При этом независимо от знака ординаты точки в зоне перекрытия с ростом уровня линейных девиаций БЛА первая возрастает, вторая убывает, а величина первой в четыре раза больше, чем второй.

Список литературы

1. Отказоустойчивая интегрированная навигационная система для беспилотного аппарата с использованием технического зрения / Д. А. Антонов К. К. Веремеенко, М. В. Жарков [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2020. № 2. С. 128–142. <https://doi.org/10.31857/S0002338820020043>
2. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS // Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020. N 48 (12). P. 1675–1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>
3. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits // Journal of applied engineering science. 2018. Vol. 16, N 1. P. 107–110. <https://doi.org/10.5937/jaes16-16479>
4. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. N 34 (6). P. 652–661.
5. Kinematics and plane decomposition algorithm for nonlinear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles / L. Arulmurugan, S. Raghavendra Prabhu, M. Ilankumaran, V. Suresh, R. Saravanakumar, M. Raghunath // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. N 995 (1). P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>
6. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle / S. Luo, H. Liu, M. Hu, J. Dong // Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42, N 6. P. 1–10.
7. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, В. Г. Андронов [и др.]; Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. 171 с.
8. Интегрированная система аэропортового транспортного средства с использованием технического зрения / Д. А. Антонов, К. К. Веремеенко, М. В. Жарков [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 132. <https://doi.org/10.7868/S0002338815040034>
9. Баклыков М. А. Применение модифицированных дронов при проведении топографо-геодезических работ // Автоматизация в промышленности. 2020. № 2. С. 19–21. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.02.05>
10. Attitude Determination Using Ambiguous GNSS Phase Measurements and Absolute Angular Rate Measurements / M. V. Zharkov, K. K. Veremeenko, D. A. Antonov, I. M. Kuznetsov // Gyroscopy and Navigation. 2018. Vol. 9, N 4. P. 277–286. <https://doi.org/10.1134/S2075108718040090>
11. Андронов В. Г., Князев А. А., Чуев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. № 4 (25). С. 145–161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>

12. Овчинникова Н. Г., Медведков Д. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. 2019. Т. 3, № 1. С. 98–108. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108>
13. Elkaim G. H., Lie F. A. P., Gebre-Egziabher D. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs // Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2015. P. 347–380.
14. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д. А. Антонов, М. В. Жарков, И. М. Кузнецов, Е. М. Лунев, А. Н. Пронькин // Труды МАИ. 2016. Вып. 91. С. 1–26.
15. Степанов Д. Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. 2014. № 1. С. 150–157.
16. Зоев И. В., Марков Н. Г., Рыжова С. Е. Интеллектуальная система компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга технологических объектов предприятий нефтегазовой отрасли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 33, № 11. С. 34–49. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2346>
17. Мустаев А. Ф. Использование технологии «машинного зрения» для управления БПЛА // Международный научный журнал «Вестник науки». 2019. Т. 5, № 12 (21). С. 195–198.
18. Андронов В. Г., Чуев А. А. Идентификация девиаций беспилотных летательных аппаратов по параллаксам изображений // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 1. С. 59–69. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-59-69>
19. Андронов В. Г., Чуев А. А. Детектирование траектории беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24, № 3. С. 321–332. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>
20. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 129–144. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-129-144>

References

1. Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V., et al. Fault-tolerant integrated navigation system for an unmanned vehicle using technical vision. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2020;(2):128–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002338820020043>
2. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2020;(48):1675–689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

3. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits. *Journal of Applied Engineering Science*. 2018;16(1):107–110. (In Russ.) <https://doi.org/0.5937/jaes16-16479>
4. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*. 2019;34(6):652–661.
5. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilangkumaran M., Suresh V., Saravanakumar R., Raghunath R., M. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;(995):012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>
6. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. *Journal of National University of Defense Technology*. 2020;42(6):1–10.
7. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Andronov V.G., et al. Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 171 p. (In Russ.)
8. Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V., et al. The integrated system of an airport vehicle using technical vision. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2015;(4):132. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0002338815040034>
9. Baklykov M.A. The use of modified drones during topographic and geodetic works. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*. 2020;(2):19–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.02.05>
10. Zharkov M.V., Veremeenko K.K., Antonov D.A., Kuznetsov I.M. Attitude Determination Using Ambiguous GNSS Phase Measurements and Absolute Angular Rate Measurements. *Gyroscopy and Navigation*. 2018;9(4):277–286. <https://doi.org/10.1134/S2075108718040090>
11. Andronov V.G., Knyazev A.A., Chuev A.A. Model of parameters of deviations of the flight route of unmanned aerial vehicles from a given trajectory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;4(25):145–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>
12. Ovchinnikova N.G., Medvedkov D.A. The use of unmanned aerial vehicles for land management, cadastre and urban planning. *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy = Economics and Ecology of Territorial Formations*. 2019;3(1):98–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108>
13. Elkaim G.H., Lie F.A.P., Gebre-Egziabher D. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs. In: *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer; 2015. P. 347–380.
14. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Lunev E.M., Pronkin A.N. Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2016;(91):1–26. (In Russ.)
15. Stepanov D.N. Methods and algorithms for determining the position and orientation of an unmanned aerial vehicle using onboard video cameras. *Programmnye produkty i sistemy = Software Products and Systems*, 2014;(1):150–157. (In Russ.)

16. Zoev I.V., Markov N.G., Ryzhova S.E. Intelligent computer vision system of unmanned aerial vehicles for monitoring technological facilities of oil and gas industry enterprises. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*. 2019;33(11):34–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2346>
17. Mustaeв A.F. Using «machine vision» technology to control UAVs. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal «Vestnik nauki» = International Scientific Journal «Bulletin of Science»*. 2019;5(12):95–198. (In Russ.)
18. Andronov V.G., Chuev A.A. Identification of deviations of unmanned aerial vehicles by parallax images. *Vestnik SGUGiT = Bulletin of SGUGiT*. 2023;28(1):59–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-59-69>
19. Andronov V.G., Chuev A.A. Identification of deviations of unmanned aerial vehicles by parallax images. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. 2023;24(3):321–332. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>
20. Andronov V.G., Chuev A.A., Knyazev A.A. Determination and assessment of the level of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory from images of the underlying surface. *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;1(12):129–144. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-129-144>

Информация об авторах / Information about the Authors

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladia58@mail.ru, Researcher ID: J-8844-2013, ORCID: 0000-0003-2578-0026

Чуев Андрей Алексеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, Researcher ID: AAF-5480-2019, ORCID: 0000-0002-2980-0533

Vladimir G. Andronov, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladia58@mail.ru, Researcher ID: J-8844-2013, ORCID: 0000-0003-2578-0026

Andrey A. Chuev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, Researcher ID: AAF-5480-2019, ORCID: 0000-0002-2980-0533

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-104-120>



УДК 004.93

Анализ эффективности применения архитектуры U-net для классификации и сегментации глиомы на МРТ-снимках

А. В. Киселев¹ ✉, Е. А. Кулешова¹, М. О. Таныгин¹,
Д. Р. Дерябин¹, И. А. Халин¹

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

✉ e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Резюме

Цель исследования – анализ эффективности применения нейросетевой архитектуры U-net в системах поддержки принятия врачебных решений для диагностики глиомы, а также сегментации пораженных ею областей головного мозга на МРТ-снимках.

Методы. Для проведения экспериментальных исследований был сформирован набор данных для обучения и проведена нормализация данных. Выполнена программная реализация нейросетевой архитектуры U-Net с применением фреймворка Keras на языке программирования Python. Проведено обучение нейросетевой модели.

Результаты. Проведен ряд экспериментов, в ходе которых были получены матрицы ошибок и классификации, проведена оценка эффективности классификации, обученной нейросетевой модели по классам «Опухоль» и «Без опухоли» с помощью таких метрик, как Recall, Precision и F1-мера, проведена оценка качества сегментации пораженных глиомой областей на тестовом наборе данных. Качество сегментации оценивалось с использованием метрики IoU, отражающей отношения площадей ограничительных рамок и применяемой для оценки точности пространственного соответствия предсказанных сегментированных областей, выделенных на масках. Исходя из результатов тестирования нейросетевой модели при решении задачи сегментации областей головного мозга, пораженных глиомой, было получено среднее значение метрики IoU, равное 0,812, что является приемлемым результатом.

Заключение. Результаты тестирования показали, что нейросетевая модель на основе архитектуры U-net способна эффективно диагностировать наличие глиомы с приемлемыми значениями метрик качества классификации и сегментации, что указывает на возможность применения данной нейросетевой модели в системах поддержки принятия врачебных решений для диагностики глиомы, а также ее сегментации на МРТ-снимках. Однако целесообразной является доработка данной нейросетевой модели для уменьшения числа ложноотрицательных результатов классификации, что является критически важным в медицинской диагностике.

Ключевые слова: глиома; МРТ-снимки; нейросетевая модель; нейросетевая архитектура; U-net; классификация; сегментация.

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

Для цитирования: Анализ эффективности применения архитектуры U-net для классификации и сегментации глиомы на МРТ-снимках / А. В. Киселев, Е. А. Кулешова, М. О. Таныгин, Д. Р. Дерябин, И. А. Халин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 104–120. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-104-120>

Поступила в редакцию 11.07.2024

Подписана в печать 08.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Analysis of the effectiveness of using U-net architecture for classification and segmentation of glioma in MRI images

Alexey V. Kiselev¹ ✉, Elena A. Kuleshova¹, Maxim O. Tanygin¹,
Denis R. Deryabin¹, Igor A. Khalin¹

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

✉ e-mail: kisevalexey1990@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is to analyze the efficiency of the U-net neural network architecture in decision support systems for glioma diagnostics and segmentation of brain areas affected by it on MRI images.

Methods. To conduct experimental studies, a training dataset was generated and the data was normalized. A software implementation of the U-Net neural network architecture was performed using the Keras framework in the Python programming language. The neural network model was trained.

Results. A series of experiments were conducted, during which error and classification matrices were obtained, the efficiency of classification of the trained neural network model for the "Tumor" and "No tumor" classes was assessed using metrics such as Recall, Precision and F1-measure, and the quality of segmentation of glioma-affected areas on the test data set was assessed. The quality of segmentation was assessed using the IoU metric, which reflects the ratio of the areas of the bounding boxes and is used to assess the accuracy of the spatial correspondence of the predicted segmented areas highlighted on the masks. Based on the results of testing the neural network model in solving the problem of segmenting brain areas affected by glioma, the average value of the IoU metric was 0.812, which is an acceptable result.

Conclusion. The testing results showed that the neural network model based on the U-net architecture is able to effectively diagnose the presence of glioma with acceptable values of the classification and segmentation quality metrics, which indicates the possibility of using this neural network model in medical decision support systems for glioma diagnostics, as well as its segmentation on MRI images. However, it is advisable to refine this neural network model to reduce the number of false negative classification results, which is critically important in medical diagnostics.

Keywords: glioma; MRI images; neural network model; neural network architecture; U-net; classification; segmentation.

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

For citation: Kiselev A.V., Kuleshova E.A., Tanygin M.O., Deryabin D.R., Khalin I.A. Analysis of the effectiveness of using U-net architecture for classification and segmentation of glioma in MRI images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(3):104–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-104-120>

Received 11.07.2024

Accepted 08.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Глиомы представляют собой гетерогенную группу первичных опухолей центральной нервной системы (ЦНС), происходящих из прогениторных клеток глиии. Эти опухоли могут быть доброкачественными или злокачественными и классифицируются в зависимости от типа глиальных клеток, из которых они происходят (астроцитомы, олигодендроглиомы, эпендимомы и т. д.), а также степени злокачественности по шкале ВОЗ (от I до IV) [1]. Глиомы могут вызывать различные неврологические симптомы, такие как головные боли, судороги, когнитивные нарушения и двигательные расстройства, в зависимости от их локализации и размера. Диагностика глиом включает нейровизуализационные методы (МРТ, КТ) и биопсию, а лечение может включать хирургическое вмешательство, радиотерапию и химиотерапию [2]. Данный вид опухолей является наиболее распространённым типом злокачественных первичных опухолей ЦНС у взрослых. Ежегодная заболеваемость глиомами составляет около 6 случаев на 100 000 человек в мире. Традиционно эти опухоли классифицировались морфологически на основе их гистопатологических характеристик, как и другие опухоли [3].

Глиомы низкой степени злокачественности, классифицируемые как глиомы I степени, составляют приблизительно 5-6% среди всех глиальных опухолей, с заболеваемостью 0,37 случая на 100000 населения ежегодно. Эти

опухоли чаще всего диагностируются у детей, составляя 67% случаев, с преимущественным поражением мозжечка, оптических нервов, хиазмы, таламуса, базальных ганглиев и стволовых структур. Заболеваемость достигает максимума в первые две декады жизни, причём пилоидная астроцитома является самой распространённой глиальной опухолью среди детей в возрасте от 0 до 14 лет, составляя 21% от всех диагностированных случаев [4]. Глиомы высокой степени злокачественности, классифицируемые как III-IV степени, включают анапластическую астроцитому, анапластическую олигодендроглиому и мультиформную глиобластому, глиосаркому. Эти опухоли являются наиболее часто встречающимися злокачественными новообразованиями головного мозга у взрослых, составляя 60-70% всех случаев [5].

Заболеваемость злокачественными глиомами проявляется двумя пиками. Первый пик приходится на возраст от 0 до 4 лет, когда опухоли ЦНС занимают второе место среди всех злокачественных новообразований детского возраста, составляя 14-20% и уступая только лимфомам и лейкозам. Второй пик заболеваемости наступает в возрасте от 35 до 75 лет, когда злокачественные глиомы становятся третьей наиболее частой причиной смерти от онкологических заболеваний среди мужчин и четвёртой среди женщин в экономически развитых странах. Это подчеркивает необходимость развития эффективных стратегий

диагностики и лечения данных опухолей, особенно в раннем возрасте и взрослом периоде жизни [6].

Согласно данным Американской ассоциации исследования опухолей мозга, пятилетний показатель выживаемости при глиоме значительно различается в зависимости от степени злокачественности и других факторов и колеблется от 5% до 95% (табл. 1).

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является одним из основных инструментов для диагностики опухолей ЦНС. МРТ обеспечивает детальное изображение мягких тканей мозга,

позволяя с высокой точностью оценить размеры, форму и точное расположение опухоли, а также её отношение к критически важным анатомическим структурам. Это особенно важно для планирования хирургического вмешательства и других видов лечения. В контексте первичной диагностики МРТ является предпочтительным выбором, что связано с высокой точностью метода при визуализации мягких тканей мозга и отсутствием ионизирующего излучения, что делает метод безопасным для пациентов [8].

Таблица 1. Пятилетний показатель выживаемости при глиоме в зависимости от степени злокачественности, % [7]

Table 1. Five-year survival rate for glioma depending on the grade of malignancy, % [7]

Степень злокачественности	Пятилетний показатель выживаемости
Глиомы I степени (пилочитарные астроцитомы)	95
Глиомы II степени (диффузные астроцитомы)	40–50
Глиомы III степени (анapластические астроцитомы)	25–30
Глиомы IV степени (мультиформная глиобластома)	5–10

Глиомы часто диагностируются на поздних стадиях, когда лечение уже может быть неэффективным или вовсе невозможным. Поэтому диагностика именно на ранних стадиях заболевания играет ключевую роль в положительном исходе лечения. В силу ограниченной доступности высококвалифицированных специалистов для анализа МРТ-снимков, в том числе связанные с территориальными особенностями нашей страны, возникает актуальная потребность в системах поддержки принятия врачебных

решений для диагностики опухолей ЦНС на ранних стадиях [9]. Применение алгоритмов машинного обучения может автоматизировать процессы интерпретации изображений и снизить вероятность ошибок [10]. Это может помочь справиться с недостатком специалистов и повысить доступность качественной диагностики для населения, не зависящей от географического положения или экспертного опыта отдельных врачей.

В работе [11] авторы предложили использовать сверточную нейронную

сеть (СНС) для классификации степеней глиом (I, II, III и IV) и различения глиом низкой степени злокачественности от глиом высокой степени злокачественности, достигнув точности 71% и 96% соответственно. В работе [12] была разработана комбинация СНС и генетического алгоритма для классификации степеней глиом (II, III и IV) с точностью 90,9%. В работе [13] авторы исследовали метод трансферного обучения для оценки степени злокачественности глиом, получив тестовую точность более 90%.

Таким образом, внедрение СНС и связанных с ними методов машинного обучения существенно продвигает область диагностики и классификации глиом, открывая новые перспективы для разработки более точных и персонализированных инструментов лечения пациентов [5].

Материалы и методы

U-Net представляет собой нейросетевую модель (НМ) на базе архитектуры СНС. Архитектура U-Net не имеет полносвязных слоев, а состоит из так называемой карты признаков между входными и выходными слоями, а также ядра свертки для получения и укрепления признаков начального объекта [14]. Еще одной отличительной особенностью можно выделить саму структуру, которая представляет собой своеобразный метод кодера-декодера, что позволяет эффективно отображать трехканальные снимки МРТ в одноканальные маски

сегментации. Кодер извлекает особенности из входных данных, а декодер, в свою очередь, реконструирует маски, выделяя область отклонения. Этот алгоритм действий сохраняет всю необходимую информацию и детали [15].

Обычная архитектура автокодировщика уменьшает размер входной информации, а затем и следующих слоев. Затем начинается декодирование, изучается представление линейного объекта, и размер кадра постепенно увеличивается. Проблема в том, что он сжимает входные данные линейным образом, что предотвращает передачу всех имеющихся функций.

В НМ U-Net для решения данной проблемы используется деконволюция. Деконволюция выполняется на стороне декодера, что позволяет избежать проблемы «узких мест», возникающей в архитектуре автоматического кодирования, и, таким образом, потери функций.

Рассмотрим архитектуру U-Net (рис. 1). Она состоит из двух составляющих частей – сужающейся (энкодер) и расширяющейся (декодер). Энкодер представляет собой стек сверточных слоев, которые постепенно уменьшают размеры входного изображения, извлекая при этом высокоуровневые признаки. Каждый сверточный блок обычно состоит из двух последовательных сверточных слоев с последующей операцией пулинга (например, максимальное пулинг), которая уменьшает размеры изображения вдвое. Декодер состоит из транспонированных сверточных слоев

(или операций пространственной интерполяции), которые постепенно увеличивают размеры изображения, восстанавливая пространственную разрешающую способность. Каждый блок декодера

соединен с соответствующим блоком энкодера с помощью пропускающих соединений (skip connections), что позволяет сохранять детальные пространственные признаки [16].

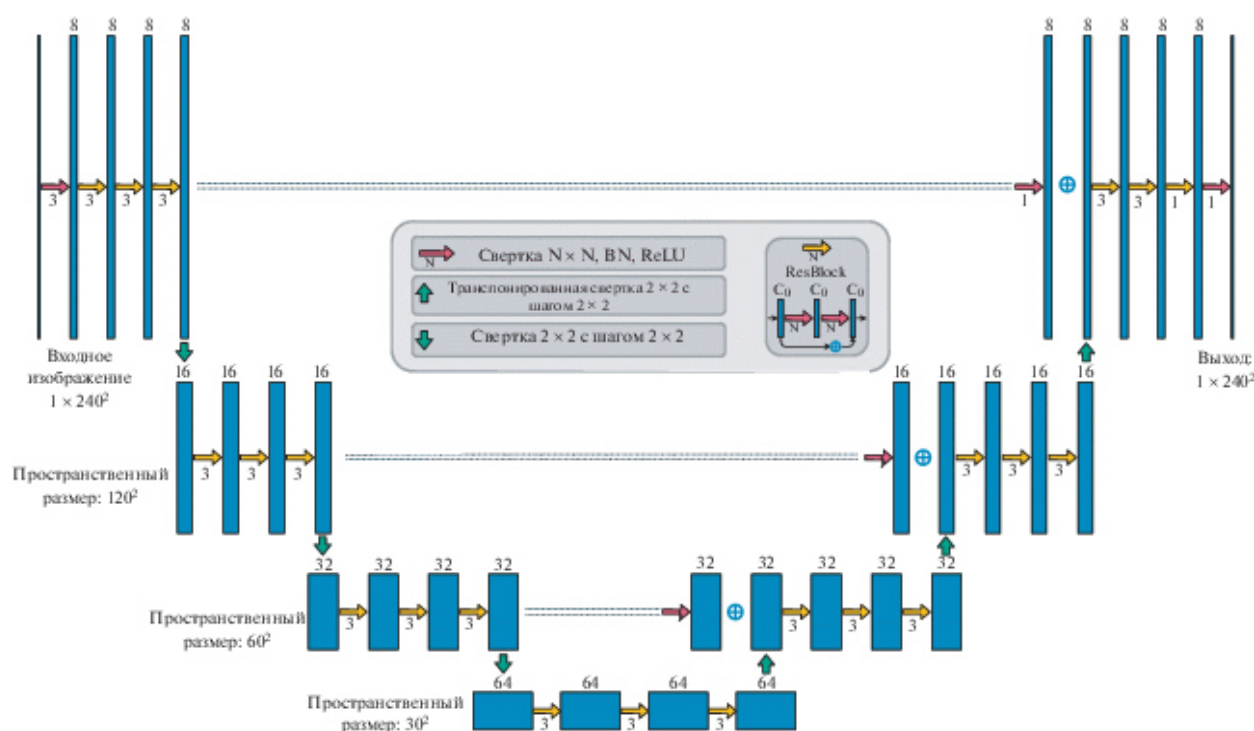


Рис. 1. Архитектура U-Net

Fig. 1. U-Net Architecture

Для обучения НМ требуются высококачественные и точно аннотированные изображения. Создание собственного массива данных без соответствующего опыта в медицинской аннотации может привести к неточностям в обучающих данных, что негативно скажется на работе модели [17]. Поэтому для обучения был использован набор данных The Cancer Imaging Archive (TCIA) [18], который включает в себя МРТ-снимки головного мозга и размеченные маски сегментации глиом для 110 пациентов. Набор данных состоит из 3929 изображений,

среди которых МРТ-снимки с аннотированными областями злокачественных образований и МРТ-снимки полностью здоровых пациентов, которые имеют полностью черную маску.

При формировании набора данных для обучения 3182 изображения использовались в обучающей выборке, 657 изображений использовались для процесса валидации и 90 изображений использовалось для тестирования модели. Рассмотрим распределение набора данных (рис. 2). Все изображения прошли тщательную предварительную проверку на

соответствие установленным критериям качества и релевантности, чтобы

минимизировать риск необходимости последующего переобучения модели.

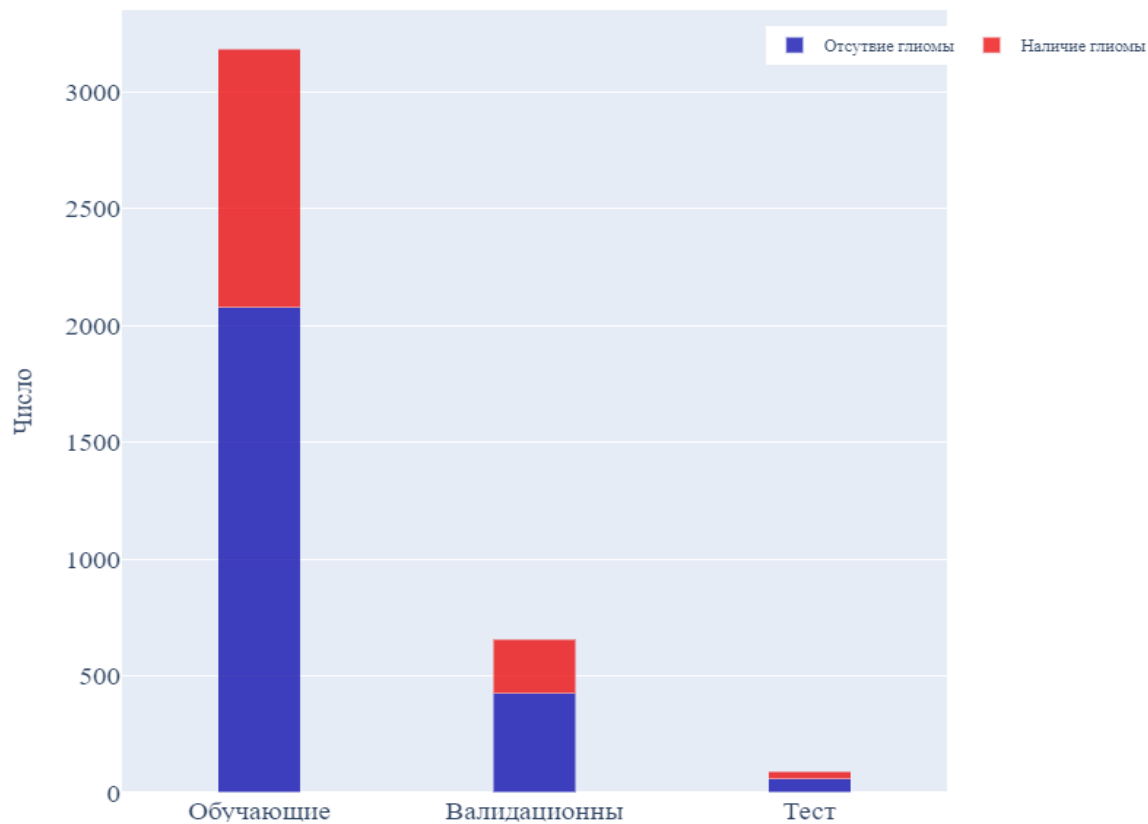


Рис. 2. Распределение набора данных

Fig. 2. Distribution of the data set

Все изображения из набора данных были преобразованы в формат, подходящий для НМ. Этот процесс включал нормализацию данных и необходимое изменение размеров изображений.

Программная реализация модели U-Net была осуществлена с применением фреймворка Keras на языке программирования Python. Условно НМ можно разделить на две части – энкодер и декодер.

В качестве функции активации последовательных сверточных слоев вместо стандартной функции ReLU использовалась Leaky ReLU.

Принцип работы функции активации ReLU можно описать по формуле

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x), \quad (1)$$

где x – входное значение.

Функцию активации Leaky ReLU можно описать по формуле

$$f(x) = \max(ax, x), \quad (2)$$

где x – входное значение; a – любое небольшое значение (обычно около 0,01).

Основным отличием этих двух функций активации является то, что Leaky ReLU позволяет пропускать не-большой градиент при нулевом или отрицательном входе, вместо того чтобы

полностью обнулять его, как это делает ReLU. Использование в качестве функции активации Leaky ReLU позволило ускорить процесс обучения, обеспечивая более эффективное и быстрое достижение оптимальных весов в сети, по сравнению с функцией активацией ReLU. Также Leaky ReLU может способствовать лучшему распространению градиентов по сети во время обратного распространения ошибки, что способствует более точному выделению границ опухолей при сегментации [19].

Энкодер состоит из 4 сверточных блоков (conv_block), которые обрабатывают изображения. При этом каждый из блоков содержит слои Conv2D, за которыми следуют пакетная нормализация, активация Leaky ReLU и операции Max Pooling 2D. Каждый сверточный блок применяет фильтры к изображению, поданному на вход, или применяется карта признаков, если данные уже проходят более, чем один блок. Далее происходит нормализация (BatchNormalization), необходимая для стабилизации и ускорения процесса обучения, а также функция активации Leaky ReLU для добавления нелинейности в модель и реализации обработки более сложных данных [20].

Между кодером и декодером устанавливается связь с уровнями Conv2D, пакетной нормализацией и активацией Leaky ReLU для оптимизации потока информации. В разделе декодера применяются 4 блока повышающей дискретизации, каждый из которых содержит слои Conv2DTranspose для повышающей

дискретизации, конкатенации для остаточных соединений и ранее упомянутые сверточные блоки. Остаточные соединения позволяют НМ сохранять функции высокого разрешения от кодера при прохождении через декодер.

В декодирующей части используется четыре блока повышающей дискретизации, каждый из которых включает в себя слои Conv2DTranspose для увеличения размерности данных. Эти слои фактически выполняют обратную операцию по сравнению с пулингом, увеличивая размеры изображений. Для восстановления исходных пространственных размерностей и деталей изображений в блоках декодера также применяется операция конкатенации, которая объединяет карты признаков из соответствующих слоёв энкодера через пропускные (остаточные) соединения. Эти соединения играют ключевую роль, поскольку позволяют сохранить информацию о высоко-разрешенных признаках, которая могла бы быть потеряна на более глубоких уровнях сети.

Выходная часть модели состоит из слоя Conv2D, за которым следует пакетная нормализация, активация Leaky ReLU и последний слой Conv2D.

Параметры скорости обучения и функции потерь были точно настроены в ходе нескольких сеансов обучения, в результате чего была выбрана скорость обучения 0,0003 и среднеквадратическая ошибка в качестве функции потерь.

Для уменьшения показателя несоответствия маски сегментации и

действительными масками истинности в процессе обучения была проведена корректировка весов. Временные затраты на обучение НМ с помощью CPU составили 8 часов, что объясняется специфическими требованиями архитектуры U-Net к процессу обновления весов.

График, приведенный на рисунке 3, визуализирует изменения в потерях при обучении и проверке на разных эпохах,

представляя данные о производительности и сходимости модели. Из графического представления изменения потерь видно, что после резкого снижения на начальных этапах кривая потерь выходит на плато, указывая на достижение моделью стабильного состояния, при котором дальнейшее обучение не приведет к значительному улучшению показателей.

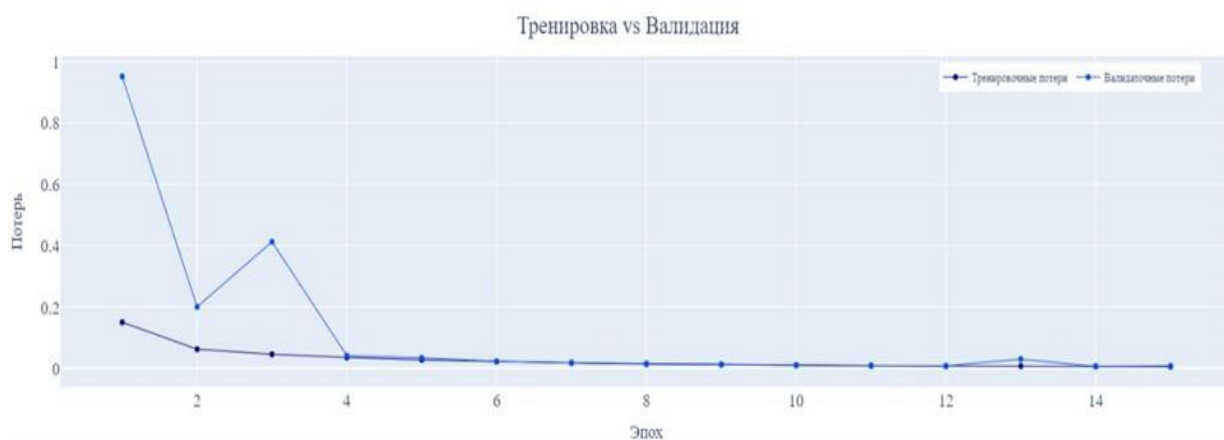


Рис. 3. График потерь относительно проведенных эпох обучения

Fig. 3. Graph of losses relative to the training epochs conducted

Результаты и их обсуждение

Была проведена оценка эффективности классификации, обученной НМ по классам «Опухоль» и «Без опухоли», а также оценка качества сегментации пораженных глиомой областей на тестовом наборе данных.

Качество сегментации оценивалось с использованием отношения площадей ограничительных рамок (Intersection over Union, IoU) (3) – метрики, применяемой для оценки точности пространственного соответствия предсказанных

сегментированных областей, выделенных на масках [21].

$$IoU = \frac{S(A \cap B)}{S(A \cup B)}, \quad (3)$$

где A и B – предсказанная ограничительная рамка и настоящая ограничительная рамка соответственно. $IoU = 0$, если A и B не пересекаются, $IoU = 1$ в случае идеального наложения [22].

На рисунках 4 и 5 продемонстрированы результаты сегментации областей головного мозга, пораженных глиомой, на МРТ-снимках для классов «Опухоль» и «Без опухоли» соответственно.

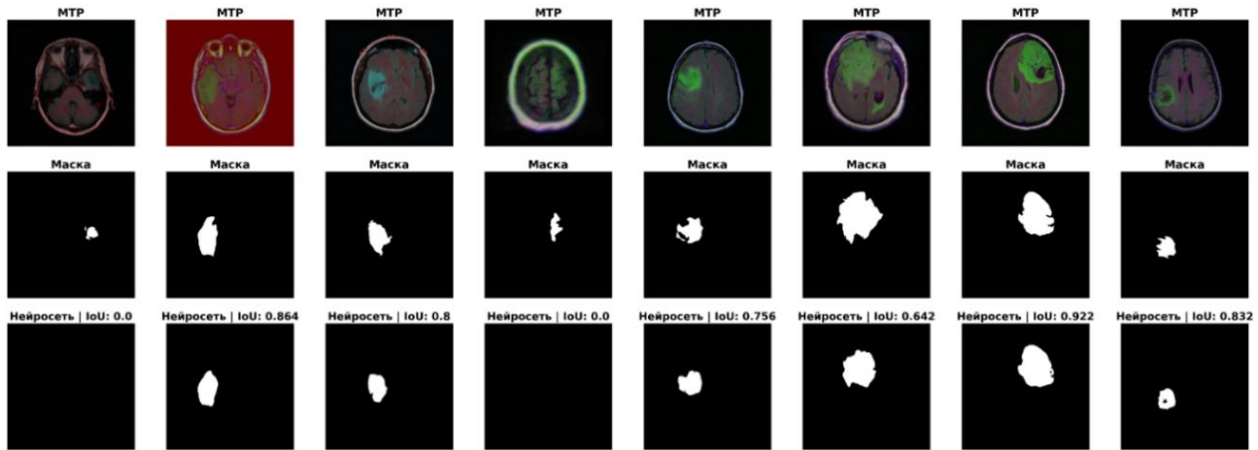


Рис. 4. Результаты сегментации пораженных глиомой областей головного мозга на МРТ-снимках для класса «Опухоль»

Fig. 4. Results of segmentation of brain areas affected by glioma on MRI images for the "Tumor" class

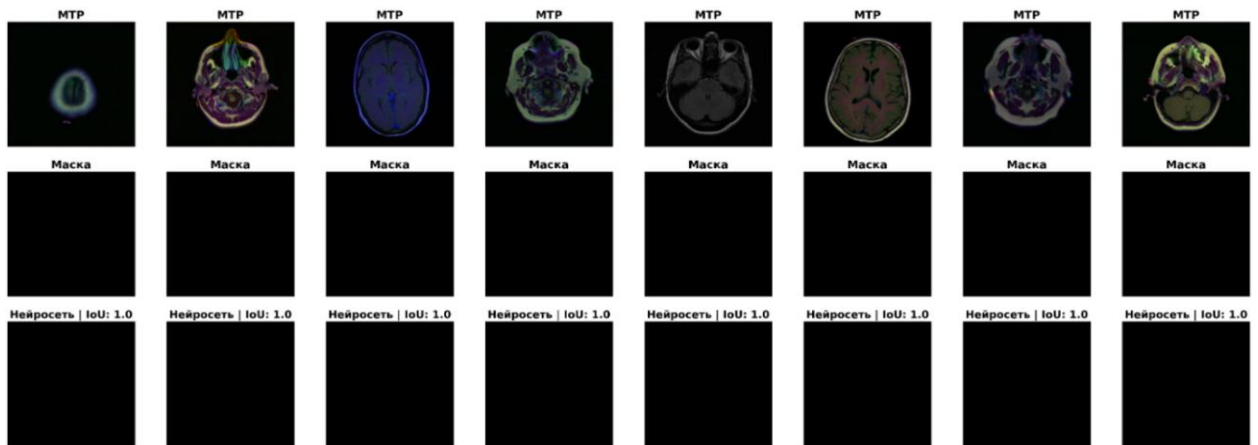


Рис. 5. Результаты сегментации пораженных глиомой областей головного мозга на МРТ-снимках для классов «Без опухоли»

Fig. 5. Results of segmentation of brain regions affected by glioma in MRI images for the "No tumor" classes

На рисунке 6 представлены график распределения классов в тестовом наборе данных и график распределения результатов классификации НМ, при этом средний показатель отношения площадей ограничительных рамок (IoU) при сегментации областей головного мозга, пораженных глиомой, составил 0,812, что является приемлемым результатом.

Матрица ошибок (рис. 7) отображает результаты классификации для

тестового набора данных, состоящего из 90 МРТ-снимков, и показывает следующие результаты: 25 случаев (True Positive (TP)) – модель верно предсказала наличие глиомы на изображении, 57 случаев (True Negative (TN)) – модель правильно предсказала, что опухоль отсутствует на снимке, и 8 случаев, когда модель не могла верно определить отсутствие, и наличие глиомы – 7 (False Negatives (FN)) и 1 (False Positive (FP)) примеров соответственно.

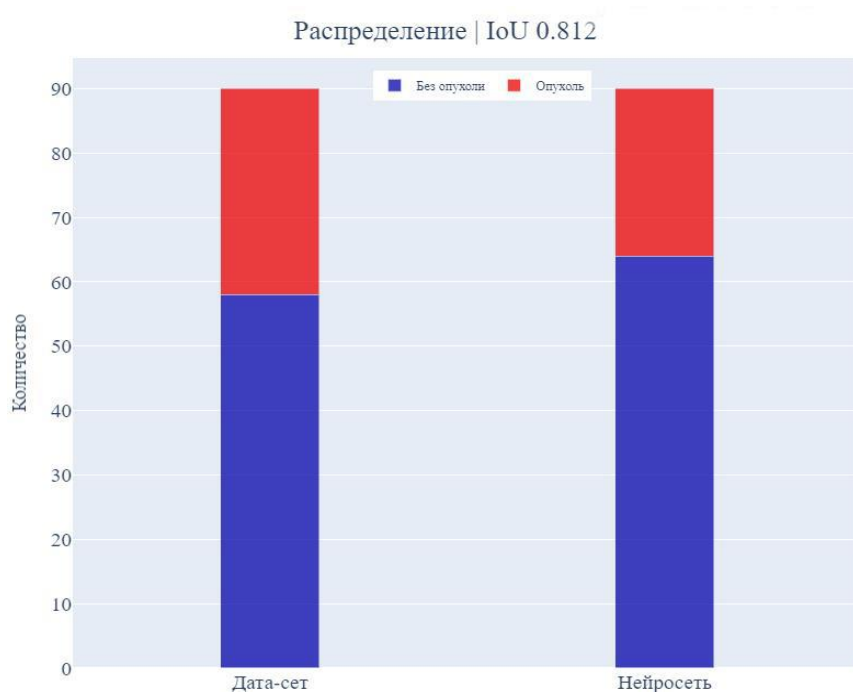


Рис. 6. График распределения классов в тестовом наборе данных и график распределения результатов классификации НМ

Fig. 6. Graph of class distribution in the test dataset and graph of the distribution of the classification results of the NM

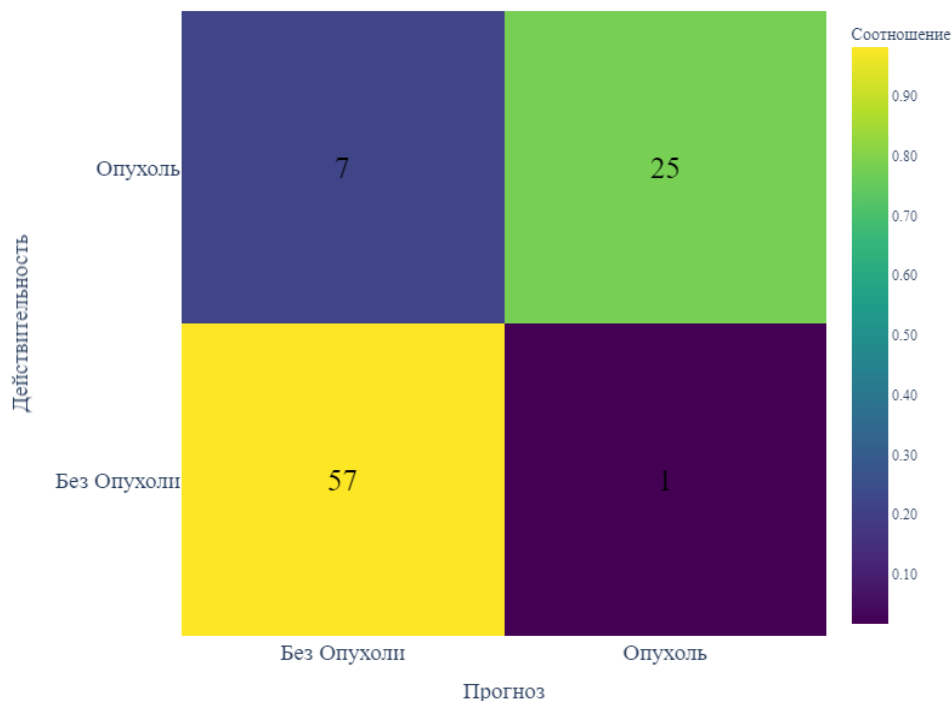


Рис. 7. Матрица ошибок

Fig. 7. Error matrix

На основе полученных данных о количестве ошибок первого и второго рода была проведена оценка качества классификации с помощью метрик Recall, Precision и F1-меры.

Метрика оценки качества классификации Recall описывается по (4):

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (4)$$

Метрика оценки качества классификации Precision описывается по (5):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (5)$$

Метрика оценки качества классификации F1-мера описывается по (6):

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot recall}{Precision + recall}. \quad (6)$$

Также для полноты визуализации оценки качества классификации НМ была построена матрица классификации, которая наглядно отражает значения данных метрик по классам «Опухоль» и «Без опухоли» (рис. 8).

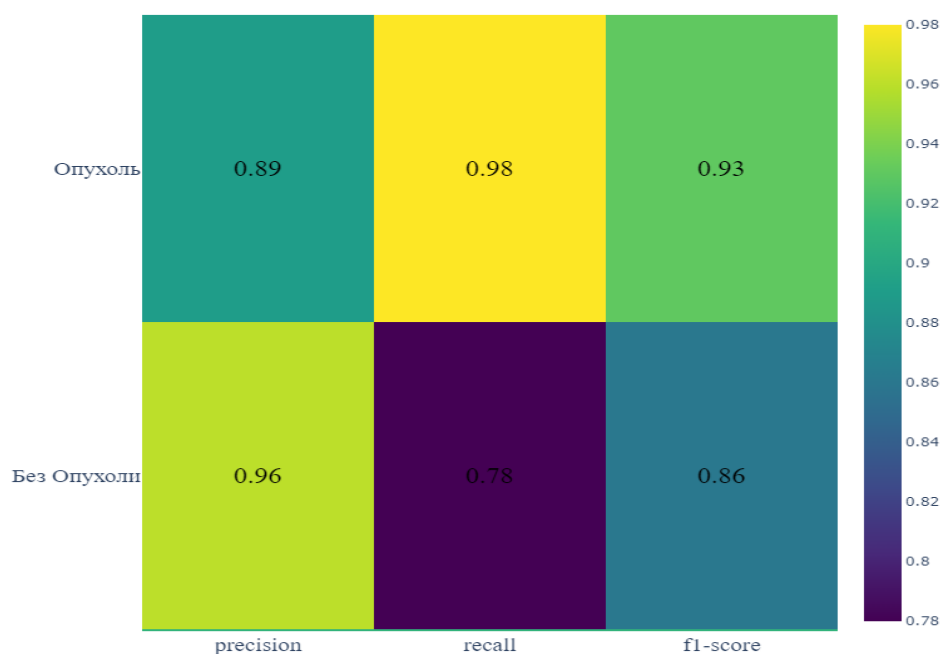


Рис. 8. Матрица классификации

Fig. 8. Classification matrix

Выводы

В статье представлены результаты анализа эффективности использования нейросетевой архитектуры U-net для диагностики глиомы, а также сегментации пораженных ею областей головного мозга на МРТ-снимках.

Для проведения экспериментальных исследований был сформирован набор

данных для обучения и проведена нормализация данных. Выполнена программная реализация нейросетевой архитектуры U-Net с применением фреймворка Keras на языке программирования Python. Проведено обучение НМ.

Проведен ряд экспериментов, в ходе которых были получены матрицы ошибок и классификации, что позволило

провести оценку качества классификации НМ с помощью таких метрик, как Recall, Precision и F1-мера. Исходя из результатов тестирования НМ при решении задачи сегментации областей головного мозга, пораженных глиомой, было получено среднее значение метрики качества сегментации (IoU), равное 0,812, что является приемлемым результатом.

Результаты тестирования показали, что НМ эффективно диагностирует наличие глиомы, с приемлемыми

значениями метрик качества классификации и сегментации, что указывает на возможность применения данной НМ в системах поддержки принятия врачебных решений для диагностики глиомы, а также ее сегментации на МРТ-снимках. Однако целесообразной является доработка данной НМ для уменьшения числа ложноотрицательных результатов классификации, что является критически важным в медицинской диагностике.

Список литературы

1. Epidemiology, risk factors, and prognostic factors of gliomas / A. Pellerino [et al.] // *Clinical and Translational Imaging*. 2022. Vol. 10. P. 467–475. <https://doi.org/10.1007/s40336-022-00489-6>
2. Malignant Glioma / L. Wang [et al.] // *Advances in experimental medicine and biology*. 2023. Vol. 1405. P. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23705-8_1
3. Patil P., Giridhar P. Epidemiology and Demography of Brain Tumors // *Evidence based practice in Neuro-oncology*. Springer, 2021. P. 3–7. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2659-3_1
4. Pediatric-type low-grade gliomas in adolescents and young adults-challenges and emerging paradigms / J. Bennett [et al.] // *Child's Nervous System*. 2024. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00381-024-06449-x>
5. Improved Glioma Grading Using Deep Convolutional Neural Networks / S. Gutta, J. Acharya, M. S. Shiroishi, D. Hwang, K. S. Nayak // *AJNR. Am. J. Neuroradiol.* 2021. N 42(2). P. 233–239. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6882>
6. Шевченко Т. А. Современные проблемы лечения глиом головного мозга высокой степени злокачественности // *Вестник Российского научного центра рентгенорадиологии Минздрава России*. 2021. № 3. С. 10–12.
7. CBTRUS Statistical Report: American Brain Tumor Association & NCI Neuro-Oncology Branch Adolescent and Young Adult Primary Brain and Other Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2016-2020 / M. Price [et al.] // *Neuro-Oncology*. 2024. N 26. P. 1–53. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noae047>
8. Jin Y., Peng H., Peng J. Brain glioma localization diagnosis based on MRI // *World neurosurgery*. 2021. N 149. P. 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.09.113>
9. Алгоритмы мониторинга эффективности терапевтических и реабилитационных процедур по показателям клинического анализа крови в системе поддержки принятия врачебных решений / А. В. Бутусов, А. В. Киселев, Е. В. Петрунина [и др.] // *Известия*

Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 170–190. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-170-190>

10. Томакова Р. А., Дзюбин И. А., Брежнев А. В. Метод и алгоритм обучения сверточной нейронной сети, предназначенной для интеллектуальной системы распознавания меланомы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 65–83. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83>

11. Automated glioma grading on conventional MRI images using deep convolutional neural networks / Y. Zhuge [et al.] // Medical Physics. 2020. N 47 (7). P. 3044–3053. <https://doi.org/10.1002/mp.14168>

12. Anaraki A. K., Ayati M., Kazemi F. Magnetic resonance imaging-based brain tumor grades classification and grading via convolutional neural networks and genetic algorithms // Biocybernetics and Biomedical Engineering. 2019. N 39. P. 63–74.

13. Intelligent Glioma Grading Based on Deep Transfer Learning of MRI Radiomic Features / C. M. Lo [et al.] // Applied Sciences. 2019. N 9 (22). P. 4926. <https://doi.org/10.3390/app9224926>

14. Medical Image Segmentation Review: The Success of U-Net / R. Azad [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2024. P. 1–20. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2024.3435571>

15. Pan J. Image Segmentation Based On U-Net and Adjusted U-Nets // Highlights in Science, Engineering and Technology. 2024. N 85. P. 316–327. <https://doi.org/10.54097/accm2w81>

16. Bangul K., Hajira F., Ayatullah Q. Drawbacks of Artificial Intelligence and Their Potential Solutions in the Healthcare Sector // Biomed Mater & Devices. 2023. Vol. 1. P. 731–738. <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00063-2>

17. TransDeepLab: Convolution-Free Transformer-Based DeepLab v3+ for Medical Image Segmentation / R. Azad [et al.] // Predictive Intelligence in Medicine: 5th International Workshop, PRIME 2022, Held in Conjunction with MICCAI 2022. Singapore: Springer, 2022. P. 91–102. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16919-9_9

18. The PRISM semantic cohort builder: a novel tool to search and access clinical data in TCIA imaging collections / J. Bona [et al.] // Physics in Medicine & Biology. 2022. N 68 (1). P. 014003. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac9d1d>

19. Increasing the Versatility of Leaky ReLU Using a Nonlinear Function / P. Bedi [et al.] // Advanced Machine Intelligence and Signal Processing. Springer, 2022. P. 433–442. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0840-8_32

20. Segmentation and Estimation of Fetal Biometric Parameters using an Attention Gate Double U-Net with Guided Decoder Architecture / S. Degala [et al.] // Computers in Biology and Medicine. 2024. N 180. P. 109000. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.109000>

21. Киселев А. В., Брусенцев Н. С., Кулешова Е. А. Анализ эффективности применения двухэтапных нейросетевых моделей для раннего обнаружения лесных пожаров //

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 8–23. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-8-23>

22. Stodt J., Reich C., Clarke N. Unified Intersection Over Union for Explainable Artificial Intelligence // *Intelligent Systems and Applications: Proceedings of the 2023 Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*. Springer, 2024. P. 758–770. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47724-9_50

References

1. Pellerino A., et al. Epidemiology, risk factors, and prognostic factors of gliomas. *Clinical and Translational Imaging*. 2022;10:467–475. <https://doi.org/10.1007/s40336-022-00489-6>

2. Wang L., et al. Malignant Glioma. *Advances in experimental medicine and biology*. 2023;1405:1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23705-8_1

3. Patil P., Giridhar P. Epidemiology and Demography of Brain Tumors. In: *Evidence based practice in Neuro-oncology*. Springer; 2021. P. 3–7. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2659-3_1

4. Bennett J., et al. Pediatric-type low-grade gliomas in adolescents and young adults—challenges and emerging paradigms. *Child's Nervous System*. 2024. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00381-024-06449-x>

5. Gutta S., Acharya J., Shiroishi M.S., Hwang D., Nayak K.S. Improved Glioma Grading Using Deep Convolutional Neural Networks. *AJNR. Am. J. Neuroradiol.* 20214;(42):233–239. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6882>

6. Shevchenko T.A. Modern problems of treatment of gliomas of the brain of a high degree of malignancy. *Vestnik Rossiiskogo nauchnogo tsentra rentgenoradiologii Minzdrava Rossii = Bulletin of the Russian Scientific Center for X-ray Radiology of the Ministry of Health of the Russian Federation*. 2021;(3):10–12. (In Russ.)

7. Price M., et. al. CBTRUS Statistical Report: American Brain Tumor Association & NCI Neuro-Oncology Branch Adolescent and Young Adult Primary Brain and Other Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2016–2020. *Neuro-Oncology*. 2024;(26):1–53. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noae047>

8. Jin Y., Peng H., Peng J. Brain glioma localization diagnosis based on MRI. *World Neurosurgery*. 2021;(149):325–332. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.09.113>

9. Butusov A.V., Kiselev A.V., Petrunina E.V., et al. Algorithms for monitoring the effectiveness of therapeutic and rehabilitation procedures based on indicators of clinical blood analysis in the medical decision support system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(1):170–190. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-170-190>

10. Tomakova R.A., Dzyubin I.A., Brezhnev A.V. Method and algorithm of training a convolutional neural network designed for an intelligent system of melanoma cognition. *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):65–83 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83>
11. Zhuge Y., et. al. Automated glioma grading on conventional MRI images using deep convolutional neural networks. *Medical Physics*. 2020; (47):3044–3053. <https://doi.org/10.1002/mp.14168>
12. Anaraki A.K., Ayati M., Kazemi F. Magnetic resonance imaging-based brain tumor grades classification and grading via convolutional neural networks and genetic algorithms // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2019;39:63–74.
13. Lo C. M., et al. Intelligent Glioma Grading Based on Deep Transfer Learning of MRI Radiomic Features. *Applied Sciences*. 2019; (9):4926. <https://doi.org/10.3390/app9224926>
14. Azad R., et al. Medical Image Segmentation Review: The Success of U-Net. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2024. P. 1–20. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2024.3435571>
15. Pan J. Image Segmentation Based On U-Net and Adjusted U-Nets. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024;85:316–327. <https://doi.org/10.54097/acm2w81>
16. Bangul K., Hajira F., Ayatullah Q. Drawbacks of Artificial Intelligence and Their Potential Solutions in the Healthcare Sector. *Biomed Mater & Devices*. 2023;1:731–738. [10.1007/s44174-023-00063-2](https://doi.org/10.1007/s44174-023-00063-2)
17. Azad R., et al. TransDeepLab: Convolution-Free Transformer-Based DeepLab v3+ for Medical Image Segmentation. In: *Predictive Intelligence in Medicine: 5th International Workshop, PRIME 2022, Held in Conjunction with MICCAI 2022*. Singapore: Springer, 2022. P. 91–102. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16919-9_9
18. Bona J., et al. The PRISM semantic cohort builder: a novel tool to search and access clinical data in TCIA imaging collections. *Physics in Medicine & Biology*. 2022; (68):014003. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac9d1d>
19. Bedi P., et al. Increasing the Versatility of Leaky ReLU Using a Nonlinear Function. In: *Advanced Machine Intelligence and Signal Processing*. Springer; 2022. P. 433–442. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0840-8_32
20. Degala S., et. al. Segmentation and Estimation of Fetal Biometric Parameters using an Attention Gate Double U-Net with Guided Decoder Architecture. *Computers in Biology and Medicine*. 2024;(180). <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2024.109000>
21. Kiselev A.V., Brusentsev N.S., Kuleshova E.A. Analysis of the effectiveness of using two-stage neural network models for early detection of forest fires. *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):8–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-8-23>

22. Stodt J., Reich C., Clarke N. Unified Intersection Over Union for Explainable Artificial Intelligence. In: *Intelligent Systems and Applications: Proceedings of the 2023 Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*. Springer; 2024. P. 758–770. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47724-9_50

Информация об авторах / Information about the Authors

Киселев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7228-0281

Alexey V. Kiselev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7228-0281

Кулешова Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8270-564X

Elena A. Kuleshova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8270-564X

Таныгин Максим Олегович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4099-1414

Maxim O. Tanygin, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tanygin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4099-1414

Дерябин Денис Романович, студент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vt.swsu@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-4102-0005

Denis R. Deryabin, Student of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vt.swsu@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-4102-0005

Халин Игорь Алексеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-1205-2139

Igor A. Khalin, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-1205-2139

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-121-143>



УДК 621.391.26

Мультимодальный классификатор медицинского риска на основе многоэлектродного биоимпедансного преобразователя

А. В. Серебровский¹, Н. А. Корсунский¹, А. В. Лях¹, В. Н. Мишустин²,
О. В. Шаталова¹✉, Л. В. Шульга¹

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

² Курский государственный медицинский университет
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: Shatolg@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Отечественные и зарубежные исследования доказали, что злокачественные опухоли молочной железы имеют значительно отличающийся импеданс от нормальных тканей. Однако биоимпедансный анализ имеет ограничения в разрешающей способности, а также в несовершенстве моделей биоимпеданса, необходимых для формирования входных векторов для систем машинного обучения.

Методы. В представленном исследовании предложен мультимодальный классификатор, сырые данные для которого получают посредством матрицы электродов. Он также имеет три канала обработки результатов биоимпедансного анализа, с последующей агрегацией их решений. Предложена импедансная модель биоматериала, позволяющая формировать дескрипторы для классификаторов медицинского риска.

Результаты. Разработаны аппаратно-программные средства для биоимпедансных исследований, которые включают устройство сбора данных для биоимпедансной спектроскопии на основе электродной матрицы, устройство связи с объектом исследования и устройство для спектроскопии биоимпеданса посредством матрицы электродов. Программные средства включают интерфейсные окна для настройки программы биоимпедансных исследований и обучения и тестирования полносвязных нейронных сетей. Проведены экспериментальное исследование мультимодального классификатора на физической модели с использованием включений большей проводимости (имитация опухоли) различных типов и размеров в диапазоне проводимости от 1,1 до 1,9 от фоновой. На основе полученных изображений в двухуровневой нейронной сети первого канала определялся интегральный риск рака молочной железы по всем пикселям изображения. Статистические исследования (ROC-анализ) показали достаточную для скринингового метода чувствительность и специфичность – >0,75.

Заключение. Таким образом, создана новая модель интеллектуальной поддержки принятия врачебных решений, интегрирующая возможности спектроскопии биоимпеданса, сверточных нейронных сетей и экспертного оценивания изображений, формируемых посредством биоимпедансного картирования. Однако современные данные, подтверждающие возможность разделения доброкачественных и злокачественных опухолей молочной железы с помощью методов биоимпедансометрии, весьма ограничены, что требует проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Ключевые слова: рак молочной железы; биоимпедансная спектроскопия; многозвенная модель биоимпеданса; мультимодальный классификатор; дескрипторы; нейронная сеть; алгоритм.

Финансирование: Работа выполнена 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: Мультимодальный классификатор медицинского риска на основе многоэлектродного биоимпедансного преобразователя / А. В. Серебровский, Н. А. Корсунский, А. В. Лях, В. Н. Мишустин, О. В. Шаталова, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С.121–143. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-121-143>

Поступила в редакцию 15.07.2024

Подписана в печать 11.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Multimodal classifier of medical risk based on a multielectrode bioimpedance converter

Andrey V. Serebrovsky¹, Nikita A. Korsunskii¹, Anton V. Lyakh¹,
Vladimir N. Mishustin², Olga V. Shatalova¹ ✉, Leonid V. Shulga¹

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

² Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
3 Karl Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: Shatolg@mail.ru

Abstract

The purpose of the research. The aim of the study is Russian and foreign studies have shown that malignant breast tumors have significantly different impedance from normal tissues. However, bioimpedance analysis has limitations in resolution, as well as in the imperfection of bioimpedance models required to generate input vectors for machine learning systems.

Methods. The presented study proposes a multimodal classifier, the raw data for which are obtained through an electrode matrix. It also has three channels for processing the results of bioimpedance analysis, with subsequent aggregation of their solutions. An impedance model of biomaterial is proposed, which allows forming descriptors for medical risk classifiers.

Results. Hardware and software for bioimpedance studies have been developed, which include a data collection device for bioimpedance spectroscopy based on an electrode matrix, a device for communication with the object of study, and a device for bioimpedance spectroscopy using an electrode matrix. The software includes interface windows for setting up the bioimpedance research program and training and testing fully connected neural networks. An experimental study of the multimodal classifier on a physical model was conducted using inclusions of higher conductivity (tumor imitation) of various types and sizes in the conductivity range from 1.1 to 1.9 of the background. Based on the obtained images in the two-level neural network of the first channel, the integral risk of breast cancer was determined for all pixels of the image. Statistical studies (ROC analysis) showed sufficient sensitivity and specificity for the screening method - > 0.75.

Conclusion. Thus, a new model of intelligent support for medical decision-making has been created, integrating the capabilities of bioimpedance spectroscopy, convolutional neural networks and expert assessment of images generated by bioimpedance mapping. However, current data confirming the possibility of separating benign and malignant breast tumors using bioimpedancemetry methods are very limited, which requires further research in this direction.

Keywords: breast cancer; bioimpedance spectroscopy; multi-tier bioimpedance model; multimodal classifier; descriptors; neural network; algorithm.

Financing: The work was carried out within the framework of the implementation of the program for the development of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwestern State University" of the strategic academic leadership program "Priority 2030".

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

For citation: Serebrovsky A.V., Korsunskii N.A., Lyakh A.V., Mishustin V.N., Shatalova O.V., Shulga L.V. Multimodal classifier of medical risk based on a multielectrode bioimpedance converter. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(3):121–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-121-143>

Received 15.07.2024

Accepted 11.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Рак молочной железы (РМЖ) является наиболее распространенной злокачественной опухолью среди женщин. Раннее выявление РМЖ играет ведущую роль в снижении уровня смертности [1]. В настоящее время рентгеновская маммография является стандартным методом скрининга для выявления РМЖ [2]. Однако она имеет ряд ограничений, включая снижение способности выявлять карциному у женщин с плотной тканью молочной железы (МЖ) [3].

В последнее время использование методов биоимпедансного анализа для обнаружения РМЖ стало новым направлением¹, поскольку было найдено больше доказательств того, что злокачественные опухоли МЖ имеют значительно отличающийся импеданс от нормальных тканей [4]. Электрический импеданс можно использовать для разделения доброкачественных и злокачественных опухолей и, следовательно, уменьшить количество доброкачественных

биопсий [3]. Однако существует ряд проблем, которые ограничивают их клиническое применение, включая выявление РМЖ [4]. Ключевым ограничением биоимпедансных методов диагностики РМЖ является их низкое пространственное разрешение [5], изменяющийся импеданс контакта электрода с кожей, ограниченное количество независимых измерений и низкое соотношение сигнал / шум [6], что является причиной неточного моделирования системы [7].

В последние годы появилось много автоматических систем для классификации риска РМЖ. Категоризация РМЖ – это проблема классификации, которая требует выделения пространства информативных признаков – дескрипторов и последующей классификации. Однако один классификатор не может изучить все особенности обнаружения РМЖ (Н. Wang и др., 2018). Учитывая недостаток использования только одного классификатора, предлагаются различные алгоритмы, основанные на ансамбле

¹ Пат. 2504328 Российская Федерация. Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Томакова Р. А., Филист С. А., Кузьмин А. А.,

Кузьмина М. Н., Алексенко В. А., Волков И. И. № 2012128471/14; заявл. 06.07.12; опубл. 20.01.14.

классификаторов. М. Ф. Акау использовал гибридный метод, предложенный Чжаном и др., где авторы представили гибридный классификатор с различными наборами признаков и использовали SVM для классификации. Нечеткий подход для выбора признака и метод нечеткого ближайшего соседа для обнаружения РМЖ объединены в гибридную систему классификации для обнаружения РМЖ (А. Onan, 2015).

Совокупность классификаторов является важным методом повышения производительности одного классификатора (L. Rokach, 2010). Предсказания, полученные с помощью одного классификатора, объединяются различными методами в классификаторах, основанных на ансамбле, что улучшает общее предсказание и дает более точные прогнозы, чем с помощью одного классификатора (Т. G. Dietterich, 1997). В типичных настройках классификаторов на основе ансамблей классификаторов обучающие данные реплицируются k раз, а затем создаются k классификаторов путем повторной выборки исходных данных (L. Breiman, 1996). Аналогичным образом существуют различные методы голосования для классификации. Наиболее распространенный подход к голосованию заключается в объединении результатов классификаторов базового уровня с использованием множества. Однако эта стратегия не использует выборку метаданных, и все обучающие наборы и классификаторы используют одну и ту же технику голосования (S. Dzeroski and B. Zenko, 2004) [8].

Несмотря на то, что предыдущие исследования показали, что использование

ансамбля классификаторов улучшает результаты классификации, использование ансамблей классификаторов в системах поддержки принятия решений при диагностике РМЖ биоимпедансными методами в научной литературе освещено недостаточно [9]. Поэтому научнотехнической задачей данной работы является устранение этого пробела путем разработки гибридного классификатора риска РМЖ на основе биоимпедансных исследований [10].

Материалы и методы

За основу метода классификации риска РМЖ принят мультимодальный подход, основанный на методе биоимпедансной спектроскопии [11]. Согласно этому подходу необходимо построить несколько моделей классификаторов, которые основаны на различных методах классификации и на различных методах формирования дескрипторов, с последующей агрегацией их решений [12; 13].

Структурная схема мультимодального классификатора риска РМЖ, включающая три канала анализа данных биоимпедансных исследований, представлена ниже (рис. 1). Для получения сырых данных биоимпедансного анализа в нем используется матрица электродов [14]. Блок формирования дескрипторов является по существу блоком построения параметрической модели биоимпеданса МЖ. После формирования параметрических моделей биоимпеданса их параметры используются в качестве дескрипторов двухуровневого классификатора в первом канале мультимодального классификатора (рис. 1).

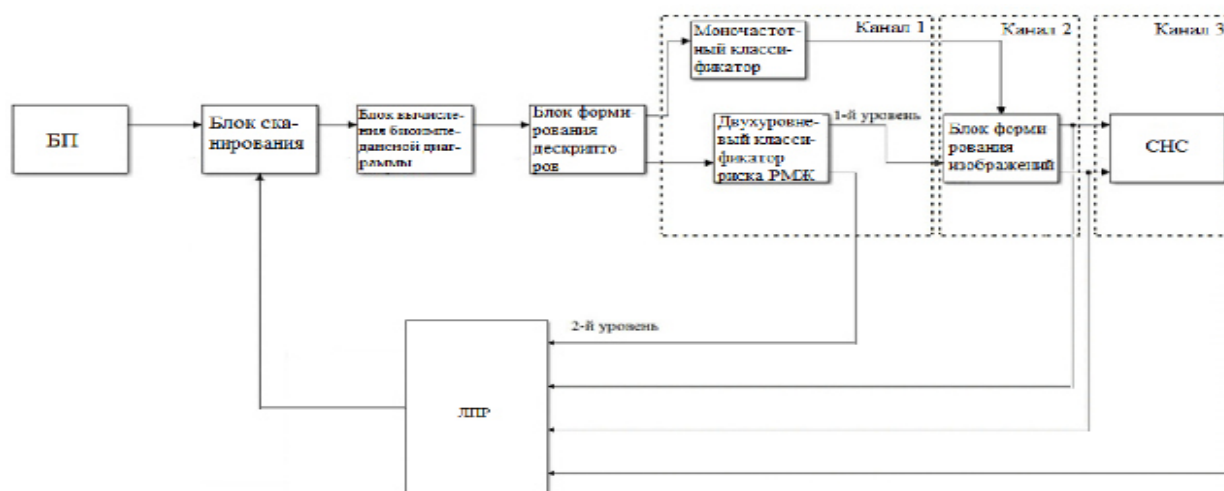


Рис. 1. Структурная схема мультимодального классификатора риска рака молочной железы

Fig. 1. Structural diagram of the multimodal breast cancer risk classifier

Этот классификатор может выдавать показатели риска РМЖ как дифференцированно по электродам матрицы, так и интегрально по всей матрице. Так как лицу, принимающему решение (ЛПР), весьма трудно оценить показания во всех отведениях матрицы электродов, то эти показания желательно представить в виде изображения, что осуществляется во втором канале мультимодального классификатора [15].

Кроме двухуровневого классификатора в первый канал мультимодального классификатора введен моночастотный классификатор. В его задачу входит получить отсчеты биоимпеданса в отведениях на фиксированной частоте. Это напараметрический классификатор, в котором в качестве дескрипторов используются отсчеты действительных и мнимых составляющих биоимпеданса ReZ и ImZ на определенных частотах. Полученные изображения анализируются ЛПР субъективно или объективно посредством сверточной нейронной сети (СНС) в третьем канале мультимодального классификатора. Анализируя данные о риске РМЖ с трех каналов, ЛПР может проводить повторные

исследования путем смены дислокации матрицы электродов относительно МЖ, получая тем самым наиболее информативное изображение и наиболее стабильные показания объективного контроля риска РМЖ.

Биоимпедансный преобразователь накладывается на области интереса МЖ. При этом в качестве сигнальных электродов используются электроды матрицы электродов, которые непосредственно контактируют с поверхностью кожи МЖ. Индифферентный электрод может быть прикреплен к любой конечности, как это показано ниже (рис. 2).

Во время измерения между индифферентным электродом и измерительными электродами матрицы электродов на биоимпедансном преобразователе прикладывается переменное напряжение [16]. Ток проходит от руки пациента к высокопроводящей грудной мышце, которую можно рассматривать как изопотенциальную плоскость. Таким образом, между грудной мышцей и зондом, прижатым к груди лежащего пациента, создается примерно параллельная электрическая конфигурация (рис. 3).

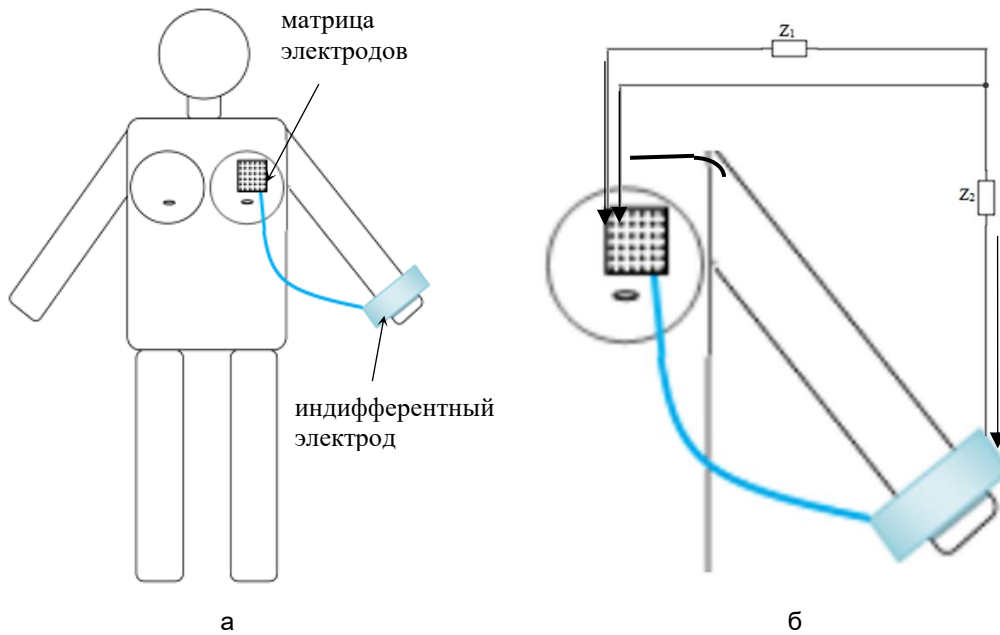


Рис. 2. Измерение биоимпеданса молочной железы: а – места крепления электродов на теле женщины; б – схема снятия показаний [14]

Fig. 2. Breast bioimpedance measurement: a – electrode attachment points on the body of a woman; б – the scheme of taking readings [14]

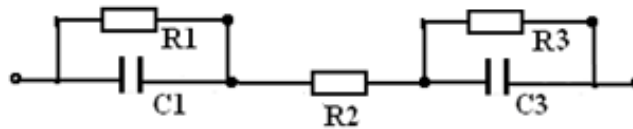


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема взаимодействия электродов и биоматериала молочной железы

Fig. 3. Equivalent electrical circuit of the interaction between electrodes and breast biomaterial

Эквивалентная схема (рис. 3) соответствует импедансу Z_2 , показанному на рисунке 2, б. В соответствии с законами

электротехники выражение для эквивалентного импеданса, приведенного на рисунке 3, имеет вид

$$Z_2 = \frac{R_1}{j\omega C_1 \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right)} + R_2 + \frac{R_3}{j\omega C_3 \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \right)}. \quad (1)$$

После выделения активной $a(\omega)$ и реактивной $b(\omega)$ составляющих импеданса имеем

$$a(\omega) = \left(R_2 + \frac{R_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} + \frac{R_3}{1 + \omega^2 R_3^2 C_3^2} \right), \quad (2)$$

$$b(\omega) = -\omega \left(\frac{R_1^2 C_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} + \frac{R_3^2 C_3}{1 + \omega^2 R_3^2 C_3^2} \right). \quad (3)$$

Выбирается линейка исследуемых частот M . На каждой из M выбранных частот определяется импеданс биоматериала. На каждой частоте выполняется 10 измерений биоимпеданса с последующим усреднением. Действительные и мнимые части биоимпеданса определяются по методике, приведенной в [4].

После получения $a(\omega)$ и $b(\omega)$ для всех электродов матрицы электродов (рис. 2, а) приступаем к определению параметров модели Z_2 для каждого из этих электродов. Алгоритм для определения параметров моделей (рис. 3) рассмотрен в [17] и заключается в решении систем нелинейных алгебраических уравнений.

Практика решения таких уравнений показала, что при отсутствии дополнительной информации о параметрах модели имеем множество решений, из которых необходимо выбрать оптимальное. При этом вызывают определенные трудности в распределении импеданса по RC -двухполюсникам, представляющим биоимпедансную модель МЖ [17]. Так как матричный электрод и индифферентный электрод имеют разную конструкцию, то очевидно, что в модели импеданса (2) и (3) параметры модели C_1R_1 и C_3R_3 существенно отличаются. В этом случае целесообразно сначала определить параметры первого двухполюсника,

соответствующего матричному электроду, а затем параметры второго двухполюсника, соответствующего индифферентному электроду.

Для понимания такого подхода рассмотрим рисунок 2, б. Между парой матричных электродов включаем эквивалентное сопротивление Z_1 . Его также, как и Z_2 , можно представить в виде двух последовательно соединенных двухполюсников. Но, в отличие от Z_2 , параметры этих двухполюсников можно принять идентичными, так как они расположены на малом расстоянии друг от друга. При этом активным сопротивлением R_2 в уравнении (2) можем пренебречь по той же причине.

На рисунке 4 представлена схема определения сопротивлений Z_1 и Z_2 согласно рисунку 2, б. Вначале ключ SA находится в положении 1 и измеряется биоимпеданс Z_1 между парой матричных электродов. Для определения параметров модели Z_1 уравнения (4) и (5) запишутся следующим образом:

$$a(\omega) = \left(\frac{2R_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} \right), \quad (4)$$

$$b(\omega) = -\omega \left(\frac{2R_1^2 C_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} \right). \quad (5)$$

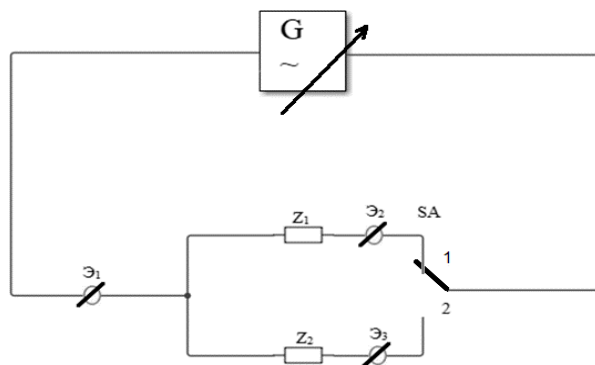


Рис. 4. Схема измерения импедансов Z_1 и Z_2

Fig. 4. Diagram of measuring impedances Z_1 and Z_2

Анализируя уравнения (4) и (5), приходим к выводу, что для построения параметрической модели Z_1 необходимо определить только C_1 , которое может быть определено из квадратных алгебраических уравнений, полученных из уравнений (4) и (5). Однако эти решения нуждаются в оптимизации, так как каждая частота анализа в общем случае даст свое значение емкости C_1 . Для

оптимизации ее значений существуют множество методов, в т. ч. и статистических. В данной работе для оптимизации значений C_1 используем многослойную нейронную сеть прямого распространения сигнала [18; 19; 20]. Схема алгоритма определения параметров емкости C_1 посредством искусственной нейронной сети (ИНС) представлена ниже (рис. 5).

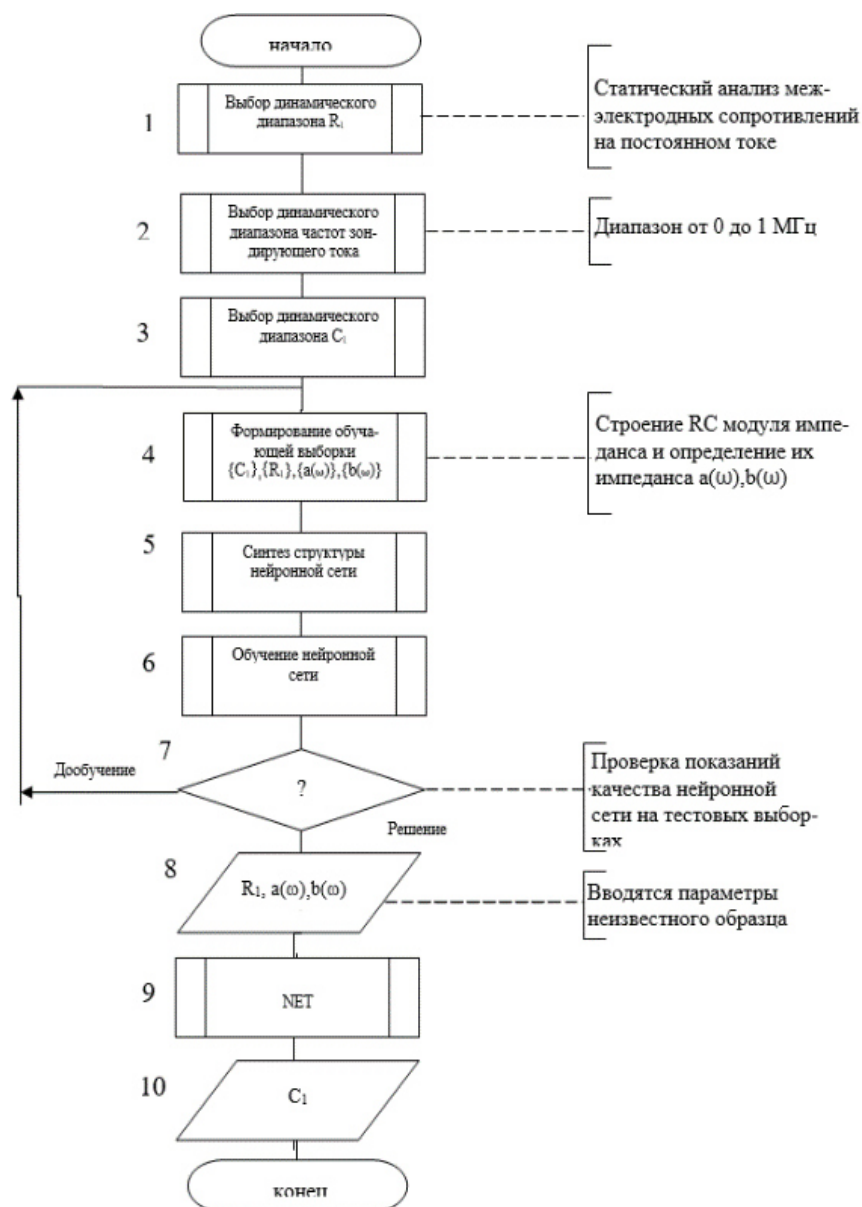


Рис. 5. Схема алгоритма определения параметров емкости C_1 посредством искусственной нейронной сети

Fig. 5. Diagram of the algorithm for determining the capacitance parameters C_1 using an artificial neural network

В блоке 1 определяется динамический диапазон резистора R_1 . Технология его определения изложена в работе [5]. В блоке 2 определяется частотный диапазон тока зондирования. Здесь надо выбрать не только границы частотного диапазона, но и контрольные точки на частотной оси, на которых определяется импеданс модели.

К сожалению, в научно-технической литературе мало место уделено этому вопросу. Здесь обычно исходят из наличия технических средств, которые позволяют построить измерительный комплекс в выбранном диапазоне частот.

В блоке 3 определяется динамический диапазон C_1 . Его можно вычислить путем решения алгебраических квадратных уравнений (4), (5) относительно C_1 . Например, из (4) на i -й частоте имеем

$$C_1 = -\frac{1}{\omega_i^2 R_1^2} + \sqrt{\frac{2}{a(\omega_i) \omega_i^2 R_1}}. \quad (6)$$

В блоке 4 формируются RC -двухполюсники со случайными параметрами, выбранными из установленных динамических диапазонов независимых переменных, определяются их параметры $a(\omega_i)$, $b(\omega_i)$, которые в данном случае также являются независимыми переменными, и строятся таблицы объектов-признак, в которых в качестве цели выступает значение емкости C_1 .

В блоке 5 осуществляется формирование структуры ИНС прямого распространения сигнала (рис. 6). В блоке 6 осуществляется обучение нейронной сети. Для обучения ИНС используется алгоритм обучения с учителем.

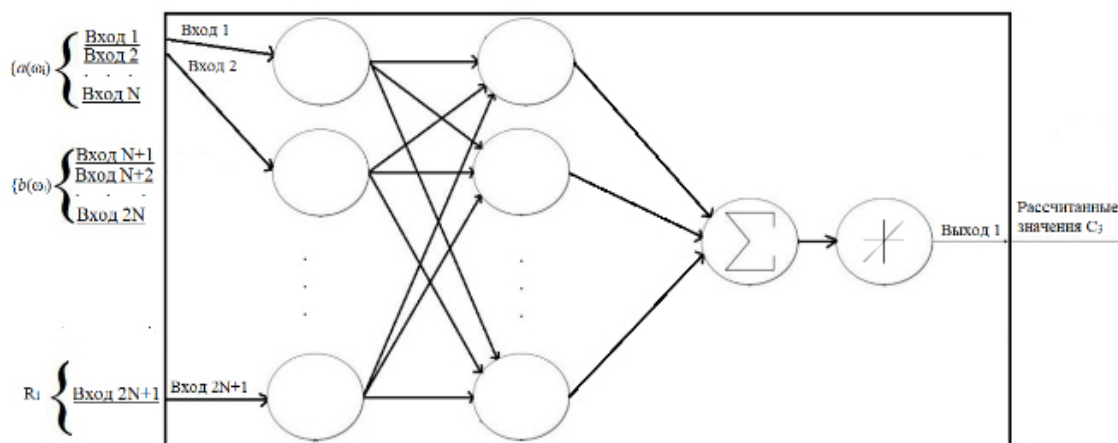


Рис. 6. Структура искусственной нейронной сети прямого распространения сигнала для построения модели пассивного RC -двухполюсника для импеданса Z_1

Fig. 6. Structure of the artificial neural network for direct signal propagation to build a passive RC two-pole model for impedance Z_1

Для управляемого обучения пользователю требуется самостоятельно подготовить набор требуемых обучающих данных (блок 4). Они являются входными данными и соответствующим им

выходом (значение C_1). Сама сеть устанавливает связь между первыми и вторыми. Затем ИНС обучается с помощью алгоритма управляемого обучения, при котором используются данные для

корректировки весов сети и ее пороговые значения для того, чтобы максимально уменьшить ошибку прогноза на обучающем множестве.

В блоке 7 осуществляется проверка качества модели. Если показатели качества неудовлетворительные, то осуществляется переход на блок 4 с последующим дополнением образцов в обучающей выборке и модификацией структуры ИНС. Если показатели качества удовлетворительны, то осуществляется переход ИНС в рабочий режим с загрузкой неизвестных образцов и определение Цели (блоки 8, 9, 10). После обучения ИНС используем ее для прогнозирования ситуации, когда выходные значения неизвестны.

Для построения модели Z_2 ключ SA (рис. 4) устанавливается в положение 2. В этом случае напряжение подается на биоматериал с импедансом Z_2 , эквивалентное сопротивление которого соответствует уравнениям (2) и (3). Учитывая, что параметры первого двухполюсника были определены в процессе

эксперимента с ключом SA в положении 1, то необходимо только определить параметры модели R_2 , R_3 , C_3 .

Однако, если рассмотреть эквивалентную схему (рис. 3), видим, что здесь так же, как и при определении параметров эквивалентной схемы импеданса Z_2 , можно экспериментально определить сопротивление двухполюсника на постоянном токе. Это сопротивление, согласно эквивалентной схеме, равно $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3$. Если $R_{\text{общ}}$ определяется экспериментально, то в качестве априорной информации используем значение $R^* = R_{\text{общ}} - R_1$.

Параметры C_3 и R_3 определяем по способу, аналогичному определению параметра C_1 . Таким образом, используем алгоритм, аналогичный алгоритму, схема которого представлена на рисунке 5, и ИНС прямого распространения сигнала. В отличие от ИНС (рис. 6) у ИНС для определения параметров двухполюсника Z_2 будет два выхода, а вектор Цель будет двухкомпонентный. Структура этой ИНС показана ниже (рис. 7).

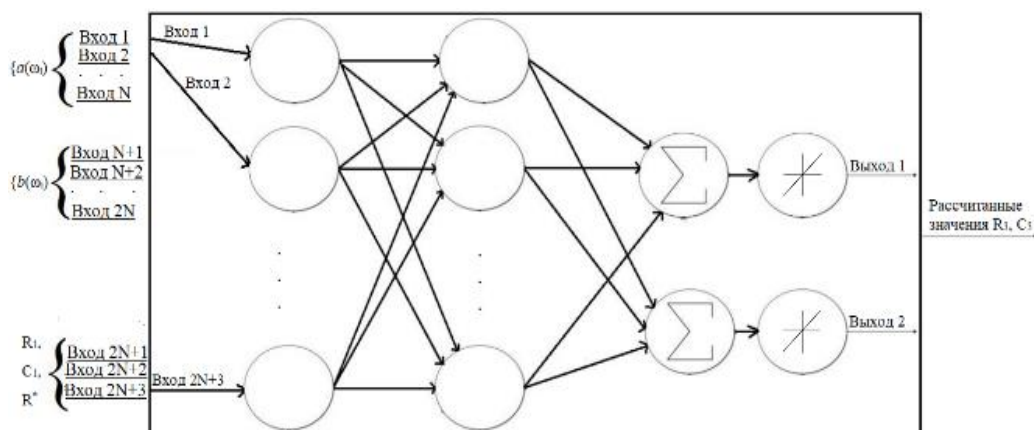


Рис. 7. Структура искусственной нейронной сети прямого распространения сигнала для построения модели пассивного RC-двухполюсника для импеданса Z_2

Fig. 7. Structure of the artificial neural network for direct signal propagation to build a passive RC two-pole model for impedance Z_2

Получив соответствующие параметры модели импеданса, можем построить структуру ИНС, предназначенную для классификации риска РМЖ, пример которой представлен на рисунке 8. В данную структуру входят ИНС NET1 и NET2. NET1 определяет риски РМЖ по импедансу Z_2 для каждого электрода электродной матрицы. Обычно используется матрица 16×16

электродов, поэтому структура ИНС представлена для 256 электродов. После определения параметров эквивалентных двухполюсников для всех электродов матрицы, они последовательно через мультиплексор подаются на входы NET1, которая принимает решение по риску РМЖ на основе данных, поступающих с одного электрода матрицы.

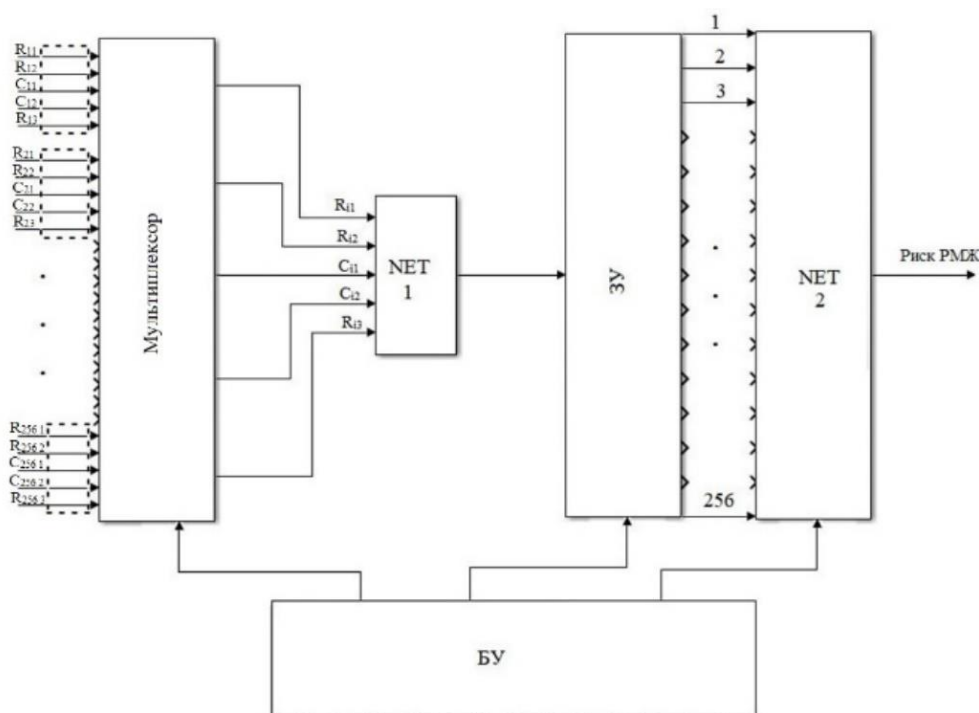


Рис. 8. Структура искусственной нейронной для оценки риска рака молочной железы на основе данных биоимпедансных исследований

Fig. 8. Structure of the artificial neural network for assessing the risk of breast cancer based on bioimpedance research data

NET2 обобщает показатели риска РМЖ по всем электродам матрицы ИНС. На ее входы из запоминающего устройства (ЗУ) поступают риски РМЖ, вычисленные ИНС NET1 по всем электродам матрицы, а на ее выходе имеем интегральный риск РМЖ. Координацию работы блоков и синхронизацию данных в такой ИНС осуществляет блок управления (БУ).

Результаты и их обсуждение

Для проведения биоимпедансных исследований использовалось устройство сбора данных (УСД), выполненное по аналогам, описанным в [4; 5]. На рисунке 9 показана структурная схема УСД при моделировании эквивалентного двухполюсника с импедансом Z_2 . Для согласования УСД с биообъектом (БО) использовалось устройство связи с

объектом (УСО), содержащее усилители, включенные на выходе цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) УСД.

УСО позволяет осуществлять связь с БО посредством управления подключением электродов отведений к

генератору, функции которого как у ЦАП. Частотный диапазон зондирующего тока составлял от нуля герц до 20 кГц. Величина зондирующего тока подбиралась индивидуально для каждого пациента и лежала в диапазоне от 10 до 20 мкА. Рассмотрим пример его реализации (рис. 10).

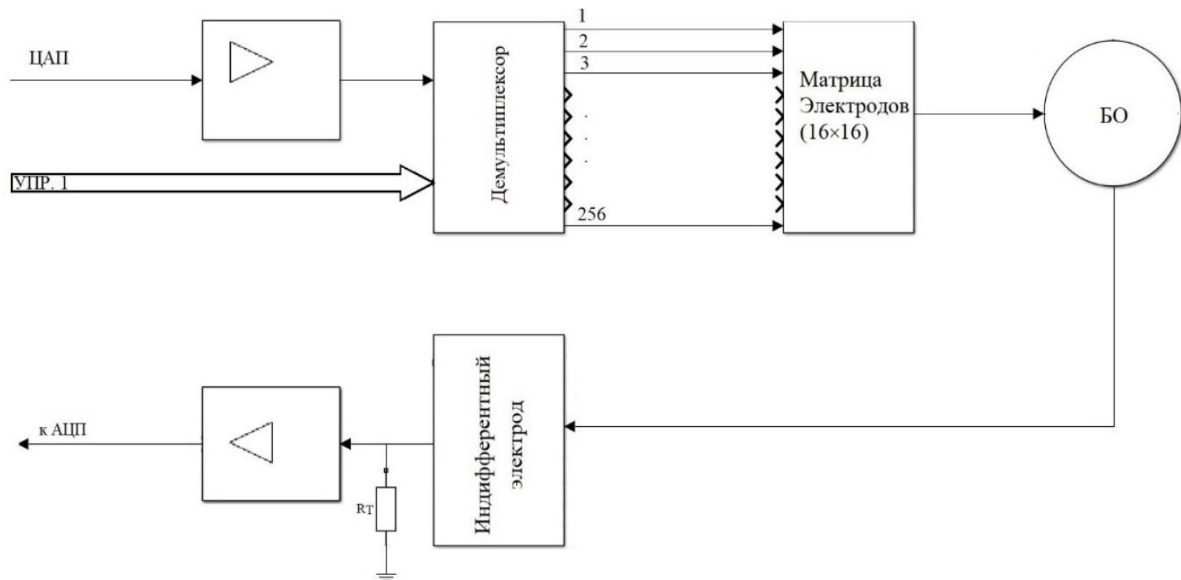


Рис. 9. Структурная схема устройства сбора данных при моделировании эквивалентного двухполюсника с импедансом Z_2

Fig. 9. Structural diagram of the data collection device when modeling the equivalent two-pole with impedance Z_2

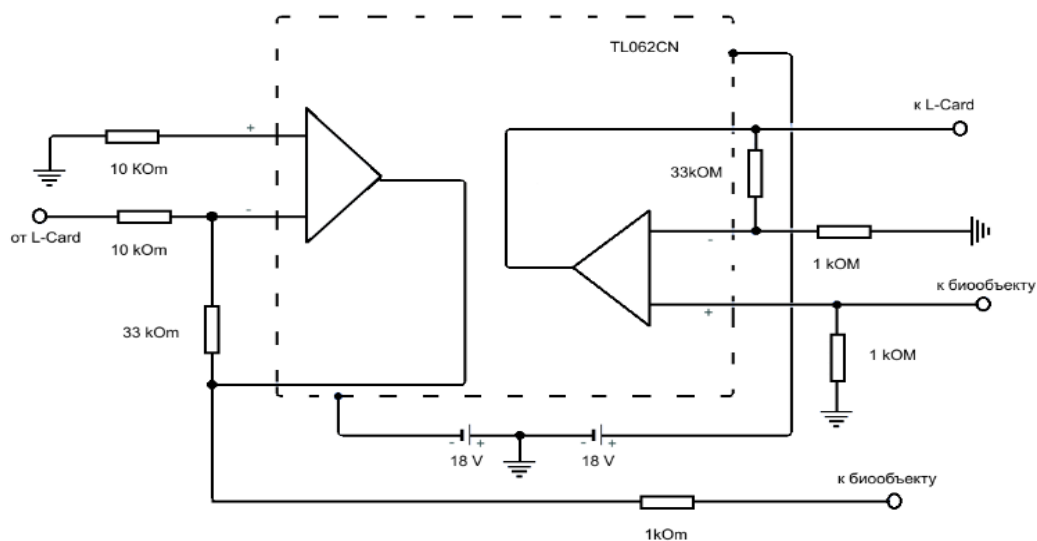


Рис. 10. Схема электрическая принципиальная устройства связи с биообъектом

Fig. 10. Schematic electrical diagram of the device for communication with the bio-object

В зависимости от того, какая модель эквивалентного двухполюсника создается, УСД выполняется в двух исполнениях. На схеме УСД (рис. 9) на каждый электрод матрицы электродов подается зондирующий ток с ЦАП. Конкретно, какой из 256 электродов подключен к ЦАП, определяет демультиплексор. При этом индифферентный электрод подключен к БО постоянно, независимо от того, какой из электродов матрицы электродов выбран демультиплексором.

На рисунке 11 показана структурная схема УСД при моделировании эквивалентного двухполюсника с импедансом Z_1 . Здесь используются два

мультиплексора (мультиплексор и демультиплексор). Демультиплексор выбирает первый электрод отведения, а мультиплексором выбирается второй электрод отведения. К выходам демультиплексора подключены все 256 электродов матрицы электродов, а ко входам мультиплексора подключены 255 электродов матрицы, первый электрод не подключается, так как отведение образуется парой разных электродов. Если к мультиплексору в качестве 256 электрода подключить индифферентный электрод, то схемы (рис. 9 и 11) объединяются в одну универсальную.

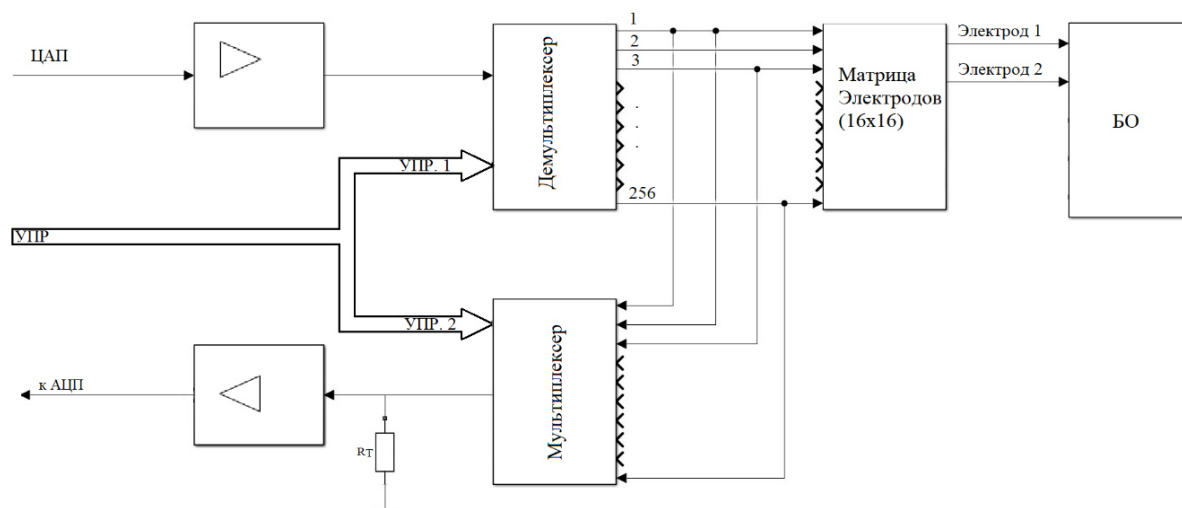


Рис. 11. Структурная схема устройства сбора данных при моделировании эквивалентного двухполюсника с импедансом Z_1

Fig. 11. Structural diagram of the data collection device when modeling the equivalent two-pole with impedance Z_1

Рассмотрим функциональную схему устройства для спектроскопии биоимпеданса посредством матрицы электродов (УСБПМЭ) (рис. 12).

Устройство содержит микроконтроллер 1 и ЦАП 2, посредством которого формируются импульсы зондирующего тока различной частоты, которые обеспечивают возможность формирования импедансных диаграмм в отведениях. Для согласования выхода ЦАП 2 с БО 7

используется фильтр нижних частот (ФНЧ) 3 и усилитель 4. Резистор 9 и усилитель 10 выполняют функцию преобразователя ток-напряжение, который позволяет микроконтроллеру 1 контролировать ток через БО 7. ЦАП 2 управляет током в БО. Двухканальный АЦП 11 обеспечивает работу синхронного детектора. Для формирования отведений используются мультиплексор 5 и демультиплексор 8.

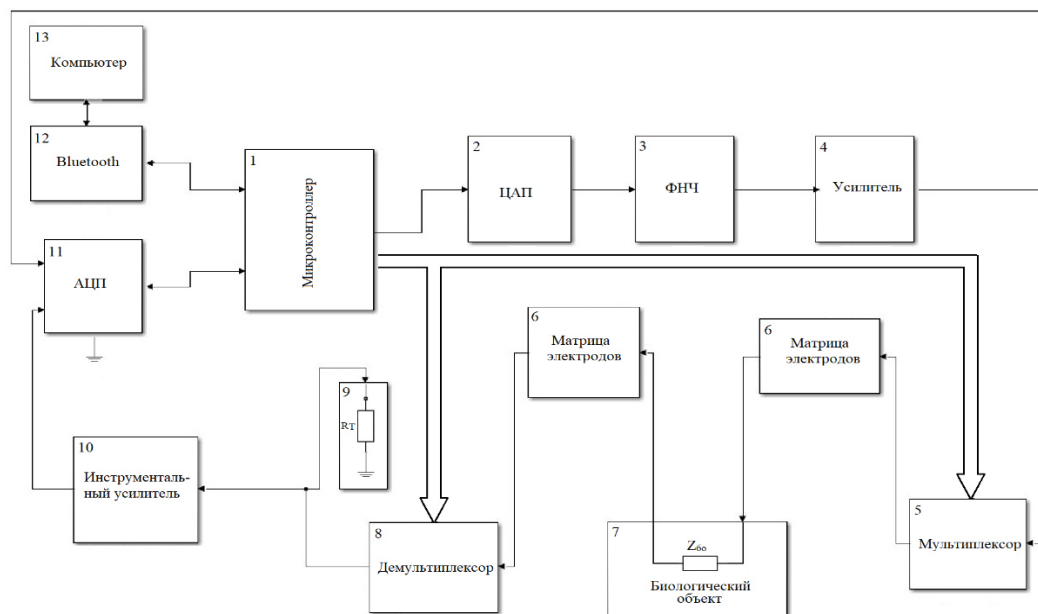


Рис. 12. Функциональная схема устройства для спектроскопии биоимпеданса посредством матрицы электродов

Fig. 12. Functional diagram of the device for bioimpedance spectroscopy using an electrode array

Программное обеспечение (ПО) для УСБПМЭ включает ряд интерфейсных окон, предназначенных для его настройки. В качестве входных параметров ПО позволяет пользователю задать амплитуду, частоту и частотный

диапазон инжектируемого тока, частоту дискретизации ЦАП и АЦП.

При получении импедансных диаграмм необходимо задать параметры исследования, которые задаются в интерфейсном окне (рис. 13).

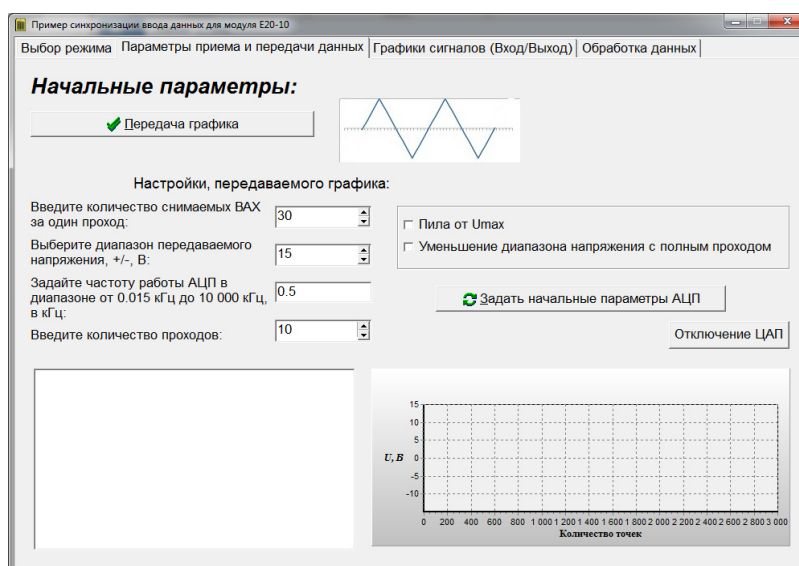


Рис. 13. Интерфейсное окно для задания параметров биоимпедансного исследования

Fig. 13. Interface window for setting parameters of the bioimpedance study

Параметрами режима являются:

– динамический диапазон напряжения ($U_{\max} \dots U_{\min}$) – задается в диапазоне от -15 В до $+15$ В, которое подается на биообъект;

– форма зондирующего тока: импульсы, пилообразная, синусоидальная, постоянный ток;

– шаг дискретизации сигнала по времени для АЦП (Δ), которое задается в диапазоне $0,015$ кГц – 10 МГц;

– длительность кадра « T », в котором формируются данные для передачи в компьютер.

Для управления генератором синусоидального напряжения, выполненным на блоках 2, 3 и 4, в памяти компьютера 13 создается массив, который перегружается через Bluetooth 12 в буфер ЦАП, который имеет установленный размер 128×32 байт. Дискретные отсчеты ЦАП _{i} генерации синусоидального напряжения вычисляются по формуле

$$\text{ЦАП}_i = U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot i), \quad (7)$$

где i – номер отсчета в регистре ЦАП; U – амплитуда синусоидального напряжения на выходе генератора.

АЦП загружает дискретные данные в буфер размером 256×32 байт. Преобразование их в вольты осуществляется по формуле

$$U = Y \cdot D / 8192, \quad (8)$$

где U – напряжение на входе АЦП (в вольтах); Y – код на выходе АЦП; D – динамический диапазон на входе АЦП (± 5 В), $(-8192 \dots 8191)$ – формат знакового целого двухбайтового числа, в котором хранятся данные в буфере.

Файл данных сохраняется в компьютере с расширением “.data” [21; 22].

Для настройки ИНС со структурой, (рис. 6–8) использовалось ПО Neurowork, разработанное в среде Matlab на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ. ПО Neurowork предоставляет пользователю ряд возможностей для построения систем искусственного интеллекта. Эти возможности представлены в виде вкладок GuiData и GuiNet, примеры работы с которыми описаны в [23].

Экспериментальное исследование мультимодального классификатора проводилось на физической модели с использованием включений большей проводимости (имитация опухоли) различных типов и размеров, а также при различных положениях включений. Физическая модель представляет собой емкость, наполненную физиологическим раствором (удельное сопротивление $\rho = 0,710$ Ом·м), в который последовательно на определенную глубину опускают предметы с большей или меньшей электропроводностью, создавая тем самым зоны неоднородной проводимости.

На рисунке 14, а показан пример биоимпедансного изображения, в котором четко видны два объекта возмущения проводимости, создаваемые проводящим и непроводящим включениями. Разница проводимостей по отношению к фону приблизительно на $+0,9$ и на $-0,9$. На рисунке 14, б показан пример биоимпедансного изображения с возмущающим объектом, погруженным на $0,5$ мм в раствор с проводимостью на $+0,1$ выше по отношению к фоновой.

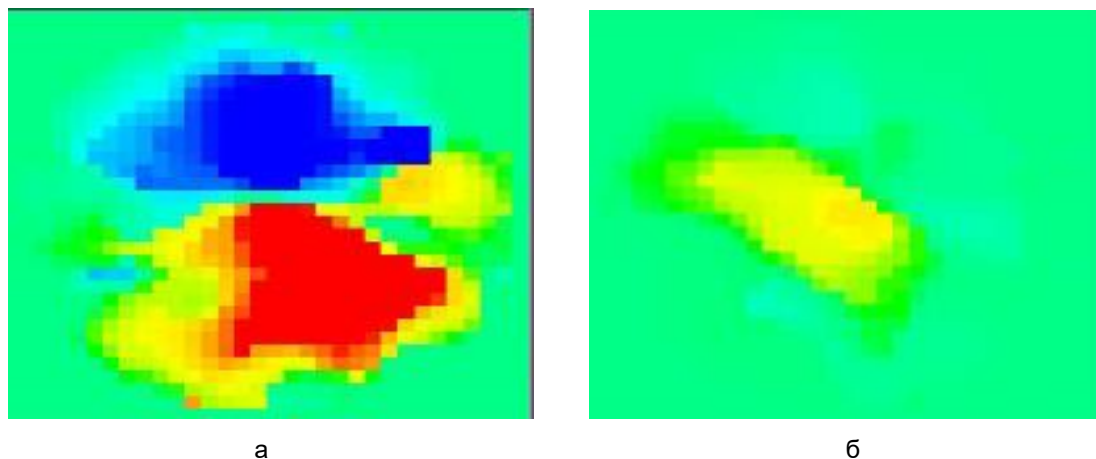


Рис.14. Биоимпедансные изображения, полученные на фантоме: а – два возмущающих объекта с изменениями проводимостей на $+0,9$ и $-0,9$ по отношению к фоновой; б – один возмущающий объект с изменением проводимости на $+0,1$ по отношению к фоновой

Fig. 14. Bioimpedance images obtained on a phantom: а – two disturbing objects with conductivity changes of $+0,9$ and $-0,9$ relative to the background; б – one disturbing object with a conductivity change of $+0,1$ relative to the background

Всего в обучающую выборку было включено 100 изображений с различными включениями с вариацией проводимости в диапазоне от 1,9 до 1,1 от фоновой. На основе полученных изображений в двухуровневой нейронной сети первого канала определялся интегральный риск РМЖ по всем пикселям изображения. ROC-анализ представленной системы машинного обучения показал, что диагностическая чувствительность и диагностическая специфичность на всех тестовых выборках превышает величину 0,74. Этого достаточно для использования представленной модели мультимодального классификатора для скринингового метода [24]. Таким образом, мультимодальный классификатор в первом канале позволяет обнаруживать изменения проводимости в солевой среде, что делает его жизнеспособной альтернативой для проведения маммографических исследований посредством

рентгеновских и ультразвуковых исследований [25].

Предлагаемая модель мультимодального классификатора имеет преимущества по сравнению с другими известными устройствами биоимпедансной спектроскопии, поскольку концентрирует функции: генерации электрического тока, измерения напряжения, мультиплексирования и демодуляции электродов, сокращая количество модулей системы и ее соответствующих интерфейсов, что облегчает ее реализацию при низких затратах.

Выводы

Таким образом, мультимодальный классификатор позволяет определить риск онкологического заболевания по результатам спектроскопии биоимпеданса в области дислокации матрицы электродов. Также посредством мультимодального классификатора имеем возможность контролировать реакции

организма на лечебно-оздоровительные процедуры, следовательно, осуществлять управление планом лечения. Создана принципиально новая модель интеллектуальной поддержки принятия врачебных решений, интегрирующая возможности спектроскопии биоимпеданса, СНС и экспертного оценивания. Следует отметить, что современные данные, подтверждающие возможность разделения доброкачественных и злокачественных

опухолей МЖ с помощью методов биоимпедансометрии, весьма ограничены. Необходимы дальнейшие исследования этого вопроса, чтобы в полной мере использовать методы, основанные на биоимпедансном анализе, для выявления рака МЖ, особенно для дифференциальной диагностики рака МЖ. Если это удастся, можно ожидать сокращения числа доброкачественных биопсий.

Список литературы

1. Алиева Г. С., Корженкова Г. П., Колядина И. В. Анализ ключевых рентгенологических характеристик раннего инвазивного рака молочной железы стадий T_{1a}-bN₀M₀ и DCIS // Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2021. Т. 4, № 1. С. 9–19. <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2021-4-1-9-19>
2. Объективизация топографо-анатомических показателей злокачественной опухоли молочной железы при ультразвуковом исследовании / А. Р. Хамитов, А. Х. Исмагилов, Н. А. Савельева, И. А. Киясов // Поволжский онкологический вестник. 2017. Т. 1, № 28. С. 59–64.
3. Zou Y., Guo Z. A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection // Medical Engineering & Physics. 2003. Vol. 25, N 2. P. 79–90. [https://doi.org/10.1016/s1350-4533\(02\)00194-7](https://doi.org/10.1016/s1350-4533(02)00194-7)
4. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 356 с.
5. Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний / О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, И. А. Башмакова, А. В. Лях, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 148–174. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>
6. Биомедицинская спектроскопия в классификаторах функционального состояния органов и систем человека, построенных на основе гибридных технологий искусственного интеллекта / О. В. Шаталова, А. В. Серебровский, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Лях // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2023. Т. 22, № 2. С. 100–113. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.2.015>

7. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4. С. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
8. An Automatic Detection of Breast Cancer Diagnosis and Prognosis Based on Machine Learning Using Ensemble of Classifiers / U. Naseem, J. Rashid, L. Ali, J. Kim, Q. E. Ul Haq, M. J. Awan, M. Imran // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 78242–78252.
9. Филист С. А., Емельянов С. Г., Рыбочкин А. Ф. Нейросетевой решающий модуль для исследования живых систем // Известия Курского государственного технического университета. 2008. № 2 (23). С. 77–82.
10. A method for creating fuzzy neural-network models using the MATLAB package for biomedical applications / V. V. Zhilin, S. A. Filist, Kh. A. Rakhim, O. V. Shatalova // Bio-medical Engineering. 2008. N 42 (2). P. 64–66. <https://doi.org/10.1007/s10527-008-9019-y>
11. Филист С. А., Кассим К. Д. А., Руцкой Р. В. Гибридные решающие системы для прогнозирования послеоперационных осложнений у больных с доброкачественной гиперплазией предстательной железы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 40–49.
12. Гибридные интеллектуальные модели для сегментации изображений рентгенограмм грудной клетки / С. А. Филист, Р. А. Томакова, С. В. Дегтярев, А. Ф. Рыбочкин // Медицинская техника. 2017. № 5 (305). С. 41–45.
13. Филист С. А., Томакова Р. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 43–50.
14. Мультимодальный классификатор риска рака молочной железы на основе анализа импеданса биоматериала / А. В. Серебровский, О. В. Шаталова, А. В. Лях, И. А. Халин, И. А. Башмакова, З. У. Протасова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. № 14 (2). С. 142–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-142-159>
15. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.

16. Филист С. А., Шаталова О. В., Богданов А. С. Модели биоимпеданса при нелинейной вольтамперной характеристике и обратимом пробое диэлектрической составляющей биоматериала // Бюллетень сибирской медицины. 2014. Т. 13, № 4. С. 129–135.

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

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

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

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

21. Суржикова С. Е., Шаталова О. В., Федянин В. В. Программно-аппаратный комплекс диагностики социально значимых заболеваний // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 2 (15). С. 79–87.

22. Суржикова С. Е., Шаталова О. В., Федянин В. В. Программно-аппаратный комплекс для анализа вольтамперных характеристик биоактивных точек на основе модуля L-CARD E20-10 / С.Е. Суржикова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 2 (30). С. 150–161.

23. Мультимодальный классификатор риска кардиореспираторных заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний и эффекта синергии / Е. В. Петрунина, О. В. Шаталова, Хайдер А. Х. Алавси, В. В. Песок, А. А. Кузьмин, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 81–105. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-81-105>

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

25. Структурно-функциональная модель для мониторинга влияния управляющих воздействий на функциональное состояние самоорганизующихся систем / П. С. Кудрявцев, А. Н. Шуткин, В. В. Протасова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 2 (30). С. 105–118.

References

1. Alieva G.S., Korzhenkova G.P., Kolyadina I.V. Analysis of key radiological characteristics of early invasive breast cancer stages T1a-bN0M0 and DCIS. *Onkologicheskii zhurnal: luchelevaya diagnostika, luchelevaya terapiya = Oncological Journal: Radiodiagnosis, Radiotherapy*. 2021;4(1):9–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2021-4-1-9-19>
2. Khamitov A.R., Ismagilov A.Kh., Savel'eva N.A., Kiyasov I.A. Objectification of topographic-anatomical indicators of malignant breast tumors in ultrasound examination. *Povolzhskii onkologicheskii vestnik = Volga Oncology Bulletin*. 2017;1(28):59–64. (In Russ.)
3. Zou Y., Guo Z. A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection. *Medical Engineering & Physics*. 2003;25(2):79–90. [https://doi.org/10.1016/s1350-4533\(02\)00194-7](https://doi.org/10.1016/s1350-4533(02)00194-7)
4. Shatalova O.V. Intelligent systems for monitoring medical risks considering bioimpedance studies. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 356 p. (In Russ.)
5. Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Efremov M.A., Bashmakova I.A., Lyakh A.V., Serebrovsky A.V. Technologies of bioimpedance spectroscopy in decision support systems for the diagnosis of socially significant diseases. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(4):148–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>
6. Shatalova O.V., Serebrovsky A.V., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Yu., Lyakh A.V. Biomedical spectroscopy in classifiers of the functional state of human organs and systems based on hybrid artificial intelligence technologies. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Control in Biomedical Systems*. 2023;22(2):100–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.2.015>
7. Miroshnikov A.V., Stadnichenko N.S., Shatalova O.V., Filist S.A. Impedance models of biomaterials for forming descriptors in intelligent systems for diagnosing infectious diseases. *Modelirovanie, optimiza-tsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2020;8(4):1–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
8. Naseem U., Rashid J., Ali L., Kim J., Ul Haq Q.E., Awan M.J., Imran M. An Automatic Detection of Breast Cancer Diagnosis and Prognosis Based on Machine Learning Using Ensemble of Classifiers. *IEEE Access*. 2022;10: 78242–78252.

9. Filist S.A., Emelyanov S.G., Rybochkin A.F. Neural network decision module for studying living systems. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*. 2008;2(23):77–82. (In Russ.)
10. Zhilin V.V., Filist S.A., Rakhim Kh.A., Shatalova O.V. A method for creating fuzzy neural-network models using the MATLAB package for biomedical applications. *Biomedical Engineering*. 2008;42(2):64–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s10527-008-9019-y>
11. Filist S.A., Kassim K.D.A., Rutskiy R.V. Hybrid decision systems for predicting post-operative complications in patients with benign prostatic hyperplasia. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2013;5(50):40–49. (In Russ.)
12. Filist S.A., Tomakova R.A., Degtyarev S.V., Rybochkin A.F. Hybrid intelligent models for segmenting chest X-ray images. *Meditinskaya tekhnika = Medical Technology*. 2017;5(305):41–45. (In Russ.)
13. Filist S.A., Tomakova R.A., Naser A.A. Fuzzy neural network technologies for segmenting pathological formations and morphological structures in medical images. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*. 2012;(4):43–50. (In Russ.)
14. Serebrovsky A.V., Shatalova O.V., Lyakh A.V., Khalin I.A., Bashmakova I.A., Protasova Z.U. Multimodal classifier for breast cancer risk based on the analysis of biomaterial impedance. *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):142–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-142-159>
15. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Shulga L.V. Classifications 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.)
16. Filist S.A., Shatalova O.V., Bogdanov A.S. Bioimpedance models in nonlinear volt-ammeter characteristics and reversible breakdown of the dielectric component of biomaterial. *Byulleten' sibirskoi meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*. 2014;13(4):129–135. (In Russ.)
17. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Efremov M.A., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Yu., Pavlenko A.V. 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.) [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75)

18. Kurachkin A.G., Zhilin V.V., Surzhikova S.A., Filist S.A. Using hybrid neural network models for multi-agent classification systems in heterogeneous spaces of informative features. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2015;3(31):85–95. (In Russ.)

19. Kurachkin A.G., Protasova V.V., Filist S.A., Shutkin A.N. Neural network models for meta-analysis of medical and environmental data. *Neirokomp'yutery. Razrabotka, primeneniye = Neurocomputers. Development and Application*. 2015;(6):42–48. (In Russ.)

20. Filist S.A., Shatalova O.V., Efremov M.A. Hybrid neural network with macro layers for medical applications. *Neirokomp'yutery. Razrabotka i primeneniye = Neurocomputers. Development and Application*. 2014;(6):35–39. (In Russ.)

21. Surzhikova S.E., Shatalova O.V., Fedyanin V.V. Software and hardware complex for diagnosing socially significant diseases. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2015;2(15):79–87. (In Russ.)

22. Surzhikova S.E., Shatalova O.V., Fedyanin V.V. Software and hardware complex for analyzing voltammetric characteristics of bioactive points based on the L-CARD E20-10 module. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2015;2(30):150–161. (In Russ.)

23. Petrunina E.V., Shatalova O.V., Alavsi Haider A.H., Pesok V.V., Kuzmin A.A., Shulga L.V. Multimodal classifier of cardiorespiratory risk taking into account comorbidities and synergy effect. *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):81–105. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2024-14-2-81-105](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-81-105)

24. Petrova T.V., Kuzmin A.A., Savinov D.Yu., Serebrovsky V.V. Distributed autonomous intelligent agents for monitoring and meta-analysis of the effectiveness of managing living systems. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2017;40(4):61–73. (In Russ.)

25. Kudryavtsev P.S., Shutkin A.N., Protasova V.V., Filist S.A. Structural-functional model for monitoring the influence of control actions on the functional state of self-organizing systems. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2015;(2):105–118. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Серебровский Андрей Вадимович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

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

Корсунский Никита Александрович, аспирант, 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, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: cor.nick2013@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-4606-5517

Лях Антон Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-6217-2840

Anton V. Lyakh, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-6217-2840

Мишустин Владимир Николаевич, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры хирургических болезней, Институт непрерывного образования, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladimirshf2011@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4104-5681

Vladimir N. Mishustin, Doctor of Sciences (Medical), Associate Professor, Professor of the Department of Surgical Diseases, Institute of Continuous Education, Kursk State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladimirshf2011@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4104-5681

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Olga V. Shatalova, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

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

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

Методы навигации по данным аэроландшафта для малых БЛА

А. П. Мирошниченко¹ , И. Е. Мухин¹

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

 e-mail: alexnofoget@gmail.com

Резюме

Цель исследования. БПЛА получили широкое распространение в таких сферах деятельности, как военная, разведывательная, исследовательская. Как следствие, остро стоит вопрос их применения в условиях радиоэлектронной борьбы, наличия различных помех как техногенного характера, так и естественного. Таким образом, возрастает необходимость навигации БПЛА по визуальным данным.

Цель – исследование основных негативных факторов, влияющих на качество изображений аэрофотосъемки, и методов их устранения для построения корректного ортофотоплана для визуальной навигации БПЛА.

Методы. Предложены математические методы для устранения негативных искажений на снимках камеры БПЛА с помощью различных подходов трансформации изображений. После применения этих методов к исходным изображениям получают исправленные версии, используемые для построения тайлового покрытия. Тайловое покрытие, созданное на основе обработанных снимков, обеспечивает непрерывное и единое покрытие территории, собранное во время полета БПЛА. Это позволяет получать точные координаты снимков и объектов на них.

Результаты – анализ основных методов устранения негативных факторов, искажающих изображения при аэрофотосъемке для визуальной навигации БПЛА, а также краткий обзор самих методов визуальной навигации.

Заключение. Для успешной реализации визуальной навигации БПЛА необходимо применить ряд методов по преобразованию изображений аэрофотосъемки, а также применение определенных алгоритмов для визуальной навигации. Сделан вывод, что помимо применения математических и программных алгоритмов также потребуется анализ и исследование необходимых вычислительных мощностей для применения всего аппаратно-программного комплекса на борту БПЛА с учетом его массогабаритных свойств.

Ключевые слова: ортофотоплан; тайловое покрытие; БПЛА; БЛА; малые БЛА; навигация БПЛА; визуальная навигация БПЛА; дисторсия; коррекция изображений; перспективные искажения; проективные искажения; ориентация по сторонам света; проективная трансформация.

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

Для цитирования: Мирошниченко А. П., Мухин И. Е. Методы навигации по данным аэроландшафта для малых БЛА // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 3. С. 144–156. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-144-156>

Поступила в редакцию 10.07.2024

Подписана в печать 08.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Navigation methods using airlandscape data for small UAVs

Aleksey P. Miroshnichenko¹ ✉, Ivan E. Mukhin¹

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

✉ e-mail: alexnofoget@gmail.com

Abstract

The purpose of the research. UAVs are widely used in such fields as military, intelligence, and research. As a result, the issue of their use in electronic warfare conditions and the presence of various interference, both man-made and natural, is acute. Thus, the need for UAV navigation using visual data increases.

The purpose is study of the main negative factors affecting the quality of aerial photography images and methods for eliminating them to construct a correct orthomosaic for UAV visual navigation.

Methods. Mathematical methods are proposed to eliminate negative distortions in UAV camera images using various image transformation approaches. After applying these methods to the original images, corrected versions are obtained, which are used to construct the tile covering. Tiled coverage created from processed images provides continuous and uniform coverage of the area collected during the UAV's flight. This allows you to obtain exact coordinates of images and objects on them.

Results. An analysis of the main methods for eliminating negative factors that distort images during aerial photography for the visual navigation of UAVs, as well as a brief overview of the visual navigation methods themselves.

Conclusion. To successfully implement visual navigation of a UAV, it is necessary to apply a number of methods for converting aerial photography images, as well as the use of certain algorithms for visual navigation. It is concluded that in addition to the use of mathematical and software algorithms, it will also be necessary to analyze and study the necessary computing power for the use of the entire hardware and software complex on board the UAV, taking into account its weight-dimensional properties.

Keywords: orthomosaic; tile covering; UAV; small UAV; UAV navigation; UAV visual navigation; distortion; image correction; perspective distortion; projective distortion; orientation to cardinal directions; projective transformation.

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

For citation: Miroshnichenko A.P., Mukhin I.E. Navigation methods using airlandscape data for small UAVs. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2024;14(3):144–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-144-156>

Received 10.07.2024

Accepted 08.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Визуальная навигация на малых беспилотных летательных аппаратах (БЛА) является одним из наиболее эффективных способов навигации в условиях, когда использование GPS-навигации невозможно или затруднено. Основным методом такой навигации является метод получения снимков с борта БЛА с определенной дискретностью во времени и цифровая обработка на борту с целью получения текущих координат. Рассмотрим ряд основных проблем, а также необходимые и достаточные условия для осуществления визуальной навигации в условиях ограничений на массогабаритные характеристики и вычислительную мощность на борту.

Одной из основных проблем навигации малых БЛА по визуальным данным является наличие оптической дисторсии, которая возникает как искажение изображения (абберации), вызванное несовершенствами оптической системы, такими как искривление линий и форм, изменение размеров объектов или дисторсия цвета. Это может происходить при использовании объективов с низким качеством оптики или при работе с широкоугольными объективами. Оптическая дисторсия может быть исправлена с помощью специальных программных инструментов или при помощи корректирующих элементов в оптической системе.

Также при крене и тангаже малого БЛА возникают перспективные искажения, которые происходят, когда плоскость изображения и плоскость предмета не параллельны между собой [1], т. е. изменения размеров и форм объектов на изображении в зависимости от их

расположения в пространстве и расстояния до камеры. Например, объекты, находящиеся ближе к камере, будут выглядеть больше, чем объекты, находящиеся дальше. Это может привести к искажению формы объектов или к искажению пропорций на изображении. Для исправления подобных искажений используются специальные алгоритмы, которые могут быть ресурсоемкими и требовать высокой вычислительной мощности.

Для эффективной навигации малых БЛА по визуальным данным необходимо иметь информацию о своей ориентации по сторонам света. Для решения этой проблемы нужно иметь доступ к данным о начальных координатах, азимуте полета, можно использовать дополнительные сенсоры, такие как гироскопы, акселерометры или электронный компас. Ориентироваться по сторонам света может помочь наличие алгоритмов сопоставления аэрофотоплана с камеры БЛА и предварительно загруженной спутниковой карты местности.

Материалы и методы

Проективная трансформация изображений – это математический процесс, при котором изображение преобразуется в другое изображение с помощью матрицы преобразования. Это преобразование может быть использовано для изменения размера, поворота, перспективы или искажения изображения. Проективная трансформация может быть использована для совмещения двух изображений, создания панорамных изображений или для коррекции искажений в изображении, вызванных перспективой при фототрафировании объектов на расстоянии.

Проективная трансформация может быть выполнена с помощью различных алгоритмов, таких как аффинное преобразование, гомографическое преобразование или метод RANSAC. Она широко используется в обработке изображений, компьютерном зрении, робототехнике и других областях, где требуется обработка изображений и визуальный анализ.

Далее подробнее рассмотрим перечисленные проблемы и возможные методы их решения

Дисторсия камеры является распространенной проблемой в области машинного зрения, особенно при использовании широкоугольных объективов. Дисторсия может быть вызвана различными факторами, такими как неточности в оптической системе камеры, а также искажениями изображения, происходящими при процессе его захвата. Борьба с дисторсией камеры для машинного зрения обычно включает в себя несколько методов:

1. *Калибровка камеры.* Это процесс определения параметров дисторсии камеры и их компенсации [2]. Обычно это включает в себя использование калибровочной сцены [3] или шаблона с известными геометрическими характеристиками для определения параметров дисторсии [4]. Методом коррекции может являться калибровка камеры с помощью так называемой Zhang's Camera Calibration Algorithm [5], где в качестве основного шаблона используется шахматная доска. Аналогичный подход используется для автоматической калибровки камер с помощью калибровочного стенда со светоотражающими метками [6].

2. *Использование методов компенсации суммарной дисторсии* [7]. После

того как параметры дисторсии камеры определены, можно использовать различные методы для компенсации этой дисторсии. Это может включать в себя применение математических моделей, таких как модель дисторсии «радиальный дисторсионный коэффициент» или «тангенциальный дисторсионный коэффициент» [8], для исправления искажений в изображении.

3. *Использование специализированных алгоритмов обработки изображений.* Существуют различные алгоритмы обработки изображений, которые могут помочь в уменьшении влияния дисторсии камеры на изображение. Это может включать в себя методы интерполяции, рассчитанные специально для устранения дисторсии [9].

4. *Использование корректирующего оборудования.* В некоторых случаях можно использовать специализированное оборудование, такое как оптические фильтры или линзы, для уменьшения дисторсии камеры непосредственно на уровне аппаратного обеспечения.

5. *Обучение нейронных сетей на компенсацию дисторсии.* Нейронные сети могут быть обучены для автоматической компенсации дисторсии камеры на этапе обработки изображений. Это может быть особенно полезно в случаях, когда форма дисторсии сложна или изменчива [10].

Калибровка камеры – это процесс определения внутренних и внешних параметров камеры, таких как фокусное расстояние, коэффициенты дисторсии и матрица камеры.

Метод Zhang's Camera Calibration [5] основан на использовании калибровочной доски, на которой располагаются

известные маркеры (обычно шахматная доска). Пусть (X, Y, Z) – координаты точек на калибровочной доске в мировой системе координат, а (u, v) – соответствующие координаты на изображении в пикселях. Тогда внутренние параметры камеры могут быть выражены следующим образом.

Модель проекции камеры описывается так:

$$\begin{bmatrix} x_{уд} \\ y_{уд} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \end{bmatrix},$$

где $(x_{уд}, y_{уд})$ – скорректированные координаты после дисторсии; (x, y) – исходные координаты на изображении $r^2 = x^2 + y^2$, а k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 – коэффициенты дисторсии.

Далее, используя скорректированные координаты, возможно произвести трансформацию изображения для устранения искажений и получить изображение с исправленной дисторсией на борту БЛА

Рассмотрим корректировку перспективных искажений, возникающих при крене и тангаже малых БЛА.

Перспективные искажения в изображениях аэрофотоландшафтов возникают в случае, когда камера на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) направлена не над поверхностью, а под некоторым углом к ней. Для коррекции таких искажений применяется методика, включающая использование виртуальной камеры, которая позиционируется с учетом требований аэрофотосъемки.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13}t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23}t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33}t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

где (f_x, f_y) – фокусные расстояния камеры по осям x и y соответственно; (c_x, c_y) – оптический центр камеры; (r_{ij}) – элементы матрицы вращения, а (t_x, t_y, t_z) – вектор трансляции камеры.

Модель дисторсии, которая учитывает искажения, вызванные оптическими элементами камеры, описывается следующим образом:

В представленном подходе изображение получается с реальной камеры, после чего необходимо определить элементы матрицы трансформации, которая позволит трансформировать изображение с реальной камеры в изображение, которое могло бы быть получено виртуальной камерой (рис. 1).

В статье [11] рассматривается более сложный случай, учитывающий крен, тангаж, угол скольжения БПЛА, различную ориентацию камеры относительно БПЛА, а также наклон поверхности аэроландшафта. В реализованном алгоритме сделаны некоторые упрощения: направление камеры строго вниз относительно корпуса БПЛА, верхний край изображения выровнен с направлением полета БПЛА, и поверхность аэрофотоландшафта считается строго горизонтальной. Эти упрощения сделаны из-за их отсутствия в исходных данных, но при необходимости их можно учесть.

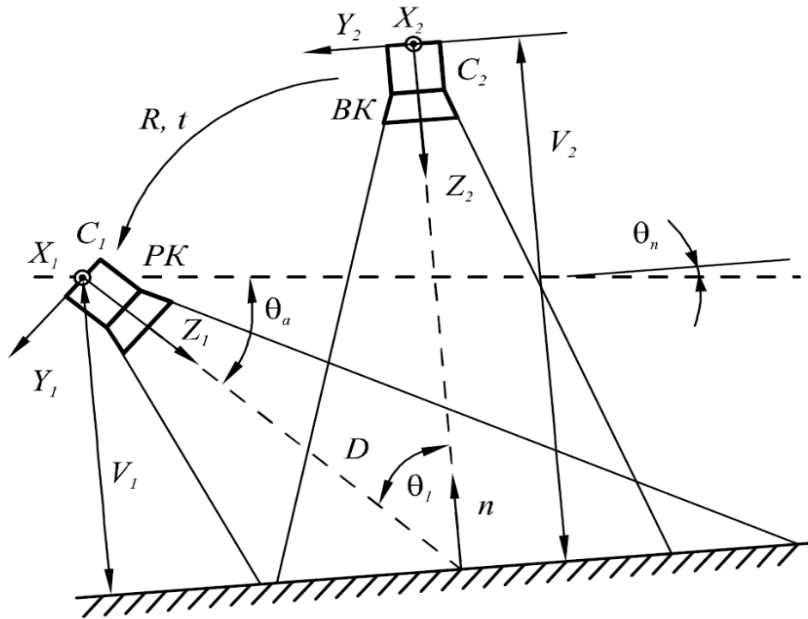


Рис. 1. Взаимное расположение реальной и виртуальной камер [5]

Fig. 1. Mutual arrangement of real and virtual cameras [5]

Пусть высота БПЛА составляет H , а углы крена, тангажа и рыскания обозначаются как a_x , a_z и a_y соответственно. Угол рыскания может использоваться для ориентации изображения по сторонам света. Размеры изображения W и H , а фокусное расстояние объектива камеры – f .

Необходимо определить элементы матрицы трансформации M_{pr} , которая исправляет перспективные искажения и ориентирует камеру по сторонам света.

Виртуальная камера размещается на высоте H_v , равной расстоянию от реальной фотокамеры до центра полученного изображения вдоль наклонного луча визирования (примем $Z_1 = Z_2$). Высота H_v вычисляется по формуле

$$H_v = \frac{H}{\cos a_x \cdot \cos a_z}$$

Матрица внутренних параметров виртуальной камеры будет иметь те же параметры, что и реальная камера:

$$M_v = \begin{pmatrix} \frac{H_v}{f} & 1 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{H_v}{f} & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Кватернион поворота оптической оси камеры вычисляется по формуле

$$q = \sin \frac{a_z}{2} \cdot \cos \frac{a_x}{2}, \cos \frac{a_z}{2} \cdot \cos \frac{a_x}{2} + i, \\ \cos \frac{a_z}{2} \cdot \sin \frac{a_x}{2} + j, \sin \frac{a_z}{2} \cdot \sin \frac{a_x}{2} + k.$$

В соответствии с формулами для параметров Родрига – Гамильтона от элементов кватерниона можно перейти к матрице поворота:

$$R = \begin{pmatrix} 1 - 2q_j^2 - 2q_k^2 & 2(q_i \cdot q_j - q \cdot q_k) & 2(q_i \cdot q_k + q \cdot q_j) \\ 2(q_i \cdot q_j + q \cdot q_k) & 1 - 2q_i^2 - 2q_k^2 & 2(q_j \cdot q_k - q \cdot q_i) \\ 2(q_i \cdot q_k - q \cdot q_j) & 2(q_i \cdot q_k + q \cdot q_i) & 1 - 2q_i^2 - 2q_j^2 \end{pmatrix}$$

Координаты точки начала системы координат реальной камеры в системе координат виртуальной камеры будут

$$C_1 = (0, H \tan t_1, H_{vk} - H)^T,$$

где

$$t_1 = \arctan 2(q \cdot q_i - q_j \cdot q_k, q^2 + q_j^2 - 0,5).$$

По оцененным R и C_1 вычисляется вектор трансляции:

$$T = -R \cdot C_1.$$

Так как в допущениях принято, что наблюдаемая поверхность горизонтальна, то вектор нормали к ней примем $n = (0, 0, -1)^T$. Тогда искомая матрица пример вид

$$M_{pr} = M_v \cdot \left(R - \frac{T^T \cdot n}{H_v} \right) \cdot M_v^{-1}.$$

Полученная матрица M_{pr} предназначена для исправления перспективных искажений.

Ориентация изображения по сторонам света по углу рыскания является процессом определения ориентации изображения, полученного с камеры на (БПЛА), относительно географических направлений (север, юг, восток, запад) с использованием информации об угле рыскания (yaw angle) аппарата.

Угол рыскания определяет направление, в котором БПЛА направлен относительно горизонтальной плоскости и, следовательно, в каком направлении направлен его нос.

В общем случае устанавливается нормальная система координат $OX_g Y_g Z_g$, причем ее начало совпадает с центром масс беспилотного

летательного аппарата. Ось OX_g направлена вверх, соответствуя местной вертикали, а плоскость $OY_g Z_g$ формирует местную горизонтальную плоскость, проходящую через точку O перпендикулярно оси OY_g . Оси OY_g и OZ_g параллельны осям $O_0 X_g$ и $O_0 Z_g$ нормальной земной системы координат, образуя правую прямоугольную систему координат вместе с осью OY_g .

Тогда угол рыскания φ – угол между осью OX_g нормальной системы координат и проекцией продольной оси OX связанной системы координат на горизонтальную плоскость $OX_g Z_g$ нормальной системы координат [12].

Поворот изображения выполняется с помощью евклидовых преобразований уже после исправления искажения от дисторсии камеры и перспективных искажений, когда требуются лишь преобразования сдвига и поворота. Математически расчеты в векторно-матричной форме выглядят так [13]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

с матрицей поворота на угол φ вида

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

и вектором сдвига $t = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$

Уравнение можно преобразовать для однородной системы координат в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & t_x \\ \sin \varphi & \cos \varphi & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Далее, например, можно рассчитать координаты точки вращения с помощью транслятора сдвига:

$$t_x = -x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi + x,$$

$$t_y = -x \cdot \sin \varphi - y \cdot \cos \varphi + y.$$

Проективные преобразования изображений – это математические операции, которые изменяют форму и расположение объектов на изображении, сохраняя при этом их относительные пропорции и геометрические свойства. С геометрической точки зрения проективное преобразование – это обратимое преобразование проективной плоскости (или пространства), которое переводит прямые в прямые без сохранения параллельности линий [14].

Таблица 1. Типы аффинных преобразований

Table 1. Types of affine transformations

Тип	Матрица T
Растяжение	$\begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Поворот	$\begin{pmatrix} \cos(a) & \sin(a) & 0 \\ -\sin(a) & \cos(a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Перенос	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & S_x \\ 0 & 1 & S_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

В общем случае проективные преобразования можно представить в виде

$$\begin{pmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ w \end{pmatrix}$$

При представлении в обычных координатах, что соотношение (выше) будет иметь нелинейный вид, связанный с перенормировкой:

Проективные преобразования часто представляются с помощью проективных матриц, которые определяют, как точки из одной системы координат переходят в другую систему координат. Эти матрицы могут быть определены на основе известных соответствий точек на исходном и преобразованном изображениях.

В качестве проективных преобразований можно использовать аффинные и евклидовы преобразования [14], т. к. в аналитической геометрии аффинная группа является подгруппой общей линейной (проективной) группы, а евклидова группа – частным случаем аффинной группы преобразований (табл. 1).

$$x' = \frac{t_{11}x + t_{12}y + t_{13}}{t_{31}x + t_{32}y + t_{33}},$$

$$y' = \frac{t_{21}x + t_{22}y + t_{23}}{t_{31}x + t_{32}y + t_{33}}.$$

Проективные преобразования применяются, если изображение аэроландшафта с перспективными искажениями нужно привести к плановому.

Перенос изображения в мировой системе координат для сшивки изображений

является финальным шагом для алгоритма навигации малого БЛА.

Результаты и их обсуждение

В результате исследования установлены основные искажения, характерные для съемки с борта БПЛА с использованием цифровой камеры. Использование вышеописанных методов позволяет преобразовать изображения и сшить их в единое пространство, затем построить тайловое покрытие, которое можно привязать к мировой системе координат для дальнейшей навигации БЛА. Результат построения подобного тайлового покрытия обычно называется ортофотопланом, который позволяет осуществить геопривязку изображений с сантиметровой точностью [15].

Тайловое покрытие (Tile-Based Mapping) – это метод разбиения большой

области или изображения на более мелкие участки, называемые тайлами, которые затем могут быть использованы для создания общей карты или изображения [16]. Этот метод часто используется для создания больших карт, изображений высокого разрешения или текстурных покрытий для построения ортофотоплана [17].

Тайлы выстраиваются рядом друг с другом, создавая впечатление единого изображения. Каждый тайл имеет размер, например, 256×256 пикселей. Тайлы располагаются бок о бок, образуя единое поле (рис. 2). Каждый тайл имеет свои координаты расположения. На сегодняшний день нет универсальной системы координат для тайлов. Различные геоинформационные сервисы используют наиболее удобные схемы расположения тайлов в своих алгоритмах [18].

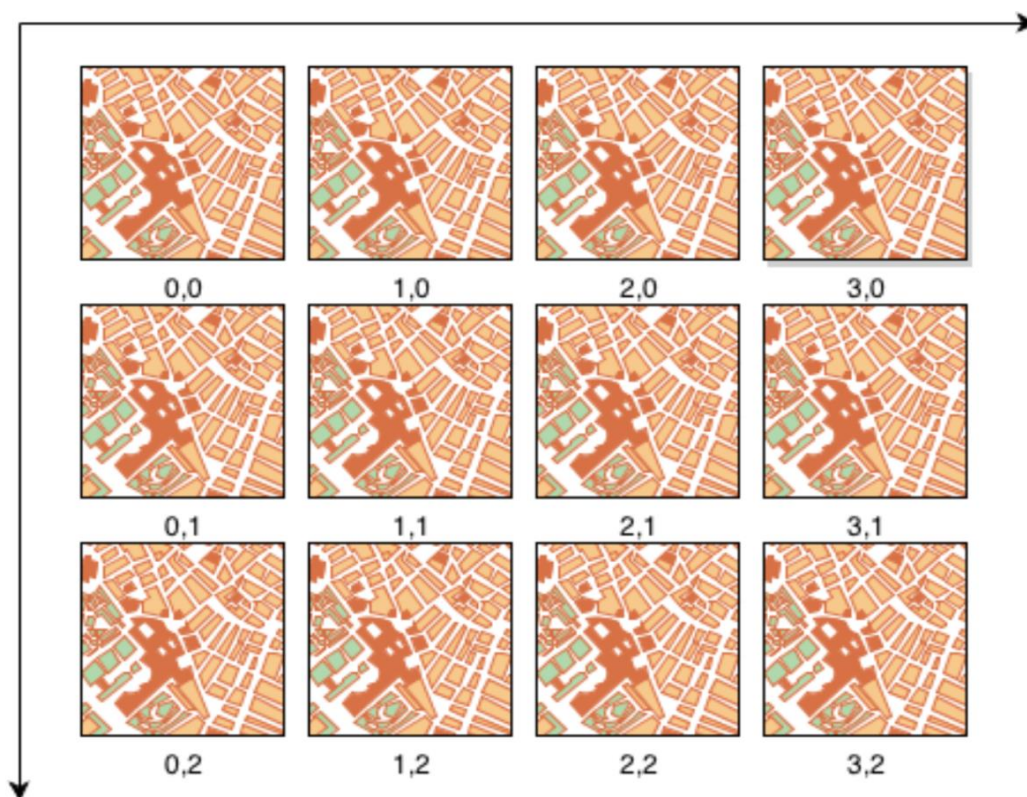


Рис. 2. Схема нумерации тайлов

Fig. 2. Tile numbering scheme

Левый верхний тайл имеет координаты (0, 0). Напомним, что в изображениях оси направлены: ось x – вправо, а y – вниз. Тогда координаты пиксел внутри тайлового покрытия и внутри ортофотоплана будут связаны следующими соотношениями:

$$t_p = 256T + t_T.$$

Это позволяет легко вычислять пиксельные координаты ортофотоплана по координатам тайла T и координатам пиксела внутри тайла t_T и наоборот:

$$T = \text{round} \frac{t_p}{256},$$

$$t_T = t_p - 256T,$$

где round – функция округления до целого в меньшую сторону.

Очевидно, что если системы координат ортофотоплана и тайлового покрытия совпадают, то вычисление географических координат по тайловому покрытию можно производить с той же матрицей перехода M_g .

Далее, имея либо стартовые координаты полета, например координаты первого тайла, привязанные к мировой системе координат, либо с помощью алгоритмов сопоставления заранее загруженных изображений с известными координатами опорных точек, можно определить координаты каждого отдельного тайла или объекта на нем [19].

Выводы

Для реализации предложенных математических методов необходимы серьезные вычислительные мощности.

Обработка каждого изображения, которая осуществляется попиксельно, требует значительных вычислительных ресурсов, особенно если необходима трансформация в реальном времени в процессе движения БПЛА. Так скорость малого аппарата может варьироваться в пределах от 80 км/ч до 300 км/ч в среднем. В зависимости от высоты полета обработку каждого снимка аэрофотосъемки нужно осуществлять в достаточно короткие промежутки времени для построения качественного тайлового покрытия. Кроме того, каждый негативный фактор требует отдельного алгоритма и обработки изображения, что также усложняет вычисления.

Успешная навигация по данным аэрофотосъемки и получение точных координат снимков требуют предварительной обработки изображений с использованием математических методов, построение тайлового покрытия, а также значительных вычислительных ресурсов для обеспечения точности и эффективности навигации. Вследствие того, что малые БЛА сильно ограничены по массе полезного груза из-за своих массогабаритных характеристик, требуются дальнейшие исследования для поиска и подбора соответствующей вычислительной техники и оптимизации производительности описанных выше методов и алгоритмов под вычислительные мощности данной техники.

Список литературы

1. Степанов Д. Н. Математические модели получения стереоизображений с двухзеркальных катадиоптрических систем с учётом дисторсии объективов // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 1. С. 105–114.
2. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2014. № 2. С. 71–80.
3. Zhang Yu-Jin. Camera Calibration // 3-D Computer Vision. Springer, 2023. P. 37–65.
4. Ramalingam S., Sturm P. A Unifying Model for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. Vol. 39, is. 7. P. 1309–1319.
5. Camera calibration using multiple unordered coplanar chessboards / L. Grammatikopoulos, K. Adam, E. Petsa, G. Karras // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Strasbourg, France, 2019. Vol. XLII-2/W18. P. 59–66.
6. Автоматическая калибровка системы видеокамер и лидаров для автономных мобильных комплексов / Ю. Б. Блохинов, Е. Э. Андриенко, К. К. Казахмедов, Б. В. Вишняков // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 3. С. 382–393.
7. Жимбуева Л. Д., Дамдинова Т. Ц. Исследование факторов, влияющих на дисторсию оптических систем цифровых камер // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2015. Т. 53, № 2. С. 38–42.
8. Глаголев В. М. Описание и программное устранение дисторсии объективов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 9, ч. 2. С. 188–194.
9. Холопов И. С. Алгоритм упрощенной компенсации дисторсии при проецировании видеоизображения на асферические отображающие поверхности априорно неизвестной формы // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 3. С. 57–61.
10. Rong J., Huang S., Shang Z., Ying X. Radial Lens Distortion Correction Using Convolutional Neural Networks Trained with Synthesized Images // Computer Vision – ACCV. 13th Asian Conference on Computer Vision, Taipei, Taiwan, November 20–24. Springer, 2016. P. 35–49.
11. Холопов И. С. Алгоритм коррекции проективных искажений при маловысотной съёмке // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 2. С. 284–290.
12. Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А. Управление угловым положением летательного аппарата // Автометрия. 2015. Т. 51, № 5. С. 35–41.
13. Алпатов Б. А., Ершов М. Д., Фельдман А. Б. Алгоритм обработки изображений для системы комбинированного видения летательного аппарата // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 8–14.
14. Белов Ю. С., Рыбкин С. В. Математические модели геометрических преобразований изображений в задаче анализа видеопоследовательностей // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2015. № 3. С. 15–24.
15. Захлебин А. С. Методика построения ортофотопланов местности с помощью беспилотного квадрокоптера, оснащенного навигационным геодезическим приемником // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Т. 24, № 3. С. 44–49.

16. An accurate real-time uav mapping solution for the generation of orthomosaics and surface models / A. Kern, P. Fanta-Jende, P. Glira, F. Bruckmüller, C. Sulzbachner // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Strasburg, France, 2021. Vol. XLIII-B1. P. 165–171.
17. Tanathong S., Smith A. P., Remde S. SurfaceView: Seamless and Tile-Based Orthomosaics Using Millions of Street-Level Images From Vehicle-Mounted Cameras // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022. Vol. 23, is. 4. P. 3482–3497.
18. Gómez-Candón D., De Castro A. I., Lopez-Granados F. The accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat // Precision Agriculture. 2014. Vol. 15. P. 44–56.
19. Pagliari D., Pinto L., Sona G. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images // Earth. Sci. Inform. 2014. Vol. 7. P. 97–107.

References

1. Stepanov D.N. Mathematical models for obtaining stereo images from two-mirror catadioptric systems taking into account lens distortion. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2019;43(1):105–114. (In Russ.)
2. Nikitin V.N., Semencov A.V. Calibration of cameras based on images of a flat test object. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos'emka = Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*. 2014;(2):71–80. (In Russ.)
3. Zhang Yu-Jin. Camera Calibration. In: 3-D Computer Vision. Springer; 2023. P. 37–65.
4. Ramalingam S., Sturm P.A Unifying Model for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017;39(7):1309–1319.
5. Grammatikopoulos L., Adam K., Petsa E., Karras G. Camera calibration using multiple unordered coplanar chessboards. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Optical 3D Metrology. Vol. XLII-2/W18. Strasbourg, France; 2019. P. 59–66.
6. Blokhinov Yu.B., Andrienko E.E., Kazakhmedov K.K., Vishnyakov B.V. Automatic calibration of video camera and lidar systems for autonomous mobile systems. *Computernaya Optika = Computer Optics*. 2021;45(3):382–393. (In Russ.)
7. Zhimbueva L.D., Damdinova T.C. Issledovanie faktorov, vliyayushchih na distorsiyu opticheskikh sistem cifrovyyh kamer. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya = Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management*. 2015;53(2):38–42. (In Russ.)
8. Glagolev V.M. Description and software correction of lens distortion. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings Tula State University. Technical Sciences*. 2017; (9–4):188–194. (In Russ.)
9. Kholopov I.S. Simplified distortion compensation algorithm for projecting video on priori unknown form aspherical reflective surfaces. *Cifrovaya Obrabotka Signalov = Digital Signal Processing*. 2014;(3): 57–61. (In Russ.)
10. Rong J., Huang S., Shang Z., Ying X. Radial Lens Distortion Correction Using Convolutional Neural Networks Trained with Synthesized Images. In: *Computer Vision. ACCV*:

13th Asian Conference on Computer Vision, Taipei, Taiwan, 20–24 November 2016. Springer; 2016. P. 35–49.

11. Kholopov I.S. Algorithm for correcting projective distortions during low-altitude photography. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2017;41(2):284–290. (In Russ.)

12. Zolotukhin Yu.N., Nesterov A.A. Control of the angular position of an aircraft. *Avtometriya = Autometry*. 2015;51(5):35–41. (In Russ.)

13. Alpatov B.A., Ershov M.D., Feldman A.B. Image processing algorithm for combined vision system of aircraft. *Cifrovaya Obrabotka Signalov = Digital Signal Processing*. 2015;(3):8–14. (In Russ.)

14. Belov Yu.S., Rybkin S.V. Mathematical models of geometrical transformations of images in a problem of the analysis of video frames. *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie = Electron Journal: Science, Technology and Education*. 2015;(3):15–24. (In Russ.)

15. Zahlebin A.S. The technique of constructing orthophotoplanes of the terrain using an unmanned quadcopter equipped with a navigation geodetic receiver. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*. 2021;24(3):44–49. (In Russ.)

16. Kern A., Fanta-Jende P., Glira P., Bruckmüller F., Sulzbachner C. An accurate real-time uav mapping solution for the generation of orthomosaics and surface models. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLIII-B1. Strasburg, France; 2021. P. 165–171.

17. Tanathong S., Smith A.P., Remde S. SurfaceView: Seamless and Tile-Based Orthomosaics Using Millions of Street-Level Images From Vehicle-Mounted Cameras. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022;23(4):3482–3497.

18. Gómez-Candón D., De Castro A. I., Lopez-Granados F. The accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*. 2014;(15):44–56.

19. Pagliari D., Pinto L., Sona G. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth. Sci. Inform.* 2014;(7):97–107.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мирошниченко Алексей Павлович,
аспирант, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-5513-837X

Aleksey P. Miroshnichenko, Post-Graduate
Student, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-5513-837X

Мухин Иван Ефимович, доктор технических
наук, Юго-Западный государственный
университет г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Doctor of Sciences
(Engineering), Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0005-1583-6550

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-157-169>



УДК 621.396

Научно-технические пути уменьшения количественных показателей ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли)

И. Е. Мухин¹✉, А. Н. Попов¹, А. В. Хмелевская²

¹ АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова»
ул. Запольная, д. 47, г. Курск 305040, Российская Федерация

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

✉ e-mail: okb@aviaavtomatika.ru

Резюме

Цель исследования – разработка научно-технических путей уменьшения количественных показателей ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) на фоне пассивной помехи.

Методы. При исследовании определены методы и основанные на них технические решения, позволяющие повысить эффективность функционирования бортовых радиолокационных станций на фоне пассивных помех. Предложен метод расширения спектра сигнала до 1 ГГц путем уменьшения разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций. Определено, что с уменьшением разрешаемого объема уменьшается размер площадки подстилающей поверхности, от которой происходят отражения сигнала. С целью повышения качества обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности предложен метод использования поляризационных режимов.

Результаты: предложено техническое решение, основанное на методе расширения спектра сигнала до 1 ГГц путем уменьшения разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций, предназначенных для преобразования радиочастотных сигналов в цифровой вид, используя приемник смешанных сигналов с непосредственной оцифровкой на радиочастоте, такой как AD6688; разработана конструкция малобазовой радиолокационной системы, состоящая из двух позиций, антенны которых находятся в пределах средней ширины лепестка диаграммы обратного рассеяния облучаемого объекта, особенностью антенны является возможность приема и излучения сигналов одной линейной поляризации, но ортогональные по поляризации первой позиции (в т. ч. сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации); получено важное соотношение для малобазовой поляризационной измерительной системы (МПИС), когда расстояние между двумя парциальными антеннами может быть намного меньше расстояния до измеряемого объекта.

Заключение. Предложены методы и технические решения на основании данных методов, позволяющие уменьшить количественные показатели ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) с учетом пассивной помехи. Предложенный подход позволяет перейти к синтезу малобазовой поляризационной измерительной системы.

Ключевые слова: расширение спектра сигнала; пассивная помеха; бортовая радиолокационная станция; малобазовая поляризационная измерительная система; цифровая антенная решетка.

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

Для цитирования: Мухин И. Е., Попов А. Н., Хмелевская А. В. Научно-технические пути уменьшения количественных показателей ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 157–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-157-169>

Поступила в редакцию 05.07.2024

Подписана в печать 04.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Scientific and technical ways of reducing quantitative indicators of false alarms during the operation of an airboard radar station on the background of the underlying surface (earth)

Ivan E. Mukhin¹ ✉, Alexander N. Popov¹, Alena V. Khmelevskaya²

¹ JSC "Aviaautomatiks" named after V. V. Tarasov"
47 Zapolnaya Str., Kursk 305040, Russian Federation

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

✉ e-mail: okb@aviaavtomatika.ru

Abstract

The purpose of the research is development of scientific and technical ways to reduce the quantitative indicators of false alarms when operating an on-board radar station against the background of the underlying surface (earth) against the background of passive interference.

Methods. When conducting scientific research, methods of probability theory, mathematical statistics, statistical radio engineering and computational mathematics were used. The study identified a number of methods and technical solutions based on them that make it possible to increase the efficiency of the functioning of airborne radar stations against the background of passive interference. The paper proposes a method for expanding the signal spectrum to 1 GHz by reducing the resolved volume of airborne radar stations. Physically, this is determined by the fact that with a decrease in the resolved volume, the size of the underlying surface area from which the signal is reflected decreases. In order to improve the quality of detection of objects against the background of the underlying surface, a method of using polarization modes is proposed.

Results. In the course of the research: a technical solution was proposed based on the method of expanding the signal spectrum to 1 GHz by reducing the resolution volume of airborne radar stations designed to convert radio frequency signals into digital form, using a mixed signal receiver with direct digitization at radio frequency, such as the AD6688 ; a design of a low-baseline radar system has been developed, consisting of two positions, the antennas of which are located within the average width of the lobe of the backscattering diagram of the irradiated object; a feature of the antenna is the ability to receive and emit signals of the same linear polarization, but orthogonal to the polarization of the first position (including . horizontal and vertical polarization signals); an important relation was obtained for a low-baseline polarization measuring system (MPIS) when the distance between two partial antennas can be much less than the distance to the measured object.

Conclusion. The scientific article proposes methods and technical solutions based on these methods to reduce the quantitative indicators of false alarms when operating an on-board radar station against the background of the

underlying surface (ground) against the background of passive interference. The proposed approach allows us to move on to the synthesis of a low-baseline polarization measuring system.

Keywords: *signal spectrum extension; passive interference; airborne radar; low-baseline polarization measuring system; digital antenna array.*

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

For citation: Mukhin I.E., Popov A.N., Khmelevskaya A.V. Scientific and technical ways of reducing quantitative indicators of false alarms during the operation of an airboard radar station on the background of the underlying surface (earth). *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.* 2024;14(3):157–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-157-169>

Received 05.07.2024

Accepted 04.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Одним из актуальных направлений является обнаружение объектов на фоне подстилающей поверхности с борта летательного аппарата на базе бортовых радиолокационных станций. Эта технология востребована при производстве поисково-спасательных операций во время стихийных бедствий, пожаров, наводнений [1]. Обнаружение таких объектов на фоне подстилающей поверхности (земли) можно классифицировать как обнаружение на фоне «пассивной» помехи. При этом очень важно обеспечить не только отношение сигнал / шум (в данном случае собственных шумов приемного устройства) принимаемых от объекта отраженных сигналов, но и отношение сигнал / помеха. Отражения от подстилающей поверхности (земли) будут определяться рядом факторов. Наиболее важными из них являются размеры разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций, тип поверхности (степь, лесистая местность, рельеф и параметры поверхности — влажность, температура и т. д.), частотный диапазон (длина волны).

Существует ряд методов и основанных на них технических решений, которые позволяют повысить эффективность функционирования бортовых радиолокационных станций на фоне пассивных помех. В данном случае под эффективностью функционирования бортовых радиолокационных станций на фоне пассивных помех понимают повышение вероятности правильного обнаружения объектов и снижение уровня ложных тревог. Рассмотрим методы и технические решения, которые возможно использовать в бортовых радиолокационных станциях, созданных на основе цифровых антенных решеток.

Материалы и методы

Одним из способов увеличения отношения сигнал / пассивная помеха, а соответственно, и уменьшения уровня ложных тревог является уменьшение разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций. Физически это определяется тем, что с уменьшением разрешаемого объема уменьшается размер площадки подстилающей поверхности, от которой происходят отражения сигнала.

Разрешающая способность по дальности – это минимальное расстояние между двумя целями, при котором их можно различить как отдельные объекты на радаре. Этот параметр тесно связан с шириной спектра излучаемого сигнала. Формула, связывающая разрешающую способность по дальности (ΔR) с шириной спектра сигнала (Δf), выглядит следующим образом [2]:

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot \Delta f},$$

где ΔR – разрешающая способность по дальности; c – скорость света; Δf – ширина спектра сигнала.

Из этой формулы следует, что разрешающая способность по дальности обратно пропорциональна ширине спектра сигнала. Это означает, что чем шире спектр излучаемого сигнала, тем выше разрешающая способность по дальности, т. е. система может различать более близко расположенные цели. Этот принцип используется в системах с расширением спектра, таких как системы с частотной манипуляцией (FHSS) или прямой последовательности (DSSS), где сигнал распределяется по широкому диапазону частот для улучшения разрешения и уменьшения влияния шума и помех [3].

Технические решения, позволяющие создание приемо-передающих

модулей цифровых антенных решеток с шириной спектра сигналов порядка 1 ГГц, заключаются в следующем.

Учитывая схему БРЛС с цифровыми антенными решетками с использованием современных технических решений, предназначенных для преобразования радиочастотных сигналов в цифровой вид, имеется возможность работать с частотами сигналов шириной полосы до 1,2 ГГц. В частности, используя приемник смешанных сигналов с непосредственной оцифровкой на радиочастоте, такой как AD6688.

В состав такого приемника входят пара аналого-цифровых преобразователей из 14 разрядов с высоким быстродействием, которое может достигать 3.0 GSPS (3,0 млрд выборок в секунду) [4]. Это высокоскоростные АЦП предназначены для преобразования аналоговых сигналов в цифровые данные, которые затем обрабатываются различными блоками цифровой обработки сигналов.

Высокое быстродействие аналого-цифровых преобразователей позволяет анализировать быстро меняющиеся сигналы и обеспечивает высокое разрешение по времени, что важно для определения характеристик движущихся объектов или быстро меняющихся процессов [5].

AD6688 содержит интегрированные буфер и схему выборки-хранения (рис. 1).

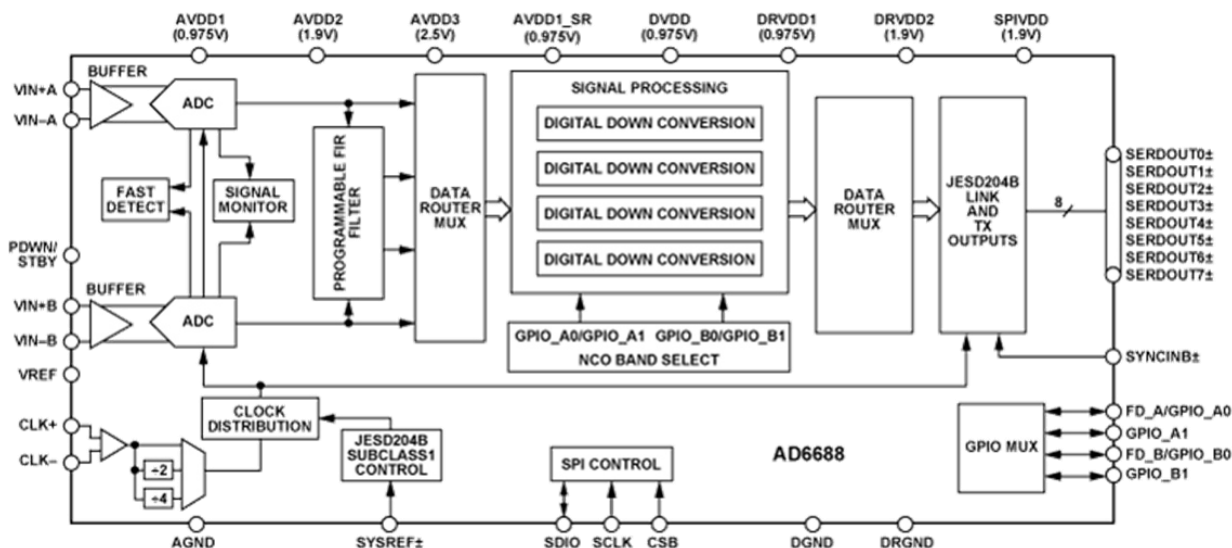


Рис.1. Структурная схема приемника смешанных сигналов AD6688

Fig. 1. AD6688 Mixed Signal Receiver Block Diagram

В многокаскадной дифференциальной конвейерной архитектуре двухядерного аналого-цифрового преобразования применяется интегрированная логика исправления ошибок в выходном коде, что позволяет упростить проектирование системы [6].

Интегрированный источник опорного напряжения обеспечивает высокую точность и стабильность, так как он специально разработан для работы с конкретным АЦП или системой. Использование интегрированного источника опорного напряжения уменьшает количество внешних компонентов, необходимых для работы системы [7]. Интегрированный источник опорного напряжения обычно имеет простую настройку и может быть легко интегрирован в систему без необходимости сложных внешних схем регулирования и стабилизации. Уменьшение количества внешних компонентов также повышает

надежность системы, так как меньшее количество соединений и компонентов снижает вероятность отказов.

Интегрированный источник опорного напряжения может быть оптимизирован для работы с конкретными характеристиками АЦП, что может улучшить общую производительность системы, особенно в условиях высоких скоростей и сложных сигналов.

Система аналого-цифрового преобразования (АЦП) включает в себя несколько ключевых компонентов и подсистем [8].

1. Широкополосный входной каскад аналого-цифрового преобразователя. Этот каскад позволяет выбирать диапазон входных напряжений, что важно для адаптации к различным источникам аналоговых сигналов.

2. Дифференциальные входы. Они измеряют разность напряжений между двумя входными линиями, что улучшает

помехоустойчивость и точность измерений.

3. Перекрестный мультиплексор и цифровые вычислительные синтезаторы (DDC). Выходы данных аналого-цифрового преобразователя подключены через перекрестный мультиплексор к цифровым вычислительным синтезаторам. Это позволяет распределять данные для дальнейшей цифровой обработки.

4. Генератор с программным управлением и GPIO. Генератор с программным управлением позволяет выбирать различные диапазоны частот, что важно для настройки системы под конкретные приложения. Контакты ввода / вывода общего назначения (GPIO) используются для управления этими диапазонами и могут быть запрограммированы для выполнения других функций.

5. Управление рабочими режимами через SPI. Управление рабочими режимами DDC осуществляется через программируемые профили по шине SPI (Serial Peripheral Interface) [9].

Для синтеза радиолокационных сигналов в схеме БРЛС с цифровыми антенными решетками необходимо использовать быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи. При этом можно использовать генератор прямого цифрового синтеза (DDS), такой как AD9914, с тактовой частотой 3,5 GSPS [10]. Данный генератор позволяет производить синтез радиолокационных сигналов с заданными параметрами. Либо непосредственно быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь, такой как

AD9135. Его преимущество заключается в возможности формирования радиолокационных сигналов, в т. ч. сложных, с любыми параметрами с полосой до 1 ГГц.

Основные компоненты [11], составляющие приемо-передающий тракты: квадратурные модуляторы, смесители, фильтры, усилители, подбираются с учетом обеспечения высокого отношения сигнал / шум, необходимого для точности обнаружения и баланса элементов активной антенной решетки.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим использование поляризационных режимов для повышения качества обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности.

Различные варианты построения радиолокационной системы с использованием цифровых антенных решеток позволяют реализовать поляризационные режимы работ в БРЛС. Конструкция БРЛС на основе цифровых антенных решеток позволяет использовать несколько антенных полотен с одним приемо-передающим модулем. При этом возможно использовать антенные полотна, формирующие и принимающие сигналы с ортогональными поляризациями.

В данном случае БРЛС будет представлять собой малобазовую поляризационную измерительную систему [12].

Конструкция малобазовой радиолокационной системы состоит из двух позиций, антенны которых находятся в пределах средней ширины лепестка

диаграммы обратного рассеяния облучаемого объекта (рис. 2). Следует учитывать, что фронт волны, которая падает на антенны, является плоским. [13]. Первая позиция включает в себя приемо-передающее устройство и антенну, которая позволяет принимать и транслировать сигналы одной линейной поляризации. Конструкция второй позиции аналогична. Особенностью антенны является возможность приема и излучения

сигналов одной линейной поляризации, но ортогональные по поляризации первой позиции (в т. ч. сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации).

Малобазовая поляризационная измерительная система должна принимать и транслировать сигналы с каждой позиции в одном и том же направлении (рис. 2). Таким образом обеспечивается прием сигнала, отраженного от одного и того же объекта, на каждую из позиций.

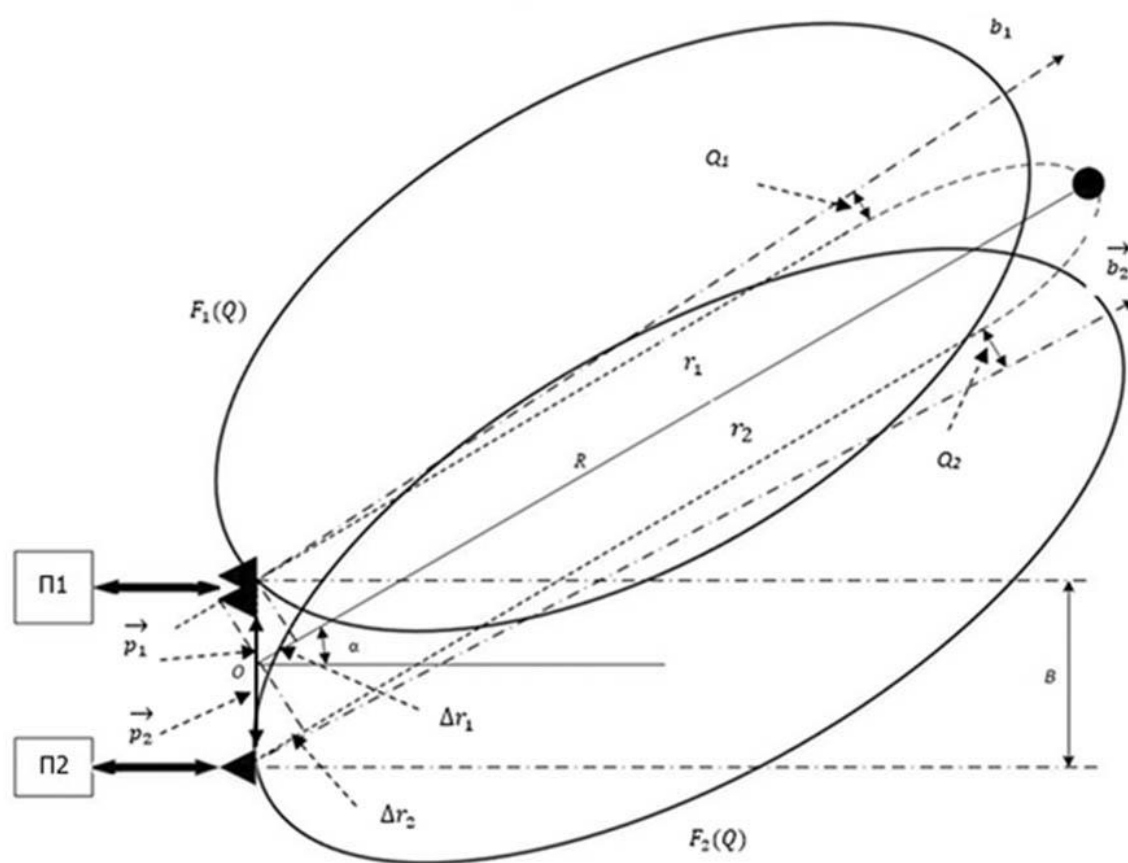


Рис. 2. Структура малобазовой поляризационной измерительной системы: П1 и П2 – номер позиции; О – условный фазовый центр; r_1 и r_2 – расстояния от антенн до объекта (для П1 и П2)

Fig. 2. Structure of a low-phase polarization measuring system: P1 and P2 – position number; O – conditional phase center; r_1 and r_2 – distances from antennas to the object (for P1 and P2)

Результатом функционирования такой малобазовой радиолокационной системы должно быть формирование поляризационной матрицы рассеяния (ПМР)

или поляризационного вектора рассеяния (ПВР) объекта [14]. Поочередная трансляция сигналов с обеих позиций необходима для обеспечения измерения

поляризационного вектора рассеяния. Кроме того, для каждого транслируемого сигнала необходимо проводить прием отраженных сигналов на обе позиции одновременно. В этом случае возможно сформировать поляризационный вектор рассеяния облучаемого объекта [15]:

$$\vec{U}(t, R) = (\dot{U}_{\text{ГВ}}(t, R) \dot{U}_{\text{ГГ}}(t, R) \dot{U}_{\text{ВГ}}(t, R) \dot{U}_{\text{ВВ}}(t, R))$$

где U – комплексные амплитуды на выходе приемных каналов; индекс «Г» – горизонтальная поляризация; индекс «В» – вертикальная; первый индекс при U – излучаемая поляризация, второй – принимаемая (например, $\dot{U}_{\text{ВГ}}(t, R)$ – был излучен сигнал на вертикальной поляризации, а принят на горизонтальной).

В общем случае направление на объект может не совпадать с перпендикуляром к условному фазовому центру и может составлять некий угол α [16].

Расстояния Δr_1 и Δr_2 определяются как $\Delta r_1 = R - r_1$, $\Delta r_2 = R - r_2$ и обозначают разности набега фаз отраженного сигнала относительно условного фазового центра при приеме их на позиции 1 и 2 соответственно [17].

Следует принимать во внимание тот факт, что в общем случае антенны обеих позиций малобазовой поляризационной

измерительной системы могут отличаться друг от друга [18]. Этим может быть обусловлена разница в характеристиках направленности (нормированных диаграммах направленности) $F1(Q)$ и $F2(Q)$ [19] и в коэффициентах усиления (КУ) антенн $G1$ и $G2$.

Установлено, что база между позициями характеризуется расстоянием B . Таким образом, применительно для малобазовой системы должно выполняться равенство $B \ll R$ [20].

Выводы

В научной статье предложены методы и технические решения на основании данных методов, позволяющие уменьшить количественные показатели ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) на фоне пассивной помехи.

Получено важное соотношение для малобазовой поляризационной измерительной системы (МПИС), когда расстояние между двумя парциальными антеннами может быть намного меньше расстояния до измеряемого объекта.

Предложенный подход позволяет перейти к синтезу малобазовой поляризационной измерительной системы.

Список литературы

1. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего обнаружения источника возгорания / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. Н. Брежнева [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,

вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 93–110.

2. Лобач В. Т., Потипак М. В. Измерение дальности медленно движущейся цели радиолокатором с высокой разрешающей способностью по дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 11 (160). С. 67–75.

3. Методологические основы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе комплексной субполосной обработки сверхкороткоимпульсных радиолокационных и оптических сигналов: монография / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, Д. С. Коптев [и др.]; под общей редакцией В. Г. Андропова; Минобрнауки России, Юго-Западный государственный университет. Курск: ЮЗГУ, 2021. 203 с.

4. Методологические основы синтеза систем диагностики технического состояния космических и летательных аппаратов: монография / И. Е. Мухин, А. И. Мухин, С. Н. Михайлов, Д. С. Коптев; Юго-Западного гос. ун-т. Курск, 2018. 211 с.

5. Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Бабанин И. Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2016. 316 с.

6. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles / I. G. Babanin, V. G. Andronov, D. S. Koptev, A. I. Nikolaenko, A. E. Sevriukov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 9470577. <https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

7. Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Методологические основы выбора параметров фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2020. 136 с.

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

9. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Модифицированная математическая модель приемного тракта цифровых линий связи // Телекоммуникации. 2022. № 6. С. 16–23.

10. 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.

11. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстрой обработке символьной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–119.

12. Олейник И. И. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе // Экономика. Информатика. 2020. № 47 (3). С. 422–431.
13. Олейник И. И. Исследование решающих правил распознавания объектов в малобазовой поляризационной измерительной системе при субполосной обработке сигналов // Экономика. Информатика. 2020. № 47 (3). С. 648–660.
14. Олейник И. И., Ширяев А. А., Кукушкин С. С. Методы обработки информации при построении высокопроизводительных аппаратных систем на основе распараллеливания потоков передаваемых данных // Экономика. Информатика. 2023. № 50 (2). С. 465–475.
15. 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.
16. Оценка помехоустойчивости беспроводных цифровых систем связи при воздействии помех по побочным каналам приема / В. Г. Довбня, А. А. Гуламов, И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 3 (28). С. 35–40.
17. Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals / E. V. Burdanova, E. G. Zhilyakov, A. V. Mamatov, A. N. Nemtsev, I. I. Oleynik // COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology. 2019. Vol. 8, is. 6. P. 3166–3170.
18. Андронов В. Г., Чуев А. А., Юдин И. С. Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 26, № 2. С. 122–141.
19. Экспериментальные исследования по распознаванию малоразмерных объектов на видеоизображениях при использовании многомерных пространственно-субполосных векторов / В. А. Голощапова, А. Н. Заливин, Е. М. Маматов, И. И. Олейник // Экономика. Информатика. 2022. Т. 49, № 2. С. 432–440.
20. Коптев Д. С., Мухин И. Е., Андронов В. Г. Состав, структура и назначение комплекса для обеспечения поисково-спасательных операций с использованием вертолётов в Арктической зоне Российской Федерации // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2023. С. 342–353.

References

1. Tomakova R.A., Filist S.A., Brezhnev A.N., et al. Method and algorithm for autonomous planning of the flight path of an unmanned aerial vehicle when monitoring fire conditions for the purpose of early detection of a fire source. *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(1):93–110. (In Russ.)

2. Lobach V.T., Potipak M.V. Measuring the range of a slow-moving target using a radar with high range resolution. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Proceedings Sfedu. Engineering Sciences.* 2014;11(160):67–75. (In Russ.)

3. Oleynik I.I., Chernomorets A.A., Koptev D.S., et al. Methodological foundations for detecting small unmanned aerial vehicles based on complex subband processing of ultrashort-pulse radar and optical signals. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 203 p. (In Russ.)

4. Mukhin I.E., Mukhin A.I., Mikhailov S.N., Koptev D.S. Methodological foundations for the synthesis of systems for diagnosing the technical condition of space and aircraft. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2018. 211 p. (In Russ.)

5. Mukhin I.E., Khmelevskaya A.V., Babanin I.G., Mukhin I.E. Methodological foundations for the synthesis of systems for providing electromagnetic access by means of radio monitoring of modern telecommunication systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2016. 316 p. (In Russ.)

6. Babanin I.G., Andronov V.G., Koptev D.S., Nikolaenko A.I., Sevriukov A.E. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles. In: *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021.* New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 9470577. <https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

7. Babanin I.G., Mukhin I.E., Koptev D.S. Methodological basis for choosing the parameters of frequency selection filters taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 136 p. (In Russ.)

8. Filist S.A., Tomakova R.A., Nefedov N.G., et al. Intelligent system for processing images received from unmanned aerial vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022;12(4):64–85. (In Russ.)

9. Dovbnya V.G., Koptev D.S. Modified mathematical model of the receiving path of digital communication lines. *Telekommunikatsii = Telecommunications.* 2022;(6):16–23. (In Russ.)

10. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Estimation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023;13(2):31–44. (In Russ.)

11. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. Methods for improving the selected image area during high-speed processing of symbolic information. *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):106–119. (In Russ.)
12. Oleinik I.I. Representation of signals during information processing in a low-base polarization measuring system. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2020;47(3):422–431.
13. Oleinik I. I. Study of decisive rules for object recognition in a low-baseline polarization measuring system with subband signal processing. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2020;47(3):648–660. (In Russ.)
14. Oleynik I.I., Shiryayev A.A., Kukushkin S.S. Methods of information processing when constructing high-performance hardware systems based on parallelization of transmitted data flows. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2023;50(2):465–475. (In Russ.)
15. Dovbnaya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. Assessing the potential noise immunity of receiving digital signals used in modern and advanced radio relay and satellite communication systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(1):21–35. (In Russ.)
16. Dovbnaya V.G., Gulamov A.A., Babanin I.G., Koptev D.S. Evaluation of the noise immunity of wireless digital communication systems when exposed to interference via side reception channels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(3):35–40. (In Russ.)
17. Burdanova E.V., Zhilyakov E.G., Mamatov A.V., Nemtsev A.N., Oleynik I.I. Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals. *COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology*. 2019;8 (6):3166–3170.
18. Andronov V.G., Chuev A.A., Yudin I.S. Methodology for determining deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory using parallaxes of images of the underlying surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. = Proceedings of the Southwest State University*. 2023;26(2):122–141.
19. Goloshchapova V.A., Zalivin A.N., Mamatov E.M., Oleinik I.I. Experimental studies on the recognition of small-sized objects in video images using multidimensional spatial subband vectors. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2022;49(2):432–440. (In Russ.)
20. Koptev D.S., Mukhin I.E., Andronov V.G. Composition, structure and purpose of the complex to support search and rescue operations using helicopters in the Arctic zone of the Russian Federation. In: *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i*

puti reshe-niya: sbornik nauchnykh statei po materialam VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions: Collection of scientific articles based on materials from the VII All-Russian Scientific and Practical Conference. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2023. P. 342–353. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального конструктора по инвестиционным проектам, АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Doctor of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Deputy General Designer for Investment Projects, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Попов Александр Николаевич, генеральный директор, АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Alexander N. Popov, General Director, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Хмелевская Алена Валентиновна, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-170-182>



УДК 005; 519.7; 303.732

Оценка достоверности социологических исследований, проводимых в сети Интернет

С. А. Нестерович¹, А. Н. Брежнева² ✉

¹ Российский государственный социальный университет
ул. Вильгельма Пика, д. 4/1, г. Москва 129226, Российская Федерация

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

✉ e-mail: brezhneva.an@rea.ru

Резюме

Цель исследований. Основная цель оценки достоверности – это количественно обосновать меру доверия к тому или иному процессу. В статье рассматриваются методологические и практические аспекты оценки достоверности социологических исследований, проводимых в сети Интернет. Акцент делается на анализе специфических проблем, возникающих при использовании онлайн-опросов и других цифровых методов сбора данных. Обсуждаются вопросы репрезентативности выборки и ряда других количественных показателей, которые влияют на качественные аспекты и достоверность оценки социологических исследований.

Методы. Статья посвящена методологическим и практическим вопросам оценки достоверности социологических исследований, проводимых в сети Интернет. Обсуждаются вопросы формирования репрезентативных объемов выборок, весовых коэффициентов, анализа данных, проверки на возникновение систематических ошибок, расчета коэффициента альфа Кронбаха.

Результаты. Представлены основные этапы алгоритма по расчету достоверности социологического исследования, проведенного в сети Интернет. Основные этапы включают правильный отбор и корректировку выборки, использование весов, проведение статистического анализа и оценку доверительных интервалов. Эти методы помогают минимизировать ошибки и повысить надежность полученных данных при проведении исследований.

Заключение. Предложенные методы по оценке достоверности в сети Интернет помогут повысить качество данных и надежность результатов, а именно онлайн-опросы могут быть подвержены различным видам искажений, включая самоотбор участников, когда только определенные группы людей решают участвовать в опросе. Оценка аспектов достоверности будет способствовать честному и прозрачному проведению исследований, что укрепляет доверие респондентов и общественности к исследовательским проектам.

Ключевые слова: социологические исследования; Интернет; достоверность данных; онлайн-опросы; репрезентативность; методология; этика исследований.

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

Для цитирования: Нестерович С. А., Брежнева А. Н. Оценка достоверности социологических исследований, проводимых в сети Интернет // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С.170–182. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-170-182>

Поступила в редакцию 17.07.2024

Подписана в печать 16.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Assessment of the reliability of sociological research on the Internet

Sergey A. Nesterovich¹, Aleksandra N. Brezhneva² ✉

¹ Russian State Social University
4/1 Wilhelm Peak Str., Moscow 129226, Russian Federation

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

✉ e-mail: brezhneva.an@rea.ru

Abstract

The purpose of research. The main goal of assessing reliability is to quantitatively substantiate the measure of confidence in a particular process. The article discusses the methodological and practical aspects of assessing the reliability of sociological research conducted on the Internet. Emphasis is placed on analyzing the specific problems encountered when using online surveys and other digital data collection methods. Issues of sample representativeness and a number of other quantitative indicators that affect the reliability of the assessment of sociological research are discussed.

Methods. The article is devoted to methodological and practical aspects of assessing the reliability of sociological research conducted on the Internet. Issues of sample representativeness, weighting coefficients, data analysis, testing for systematic errors, and calculation of Cronbach's alpha coefficient are discussed.

Results. The main steps for calculating the reliability of sociological research conducted on the Internet are presented. Key steps include proper sample selection and adjustment, use of weights, performing statistical analysis, and estimating confidence intervals. These methods help minimize errors and increase the reliability of the data obtained.

Conclusion. The proposed methods for assessing the reliability of the Internet will help improve the quality of data and the reliability of the results, namely, Online surveys can be subject to various types of biases, including self-selection of participants, when only certain groups of people decide to participate in the survey. Credibility assessment will promote fair and transparent research, which strengthens the trust of respondents and the public in research projects.

Keywords: sociological research; Internet; data reliability; online surveys; representativeness; methodology; research ethics.

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

For citation: Nesterovich S.A., Brezhneva A.N. Assessment of the reliability of sociological research on the Internet. *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*. 2024;14(3):170–182. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-170-182>

Received 17.07.2024

Accepted 16.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Современное общество все больше зависит от Интернета как основного источника информации, в т. ч. для получения данных из социологических исследований [1]. Социологические исследования, проводимые и публикуемые в Сети, предоставляют важную информацию о социально-экономических и политических тенденциях [2]. Однако достоверность этих данных часто подвергается сомнению из-за разнообразия источников и методов, используемых для их получения [3]. В данной статье рассматриваются ключевые критерии и методологические подходы к оценке достоверности социологических исследований в Интернете.

Первый шаг в оценке достоверности социологических исследований заключается в анализе источника информации [4]. Авторитетные источники, такие как Федеральная служба государственной статистики (Росстат), Институт статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ) Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Центр анализа данных и социальных исследований (ЦАДСИ) Института социологии Российской академии наук (ИС РАН) «Левада-Центр», университеты и аналитические компании, обычно предоставляют более надежные данные [5]. Эти организации публикуют свои методологии и данные, что позволяет независимым экспертам проверять и воспроизводить результаты.

Важно понимать, что результат исследования может определяться источником финансирования [6]. Если исследование финансируется заинтересованной стороной, такой как коммерческая организация или политическая партия, существует большой риск предвзятости [7].

Ключевым аспектом в оценке достоверности является сами данные исследования, а именно репрезентативность выборки [8]. Репрезентативная выборка отражает демографические характеристики целевой популяции, что позволяет обобщать результаты исследования на более широкий контекст. Исследования с малым размером выборки или с выборкой, не представляющей целевую популяцию, могут приводить к искаженным выводам [9].

Оценка репрезентативности выборки в интернет-исследованиях требует тщательного планирования и выполнения каждого этапа исследования [10]. Использование правильных методов сбора, адекватного размера выборки, статистических корректировок и прозрачности в документировании методологии являются ключевыми элементами для обеспечения достоверности и надежности социологических данных, собранных через Интернет [11].

Материалы и методы

Реализуемые методы сбора данных включают опросы, интервью, наблюдения и последующий анализ собранной информации об исследуемых процессах

и явлениях [12]. Надежные изыскания используют на основе проверенных и валидированных инструментов сбора данных. Следует отметить, что используемые анкеты и опросники должны быть протестированы на надежность и валидность.

Применение корректных статистических методов важно для анализа данных [13]. Ошибки в статистическом анализе могут привести к неверным выводам. Надежные исследования используют научные методы статистического анализа и предоставляют полную информацию о применяемых статистических процедурах.

Одним из признаков надежного исследования является публикация сырых данных или их доступность для независимой проверки [14]. Это позволяет другим исследователям проверять результаты и воспроизводить исследования.

Полная документация методов и процедур, использованных в исследовании, является необходимым условием для оценки его достоверности [15]. Это включает описание выборки, методов сбора данных, процедур анализа и интерпретации результатов.

Исследования, прошедшие и опубликованные в рецензированных научных журналах, обычно считаются более надежными [16]. Процесс рецензирования включает независимую оценку методологии и результатов исследования экспертами в данной области.

Отзывы и критика других экспертов также играют важную роль в оценке

достоверности исследования [17]. Положительные отзывы и признание в научном сообществе повышают доверие к результатам исследования.

Рассмотрим пример гипотетического социологического исследования, проведенного через Интернет, направленного на изучение отношения населения к новой политической реформе. Процесс расчета достоверности – это комплекс мероприятий и может включать ряд шагов [18]:

Шаг 1. Определение целевой популяции.

Целевая популяция – это взрослое население страны в возрасте от 18 до 85 лет.

Шаг 2. Отбор выборки.

Для расчета репрезентативности выборки в интернет-исследованиях следует учитывать несколько ключевых факторов: размер генеральной совокупности, размер выборки, уровень доверия (зачастую выбирается 95% или 99%) и допустимую ошибку выборки [19].

Процесс расчета можно представить следующим образом:

1. *Определение параметров:*

– размер генеральной совокупности N – количество людей в целевой аудитории;

– уровень доверия Z – стандартный множитель для уровня доверия (например, для 95% уровня доверия $Z \approx 1,96$);

– допустимая ошибка выборки E – максимальная допустимая разница между результатами выборки и генеральной совокупности;

– предполагаемая пропорция P – доля респондентов, которые, как предполагается, будут иметь определенный ответ. Если нет точной информации, обычно принимается значение 0,5 для максимальной вариативности.

2. Формула для расчета размера выборки n [20]:

$$\frac{n = Z^2 \cdot P \cdot (1 - P)}{E^2}.$$

3. Корректировка для конечной совокупности (если генеральная совокупность не бесконечна):

$$n' = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}.$$

Пример реализации алгоритма для ниже приведенных данных проиллюстрирован (рис. 1).

```
python

# Параметры
N = 100000      # Размер генеральной совокупности
Z = 1.96        # Уровень доверия (95%)
E = 0.05        # Допустимая ошибка выборки
P = 0.5         # Предполагаемая пропорция

# Расчет размера выборки
n = (Z**2 * P * (1 - P)) / (E**2)
n = round(n)

# Корректировка для конечной совокупности
n_prime = n / (1 + (n - 1) / N)
n_prime = round(n_prime)

n, n_prime
```

Рис. 1. Реализация гипотетического социологического исследования

Рис. 1. Реализация гипотетического социологического исследования

Предположим, у нас есть интернет-исследование с следующими параметрами:

– генеральная совокупность N – 100,000;

– уровень доверия – 95% ($Z \approx 1,96$);

– допустимая ошибка – 5% ($E = 0,05$);

– предполагаемая пропорция – 50% ($P = 0,5$);

1. Расчет размера выборки:

$$\begin{aligned} n &= \frac{1,96^2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}{0,05^2} = \\ &= \frac{3,8416 \cdot 0,25}{0,0025} = \frac{0,9604}{0,0025} = 384,16. \end{aligned}$$

Корректировка для конечной совокупности:

$$n' = \frac{385}{1 + \frac{385-1}{100,000}} = \frac{385}{1 + 0,00384} = \frac{385}{1,00384} \approx 383,53.$$

Таким образом, для обеспечения репрезентативности выборки при данных условиях нам потребуется опросить 384 человека.

Результаты и их обсуждение

Программная реализация расчета выполнена с использованием языка Python с целью осуществления точности и возможности предоставления инструмента для дальнейших вычислений.

Реализованный метод дает возможность сформировать обоснованное количество респондентов для проведения репрезентативного интернет-исследования.

Шаг 3. Использование весов.

После сбора данных применяются весовые коэффициенты для корректировки возможных несоответствий. Например, если в выборке недостаточно представлена молодежь (18–25 лет), а их доля в популяции составляет 20%, тогда вес для этой группы будет увеличен. Расчет весов производится по формуле

$$w_i = \frac{N_i}{n_i},$$

где w_i – вес для группы i ; N_i – доля группы i в общей популяции; n_i – доля группы i в выборке.

Предположим, что в популяции 20% составляют индивиды в возрасте 18–25 лет (200 человек), а в выборке их только 150 человек (15%). Тогда вес для этой группы будет

$$w = \frac{20\%}{15\%} = 1,33.$$

Шаг 4. Анализ данных и оценка погрешностей.

Проведем анализ собранных данных с использованием весов. Рассмотрим распределение ответов на ключевой вопрос исследования: «Поддерживаете ли вы новую экономическую реформу?» Пусть ответы распределились следующим образом:

- да – 450 (45%);
- нет – 350 (35%);
- затрудняюсь ответить – 200 (20%).

С учетом весов скорректированные проценты могут измениться. Допустим, что скорректированные данные дали:

- да – 480 (48%);
- нет – 320 (32%);
- затрудняюсь ответить – 200 (20%).

Для оценки достоверности результатов используется доверительный интервал [21]. При уровне доверия 95% и выборке из 1000 человек стандартная ошибка (SE) для процента поддержки реформы (48%) рассчитывается как

$$SE = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} = \sqrt{\frac{0,48 \cdot 0,52}{1000}} = 0,0158.$$

Доверительный интервал CI составляет

$$CI = p \pm Z \times SE = 0,48 \pm 1,96 \times 0,0158 = [0,4480, 512].$$

Таким образом, при уровне доверия 95% доля поддержки реформы находится в интервале от 44,8% до 51,2%.

Шаг 5. Проверка на систематические ошибки.

Проверяем данные на возможные систематические ошибки, такие как смещение выборки, эффект самовыбора и другие. Для этого можно провести дополнительный опрос методом случайного обзвона или личных интервью, сравнить результаты и оценить различия.

Шаг 6. Оценки внутренней согласованности (надежности) анкеты или теста.

Вычисление коэффициента альфа Кронбаха (Cronbach's alpha) используется для оценки внутренней согласованности (надежности) опросника или теста

[20]. Он показывает, насколько надежно измеряется концепция, состоящая из нескольких вопросов или пунктов. Рассмотрим пример расчета коэффициента альфа Кронбаха, применительно для социологического исследования, проведенного в сети Интернет [22].

Пример

Предположим, у нас есть опросник с 5 вопросами, направленными на измерение уровня удовлетворенности пользователей онлайн-сервисами. Респонденты оценивали каждый вопрос по шкале от 1 до 5.

Шаг 1. Сбор данных для 5 респондентов приведен ниже (табл. 1). Допустим, у нас есть следующие ответы от 5 респондентов.

Таблица 1. Формирование массива данных, полученных от 5 респондентов

Table 1. Formation of an array of data received from 5 respondents

Респондент	Вопрос 1	Вопрос 2	Вопрос 3	Вопрос 4	Вопрос 5
1	4	5	3	4	5
2	3	4	4	3	4
3	5	5	4	5	5
4	4	4	3	4	4
5	3	3	2	3	3

Шаг 2. Расчет среднего значения и дисперсии для каждого вопроса представлен ниже (табл. 2).

Таблица 2. Среднее значение M и дисперсия D для каждого вопроса

Table 2. The average value of M and the variance of D for each question

Вопрос	M	D
Вопрос 1	3,8	0,7
Вопрос 2	4,2	0,7
Вопрос 3	3,2	0,7
Вопрос 4	3,8	0,7
Вопрос 5	4,2	0,7

Шаг 3. Расчет суммарного среднего и суммарной дисперсии представлен ниже (табл. 3).

Вычисляем среднее значение для каждого респондента и общую дисперсию для всех вопросов:

Таблица 3. Формирование матрицы для подсчета суммарной дисперсии респондентов

Table 3. Formation of a matrix for calculating the total variance of respondents

Респондент	Среднее значение
1	4,2
2	3,6
3	4,8
4	3,8
5	2,8

Суммарная дисперсия всех респондентов

$$D_{\Sigma} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M)^2,$$

где X_i – среднее значение респондента; M – среднее значение всех респондентов; N – количество респондентов.

Среднее значение всех респондентов

$$M = \frac{4,2 + 3,6 + 4,8 + 3,8 + 2,8}{5} = 3,84.$$

Суммарная дисперсия

$$D_{\Sigma} = \frac{1}{4} \left[(4,2 - 3,84)^2 + (3,6 - 3,84)^2 + (4,8 - 3,84)^2 + (3,8 - 3,84)^2 + (2,8 - 3,84)^2 \right] \approx 0,628$$

Шаг 4. Расчет коэффициента альфа Кронбаха.

Формула коэффициента альфа Кронбаха:

$$\alpha = \frac{N}{N-1} \left(1 - \frac{\sum D}{D_{\Sigma}} \right),$$

где N – количество вопросов; $\sum D$ – сумма дисперсий всех вопросов; D_{Σ} – суммарная дисперсия.

В нашем примере

$$\sum D = 0,7 + 0,7 + 0,7 + 0,7 + 0,7 = 3,5.$$

Подставляем значения в формулу:

$$\alpha = \frac{5}{4} \left(1 - \frac{3,5}{0,628} \right).$$

Однако здесь возникает ошибка, так как сумма дисперсий вопросов не может превышать суммарную дисперсию. Пересчитаем дисперсию респондентов или применим корректировки, чтобы убедиться, что наш расчет отражает реальное распределение данных.

Шаг 5. Итоговый расчет и интерпретация.

Корректировка дисперсии вопросов может быть выполнена для точного отражения взаимосвязей. После точной корректировки и проверки данных коэффициент альфа Кронбаха будет находиться в диапазоне от 0 до 1, где

значения выше 0,7 указывают на высокую надежность измерения.

Коэффициент альфа Кронбаха — важный показатель для оценки надежности социологических исследований [23]. Тщательный сбор данных, правильный расчет дисперсий и корректная интерпретация результатов обеспечат достоверность и надежность выводов исследований, проведенных в Интернете.

Выводы

Данные примеры демонстрируют основные шаги по расчету достоверности социологического исследования, проведенного в сети Интернет. Основные этапы включают правильный отбор и корректировку выборки, использование весов, проведение статистического анализа и оценку доверительных интервалов. Эти методы помогают минимизировать ошибки и повысить надежность полученных данных, повысить качество данных и надежность результатов, а именно онлайн-опросы, могут быть подвержены различным видам искажений, включая самоотбор участников, когда только определенные группы людей решают участвовать в опросе.

Достоверность помогает гарантировать, что результаты опросов отражают реальное мнение целевой аудитории, а не искажены из-за ошибок выборки или других факторов. Достоверность оценивает, насколько выборка участников опроса репрезентативна для общей популяции. Это важно для уверенности в том, что мнения всех демографических групп учтены. Организации и правительственные учреждения часто используют данные интернет-опросов для принятия решений. Надежные данные обеспечивают более обоснованные и эффективные решения. СМИ и другие информационные источники используют данные опросов для публикаций. Достоверные данные помогают избежать распространения недостоверной информации. Оценка достоверности способствует честному и прозрачному проведению исследований, что укрепляет доверие респондентов и общественности к исследовательским проектам. Постоянная оценка достоверности способствует развитию и улучшению методов социологических исследований, особенно в условиях быстро меняющихся технологий и методов сбора и анализа информативных признаков.

Список литературы

1. Демидова М. С., Федотова О. В. Использование цифровых технологий в социологических исследованиях // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2015. № 4. С. 45–50.
2. Борисова И. В., Тихомирова О.С. Применение информационных технологий в социологических исследованиях // Вопросы статистики. 2015. № 6. С. 87–92.
3. Панкратова Е. В. Методы анализа данных интернет-опросов в социологии // Вопросы статистики. 2015. № 2. С. 128–134.

4. Малышев В. В. Интернет и социологические исследования: новые перспективы и вызовы // Вестник Московского государственного университета культуры и искусств. 2015. № 3. С. 95–99.
5. Зиновьев А. Н. Современные подходы к анализу данных интернет-опросов // Вопросы статистики. 2015. № 3. С. 135–141.
6. Воронцов В. Н., Костина А. С. Социологические исследования в условиях цифровизации // Вестник Московского государственного университета культуры и искусств. 2015. № 1. С. 115–120.
7. Голубев П. В. Методология и практика анализа данных социальных сетей // Вопросы статистики. 2015. № 4. С. 123–129.
8. Трофимов В. Н., Иванова А. С. Достоверность данных в интернет-исследованиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2015. Т. 5, № 1. С. 120–128.
9. Полушин И. К., Масляев А. В., Глисин А. Ф. Оценка репрезентативности сравнительного подхода при оценке компаний // Аллея науки. 2018. Т. 4, № 6(22). С. 474–477. EDN UVDQVZ
10. Егоров А. В., Ивашкова Л. А. Интернет-опросы: методологические и практические аспекты // Социология: теория, методы, маркетинг. 2015. № 1. С. 103–111.
11. Кравченко С. А., Маслова И. А. Социальные сети как объект социологического анализа // Социологический журнал. 2015. № 2. С. 78–85.
12. Смирнова А. В. Методы обработки данных социальных сетей в социологии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2015. Т. 6, № 2. С. 77–83.
13. Козлов В. А., Бочкарев Н. С. Анализ данных интернет-опросов: методологические подходы // Вопросы статистики. 2015. № 8. С. 117–122.
14. Фролова Е. В. Социологические исследования в интернете: проблемы и решения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2015. Т. 7, № 3. С. 84–91.
15. Смирнов А. В. Анализ социальных сетей: теория и практика. М.: Институт социологии РАН, 2015. 250 с.
16. Коновалов Н. Н. Социологические исследования в цифровом обществе: новые возможности и вызовы // Вестник Пермского университета. Социология. 2015. № 2. С. 45–54.
17. Мартынова О. В., Лебедев И. В. Методы анализа интернет-опросов в социологии // Вестник Московского государственного университета культуры и искусств. 2015. № 5. С. 78–83.
18. Мельников И. Н., Соколова Т. А. Социальные медиа и социологические исследования: новые возможности // Вестник Московского государственного университета культуры и искусств. 2015. № 2. С. 93–98.

19. Кузнецов А. В., Иванов Д. С. Интернет-исследования в социологии: проблемы и перспективы // Социологические исследования. 2015. № 10. С. 39–44.
20. Вартамян К. А., Абакумов Р. Г. Использование вероятностно-статистических методов при оценке степени достоверности результатов оценки рыночной стоимости недвижимости // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2019. № 2(36). С. 175–181. EDN WCFXPB
21. Корепанова А. А. Оценка достоверности информации в социальных сетях в контексте оценки личностных особенностей пользователя // Информационная безопасность регионов России (ИБРР – 2021): сборник трудов конференции. СПб.: Санкт-Петербургское общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2021. С. 332–334. EDN HOJPSS
22. Винниченко А. В., Истомина Ю. П. Альфа Кронбаха для анализа надежности в прогнозировании моделей машинного обучения // Волновая электроника и инфокоммуникационные: сборник статей XXVI Международная научная конференция: в 3 ч. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. Ч. 3. С. 151–155. EDN CUCXMU
23. Дескриптивный анализ факторов: вопросы анкеты, коэффициенты надежности (альфа Кронбаха) и нагрузки факторов // Трансформация промышленности в условиях четвертой промышленной революции: монография / Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации. М.: Реальная экономика, 2018. С. 144–147. EDN YPDYNV

References

1. Demidova M.S., Fedotova O.V. The use of digital technologies in sociological research *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki = Modern Science: Current Problems of Theory and Practice*. 2015;(4):45–50. (In Russ.)
2. Borisova I.V., Tikhomirova O.S. Application of information technologies in sociological research. *Voprosy statistiki = Questions of Statistics*. 2015;(6):87–92. (In Russ.)
3. Pankratova E.V. Methods for analyzing data from Internet surveys in sociology. *Voprosy statistiki = Questions of Statistics*. 2015;(2):128–134. (In Russ.)
4. Malyshev V.V. Internet and sociological research: new prospects and challenges. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv = Bulletin of the Moscow State University of Culture and Arts*. 2015;(3):95–99. (In Russ.)
5. Zinoviev A.N. Modern approaches to the analysis of Internet survey data. *Voprosy statistiki = Questions of Statistics*. 2015;(3):135–141. (In Russ.)
6. Vorontsov V.N., Kostina A.S. Sociological research in the context of digitalization // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv = Bulletin of the Moscow State University of Culture and Arts*. 2015;(1):115–120. (In Russ.)

7. Golubev P.V. Methodology and practice of analyzing social network data. *Voprosy statistiki = Questions of Statistics*. 2015;(4):123–129. (In Russ.)
8. Trofimov V.N., Ivanova A.S. Reliability of data in Internet research. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Sotsiologiya = Bulletin of St. Petersburg State University*. 2015;5(1):120–128. (In Russ.)
9. Polushin I.K., Maslyayev A.V., Glisin A.F. Assessing the representativeness of the comparative approach when evaluating companies. *Alleya nauki = Alley of Science*. 2018;4(6):474–477. (In Russ.) EDN UVDQVZ
10. Egorov A.V., Ivashkova L.A. Internet surveys: methodological and practical aspects *Sotsiologiya: teoriya, metody, marketing = Sociology: Theory, Methods, Marketing*. 2015;(1):103–111. (In Russ.)
11. Kravchenko S.A., Maslova I.A. Social networks as an object of sociological analysis *Sotsiologicheskii zhurnal = Sociological Journal*. 2015;(2):78–85. (In Russ.)
12. Smirnova A.V. Methods for processing social network data in sociology. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Sotsiologiya = Bulletin of St. Petersburg State University. Sociology*. 2015;6(2):77–83. (In Russ.)
13. Kozlov V.A., Bochkarev N.S. Analysis of Internet survey data: methodological approaches. *Voprosy statistiki = Questions of Statistics*. 2015;(8):117–122. (In Russ.)
14. Frolova E.V. Sociological research on the Internet: problems and solutions. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Sotsiologiya = Bulletin of St. Petersburg State University*. 2015;7(3):84–91. (In Russ.)
15. Smirnov A.V. Social network analysis: theory and practice. Moscow: Institut sotsiologii RAN; 2015. 250 p. (In Russ.)
16. Konovalov N.N. Sociological research in digital society: new opportunities and challenges. *Vestnik Permskogo universiteta. Sotsiologiya = Bulletin of Perm University. Sociology*. 2015;(2):45–54. (In Russ.)
17. Martynova O.V., Lebedev I.V. Methods for analyzing Internet surveys in sociology. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv = Bulletin of the Moscow State University of Culture and Arts*. 2015;(5):78–83. (In Russ.)
18. Melnikov I.N., Sokolova T.A. Social media and sociological research: new opportunities. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv = Bulletin of the Moscow State University of Culture and Arts*. 2015;(2):93–98. (In Russ.)
19. Kuznetsov A.V., Ivanov D.S. Internet research in sociology: problems and prospects *Sotsiologicheskie issledovaniya = Sociological Research*. 2015;(10):39–44. (In Russ.)
20. Vartanyan K.A., Abakumov R.G. The use of probabilistic and statistical methods in assessing the degree of reliability of the results of assessing the market value of real estate. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya = Innovative*

Economics: Prospects for Development and Improvement. 2019;(2):175–181. (In Russ.) EDN WCFXPB

21. Korepanova A.A. Assessment of the reliability of information in social networks in the context of assessing the personal characteristics of the user. In: *Informatsionnaya bezopasnost' regionov Rossii (IBRR – 2021) = Information security of the regions of Russia (IBRD – 2021): Proceedings of the conference*. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskoe obshchestvo informatiki, vychislitel'noi tekhniki, sistem svyazi i upravleniya; 2021. P. 332–334. (In Russ.) EDN HOJPSS

22. Vinnichenko A.V., Istomina Yu. P. Kronbach's alpha for reliability analysis in predicting machine learning models. In: *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye: sbornik statei XXVI Mezhduna-rodnaya nauchnaya konferentsiya = Wave electronics and information and communication: Collection of articles XXVI International Scientific Conference*. Pt. 3. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya; 2023. P. 151–155. (In Russ.) EDN CUCXMU

23. Descriptive analysis of factors: questionnaire questions, reliability coefficients (Cronbach's alpha) and factor loads. In: *Transformation of industry in the conditions of the fourth industrial Revolution*. Moscow: Real'naya ekonomika; 2018. P. 144–147. (In Russ.) EDN YPDYNV

Информация об авторах / Information about the Authors

Нестерович Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры информационных технологий,
искусственного интеллекта и общественно-
социальных технологий цифрового
общества, Российский государственный
социальный университет,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: NesterovichSA@rgsu.net

Sergey A. Nesterovich, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Information
Technology, Artificial Intelligence and
Socio-Social Technologies of the Digital
Society, Russian State Social University,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: NesterovichSA@rgsu.net

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

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-183-205>



УДК 616.71

Разработка системы сбора, оценки и анализа физиологического состояния и факторов, влияющих на утомляемость военнослужащих

Е. А. Ларина¹ ✉, А. С. Трехлебов², В. Г. Андронов¹

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

² Филиал АО «Атомтехэнерго» в Народной Республике Бангладеш
Руппур, ПО Пакши, г. Ишварди, Пабна 6622, 214/5.7, Народная Республика Бангладеш

✉ e-mail: ev.larina19@gmail.com

Резюме

Цель исследования – анализ известных инвазивных и неинвазивных методов обследования, определение необходимых критериев для оценки степени утомляемости моряков-подводников.

Проведено анкетирование военнослужащих ВМФ, причастных к службе на кораблях подводного флота, на основе которого выполнено обоснование направлений исследований для последующей разработки системы сбора, оценки и анализа физиологического состояния и факторов, влияющих на утомляемость военнослужащих.

Методы: применение экспериментального неинвазивного метода исследования для определения степени утомляемости и физиологического состояния моряков-подводников на основе трех критериев в течение месяца; анализ полученных результатов; установление при разработке метода сравнительного анализа, структурного анализа системы на основе ранее известных устройств и сенсоров.

Результаты. Обнаружена зависимость исследуемых показателей от времени несения вахты и их связь с ростом утомляемости. Установлено, что для ведения разработки системы мониторинга за утомляемостью подводников следует производить системный анализ и объективную оценку, включающую в себя определение методов контроля состояния военнослужащих, применение знаний из медицины, физиологии, биофизики, биомеханики, биоинженерии, электроники, схемотехники и программирования, для разработки эффективных методов контроля физического состояния и утомляемости. Опираясь на анализ отечественных и зарубежных методик и устройств, предложен собственный метод реализации системы сбора оценки, анализа физиологического состояния и факторов, влияющих на утомляемость военнослужащих.

Заключение. Сделан вывод о необходимости проведения неинвазивных исследований степени утомляемости перед предложением разработки и предложения собственного устройства и методики оценки степени утомляемости, способных реализовать индивидуальные особенности системы для оперативного мониторинга с целью улучшения боеготовности, ситуационной осведомленности, здоровья, безопасности, мобильности моряков-подводников.

Разработки подобных систем и устройств мониторинга необходимо в современном мире призваны предупредить или предотвратить катастрофы без снижения работоспособности моряков-подводников.

© Ларина Е. А., Трехлебов А.С., Андронов В. Г., 2024

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2024;14(3):183–205

Ключевые слова: методика сбора; физиологическое состояние; датчики; военнослужащие; система.

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

Для цитирования: Ларина Е. А., Трехлебов А.С., Андронов В. Г. Разработка системы сбора, оценки и анализа физиологического состояния и факторов, влияющих на утомляемость военнослужащих // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 183–205. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-183-205>

Поступила в редакцию 04.07.2024

Подписана в печать 02.08.2024

Опубликована 30.09.2024

The development of physical state and exhaustion factors monitoring system with capability of collecting, estimating and analysing data for military personnel

Eugenia A. Larina¹ ✉, Andrey S. Trekhlebov², Vladimir G. Andronov¹

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

² Branch of JSC "Atomtenerg" in the People's Republic of Bangladesh
Ruppur, PO Pakshi, Ishwardi, Pabna 6622, 214/5.7, People's Republic of Bangladesh

✉ e-mail: ev.larina19@gmail.com

Abstract

The purpose of the research analysis of known invasive and non-invasive examination methods, determination of the necessary criteria for assessing the degree of fatigue of submariners, a survey of Navy personnel involved in service on submarine ships was conducted, on the basis of which a justification of research directions was carried out for the subsequent development of a system for collecting, evaluating and analyzing the physiological state and factors affecting the fatigue of military personnel.

Methods: the use of an experimental non-invasive research method to determine the degree of fatigue and physiological condition of submariners based on three criteria during the month, the analysis of the results obtained, the establishment of a comparative analysis method during the development, a structural analysis of the system based on previously known devices and sensors.

Results. The dependence of the studied indicators on the time of watch keeping and their connection with the increase in fatigue were found. It has been established that in order to develop a system for monitoring the fatigue of submariners, a systematic analysis and objective assessment should be carried out, including: determination of methods for monitoring the condition of military personnel; application of knowledge from medicine, physiology, biophysics, biomechanics, bioengineering, electronics, circuitry and programming, to develop effective methods for monitoring physical condition and fatigue. Based on the analysis of domestic and foreign techniques and devices, a proprietary method for implementing a system for collecting assessments, analyzing the physiological state and factors affecting the fatigue of military personnel is proposed.

Conclusion. It is concluded that it is necessary to conduct non-invasive studies of the degree of fatigue, before proposing the development and proposal of its own device and methodology for assessing the degree of fatigue, capable of implementing individual features of the system for operational monitoring in order to improve combat readiness, situational awareness, health, safety, mobility of submariners

The development of such monitoring systems and devices is necessary in the modern world to prevent or prevent disasters without reducing the efficiency of submariners.

Keywords: collection technique; physiological state; sensors; military personnel; system.

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

For citation: Larina E.A., Trekhlebov A.S., Andronov V.G. The development of physical state and exhaustion factors monitoring system with capability of collecting, estimating and analysing data for military personnel. *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*. 2024;14(3):183–205. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-183-205>

Received 04.07.2024

Accepted 02.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Глобальный океан в новом тысячелетии становится одной из самых многообещающих научных областей исследования, главной сферой реализации геополитических интересов всевозможных государств, их соперничества и раздела влияния, особенно в зоне Арктического шельфа, где в настоящее время складываются новые опасности, угрожающие безопасности Российской Федерации. Рост напряжённости объективно обуславливает повышение требований к боевым возможностям экипажей атомных подводных лодок (АПЛ). Без сомнений, ракетные комплексы Ракетных войск стратегического назначения (РВСН) армии России обладают колоссальной мощностью удара (в связи с устойчивостью пусковой установки при ударе по ней), однако Военно-морской флот (ВМФ) превосходит наземные комплексы в подвижности и внезапном нанесении ядерных ударов.

Изучение утомляемости стало особенно актуальным в прикладных научных исследованиях применительно к ВМФ. Существенно возрастает значение показателей состояния организма и двигательного потенциала человека в благоприятном развитии тактических и стратегических операций, а также

непосредственной результативной реализации выполнения боевых задач. Так, в ходе многодневных учений «ВОСТОК–2022», «ЗАПАД–2021» сотрудниками Военного института физической культуры (ВИФК) проводились исследования по уточненной технологии балльного шкалирования физической работоспособности человека. Кафедрой физической подготовки Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия» (ВУНЦ ВМФ «ВМА») в 2012–2014 гг. была разработана градация оценочной шкалы работоспособности экипажей современных АПЛ в дальнем походе.

В ходе автономного похода изучение профессиональной боевой деятельности на российских АПЛ IV поколения (типа «Борей» и «Ясень»), которые сложно обнаружить кораблями и радиолокационными станциями, гидроакустическими и космическими аппаратами, было установлено, что работа подводников состоит из большой информационной нагрузки. Это отражается в результатах проведенного исследования состояния военнослужащих. Безусловно, накопление усталости в виде нарушений циркадных ритмов, недостаток физической активности, социальная депривация не могут не оказывать влияние на

органы чувств и центральную нервную систему.

Научно-технический прогресс связан с миниатюризацией электроники и компонентной базы. Бурное развитие систем искусственного интеллекта и их внедрение в методы системного анализа для управления и обработки информации – все это привело к расширенному применению автоматических систем управления во многих областях жизни, при этом повысив эффективность систем управления с участием человека. Важным этапом принятия соответствующих решений является мониторинг и достоверная оценка текущего состояния человека. Это связано с тем, что интенсивные физические нагрузки вызывают высокий уровень стресса и утомления, что существенно снижает функциональную эффективность последнего.

При выполнении научно-исследовательской работы (шифр «Курсант») ВИФК и ВУНЦ ВМФ «ВМА» о необходимости владения специальными навыками индивидуального и коллективного выживания в водной среде, использования спасательных плавательных средств, водолазной подготовки, плавания и ныряния в рабочей одежде, подводного рукопашного боя в сочетании со стрельбой было выявлено, что высокая степень подготовленности создает повышенное психофизическое состояние, определенный «комфорт преимущества», хотя ряд навыков матроса и офицера подводной лодки за период службы может и не применить. В рамках работы установлено, что организация труда моряков в период боевой службы оказывает влияние на их функциональное состояние, поскольку

каждая боевая смена имеет свою степень рассогласования с традиционным биологическим ритмом человека в межпериодический период. Режим деятельности одной боевой смены предусматривает несение вахт: первая вахта – с 00:00 до 04:00 и с 12:00 до 16:00 ч; вторая – с 04:00 до 08:00 и с 16:00 до 20:00 ч; третья – с 08:00 до 12:00 и с 20:00 до 24:00 ч – в течение всего похода. Мнения исследователей о степени негативного влияния различных боевых смен расходятся, однако большинство из них считает, что наиболее сложной по режиму несения для организма человека является 2 боевая смена, что связано с дискомфортом воздействия времени ночной вахты. В процессе проведения исследования степени утомляемости мы исходили из данных полученных от более 180 солдат ВМФ, имеющих опыт службы на подводном флоте. Отбор кандидатов в рамках исследования провел Военный инновационный технополис «ЭРА». Опыт службы на подводных кораблях и управления подводными робототехническими комплексами и сопоставительный анализ состояния здоровья у военнослужащих, которые в прошлом подвергали организм чрезмерным физическим нагрузкам в дальнем походе, в отличие от умеренно поддерживающих состояние работоспособности, спустя пролонгированный период свидетельствует о наличии значительного количества заболеваний у лиц первой группы [1].

В этой связи весьма актуальной является задача точного, адаптивного, неинвазивного и надежного мониторинга физиологического состояния

военнослужащих, выполняющих свои обязанности на автономных объектах, функционирующих вдалеке от центров управления, в частности экипажей летательных аппаратов, морских надводных и подводных средств. В работе проведен системный анализ известных методов, определены необходимые характеристики для диагностирования усталости, проведено анкетирование военнослужащих ВМФ, причастных к службе на кораблях подводного флота, на основе которого выполнено обоснование направлений исследований для их совершенствования в интересах разработки системы дистанционного сбора, анализа и оценки физиологического состояния военнослужащих в режиме реального времени.

Материалы и методы

Существующие методы можно разделить на две группы – инвазивные и неинвазивные методы исследования. Первая группа методов основана на инвазивных процедурах. Другими словами, инвазивные процедуры (от латинского слова *invado* – «вхожу») – это исследования, при которых воздействие на организм человека осуществляется сквозь естественные внешние барьеры организма, такие как кожа, слизистые оболочки. Простейшими инвазивными процедурами являются инъекции и анализы. Наиболее сложными инвазивными процедурами являются хирургические операции. Здесь рассматриваются только инвазивные диагностические процедуры, при которых инструменты или материалы вводятся непосредственно в органы или ткани человеческого тела с

целью получения точной информации о состоянии здоровья пациента.

Преимуществом инвазивной диагностики является получение детальной информации о состоянии внутренней структуры организма, что позволяет с уверенностью и максимальной достоверностью установить диагноз и оценить прогрессирование заболевания, если оно имеется.

Основными недостатками инвазивных методов диагностики являются необходимость использования специальных инструментов и оборудования, а также высокая квалификация медицинского персонала. Инвазивная диагностика может проводиться как в клиниках, так и в стационарах. К инвазивным методам диагностики относятся биопсия, эндоскопия и катетеризация.

Биопсия позволяет получить образец ткани или клеток для диагностического анализа. Это содействует выяснению на ранней стадии возникновения опухолей, инфекций или иных хронических заболеваний [2].

При эндоскопии применяют гибкую трубку с камерой на конце для визуального осмотра внутренних органов. Этот метод используется для обследования пищеварительного тракта, дыхательных путей, мочевого пузыря и других органов.

Катетеризация предполагает введение гибкой трубки (катетера) в кровеносный сосуд для получения информации о работе сердца и кровеносных сосудов.

Инвазивная диагностика применяется в основном для оценки функций внутренних органов, таких как печень,

почки или легкие, с помощью специальных процедур и тестов [3].

Вторая группа связана с неинвазивными методами исследования, применение которых не сопровождается нарушением целостности кожных покровов, слизистых оболочек и отдельных органов и не связано с внедрением в полости исследуемых органов различных средств.

Неинвазивные методы диагностики основаны на применении инструментальных средств исследований, которые условно можно разделить на анатомическую визуализацию и функциональный анализ

Методы первой группы применяют для визуализации и моделирования отдельных органов и тканей, отражения критических, важных изменений в них. По большей части эти методы связаны с технологиями лучевой диагностики, такими как рентгеноскопия, рентгенография, флюорография, компьютерная томография и многие другие. Обособленно выделяют методы радионуклидной диагностики (радиометрия, радиография, сканирование, сцинтиграфия, позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), радиоиммунные исследования), исследования с применением ультразвука (исследования в М-режиме, В-режиме, исследования в 3D-режиме, доплерография), магнитно-резонансную томографию (МРТ) и методы с использованием инфракрасного излучения – медицинскую термографию [4]. В эту группу можно внести и оптические методы, например дерматоскопию. С ее помощью существует возможность визуализировать любые кожные покровы человека.

Функциональная диагностика направлена на получение оценки функционирования организма, его отдельных органов и систем с учетом различных физиологических и патологических проявлений [5]. Исследования проводят, оказывая электрические, звуковые, механические и физические воздействия. Целью методов, основанных на применении электрического воздействия, является регистрация биоэлектрической активности человека. В медицине с человека часто снимают данные методами электрокардиографии (ЭКГ), электроэнцефалографии (ЭЭГ), электромиографии (ЭМГ) и другими [6].

Методы, в которых за основу взято звуковое воздействие, применяется для регистрации звуковых аномалий, связанных с функционированием организма. Одним из таких методов является фонокардиография (ФКГ).

В основе методов, связанных с применением механического воздействия, таких, например, как сфигмография, плетизмография, измерение артериального давления, скорости кровотока, исследование функций внешнего дыхания и др., проверяются симптомы заболеваний вплоть до установления первичного диагноза. Кроме того, выделяют современные методы, основанные на различных физических явлениях, например явлениях спектроскопии, которые лежат в основе пульсоксиметрии, оптических методов определения содержания глюкозы в крови и ряда других современных методов неинвазивного исследования [7].

Преимущества применения неинвазивных методик исследований –

отсутствие воздействия на организм человека через естественные внешние барьеры, но теряется достоверность в точности выявления заболевания. Следует отметить, что при определении диагнозов различных заболеваний могут быть применимы комбинированные методы исследований.

В рамках проводимого исследования проведена оценка утомляемости моряков ВМФ во время несения ими боевых смен в рамках создания внеамбулаторной системы контроля и диагностики. На основе опыта Международной организации гражданской авиации (ИКАО) были определены три критерия для оценки утомляемости экипажа: повышенное артериальное давление, высокая температура и частый пульс. Для проведения исследования была отобрана группа в количестве 180 человек, мужского пола – в возрасте от 20 до 27 лет. Некоторые из них постоянно занимаются физическим спортом.

Составной частью исследования являлось проведение мониторинга вышеуказанных параметров каждым моряком. В течение смены проводилось четырехкратное измерение параметров (перед началом первой смены, после окончания ее, перед второй сменой после ее окончания). Эксперимент проводился в течение месяца. В соответствии с графиком несения боевого дежурства в месяц приходится около 7–8 смен на человека. Заметно, что нагрузка распределена неравномерно. На взгляд моряков, самой сложной является 2 боевая смена, что связано с несением ночной службы.

Для экспериментального исследования были использованы следующие

приборы: термометр-пирометр для измерения температуры тела, электронный тонометр для измерения артериального давления и прибор для измерения частоты сердечного пульса. Для представления информации принято решение взять усредненные значения за месяц несения службы в режиме боевых смен. Одна боевая смена составляла 45 человек. Режим деятельности одной боевой смены состоит из последовательных четырех часовых вахт. Первая вахта несет службу с 00:00 до 04:00 и с 12:00 до 16:00 ч, вторая – с 04:00 до 08:00 и с 16:00 до 20:00 ч, третья – с 08:00 до 12:00 и с 20:00 до 24:00 ч, работало четыре боевые смены. Четвертая боевая смена включала в себя людей, работавших в первых трех сменах, повторяя график первой боевой смены.

Результаты и их обсуждение

Проведен анализ температуры тела военнослужащих каждой боевой смены после дежурства в двух вахтах. На рисунке 1 представлены средние значения измерений температуры тела военнослужащих первой смены до и после первой вахты.

Температуры военнослужащих перед заступлением на дежурство показывают, что все моряки здоровы и никаких факторов, оказывающих влияние на их утомление, нет. Они готовы к дежурству и знают, что делать (это говорит о высокой квалификации). По окончании несения вахты повторный замер показывает рост температуры в среднем на 3%, по сравнению с показателем нормы в 36,6 градуса. Рост температуры связан с трудностями в несении боевой вахты.

За вахту каждый военнослужащий обрабатывает большой массив информации, его концентрация повышена, зрительные нервы и организм постоянно находятся в напряжении. Помимо этого рост температуры показывает снижение концентрации, внимания, приводит к росту

утомляемости. По окончании вахты наступает отдых. Повторный замер производится через 4 ч, перед заступлением на вторую половину боевой смены. График температуры военнослужащих представлен ниже (рис. 2).

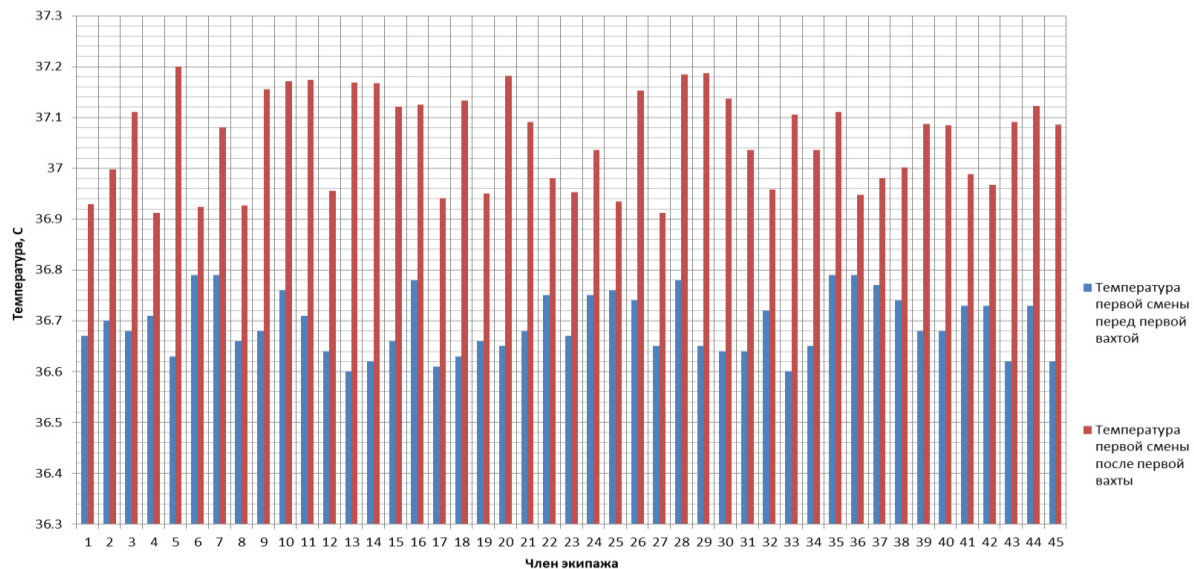


Рис. 1. Средняя температура военнослужащих первой боевой смены в первую вахту

Fig. 1. The average temperature of military personnel of the first combat shift in the first watch

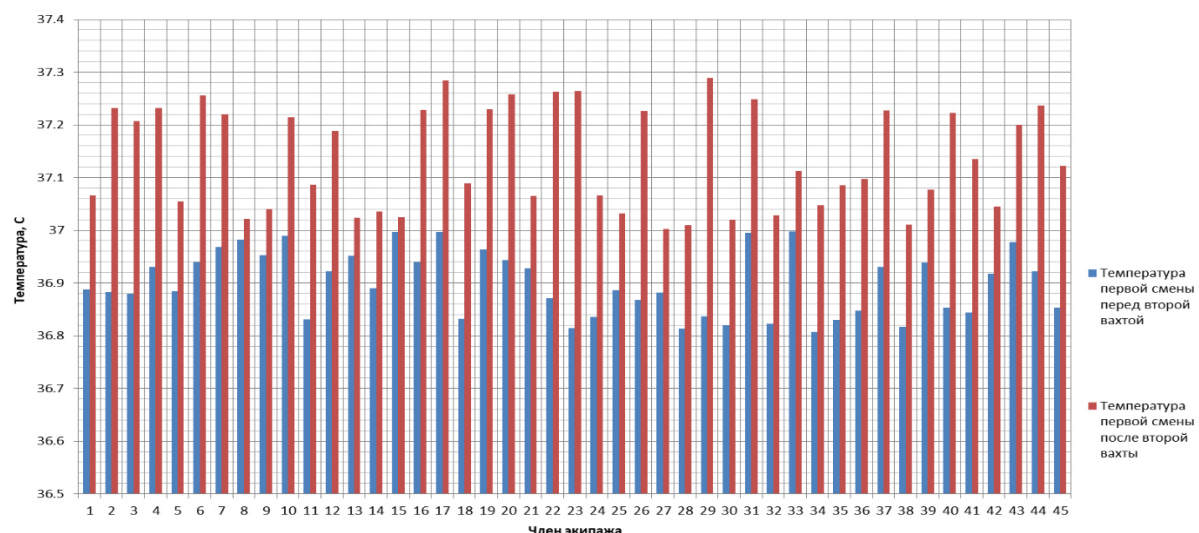


Рис. 2. Температура военнослужащих первой боевой смены во вторую вахту

Fig. 2. Temperature of the military personnel of the first combat shift in the second watch

Наблюдается уже повышенная температура военнослужащих, что говорит

о накопленной усталости, недостаточности отдыха. Во время несения вахты у

военнослужащих с более высокой температурой тела были замечены нарушения выполнения операции, усталость проявлялась в забывчивости, правильности выполнения последовательных действий, нагрузка на нервную систему приводила к общению между сослуживцами на повышенных тонах, что снижало концентрацию на определенной

задаче. По результатам измерения температуры остальных боевых смен можно отметить изначально повышенную температуру тела, что говорит о напряженности личного состава перед несением боевого дежурства. Рассмотрим измерения температуры второй боевой смены (рис. 3, 4) соответственно.

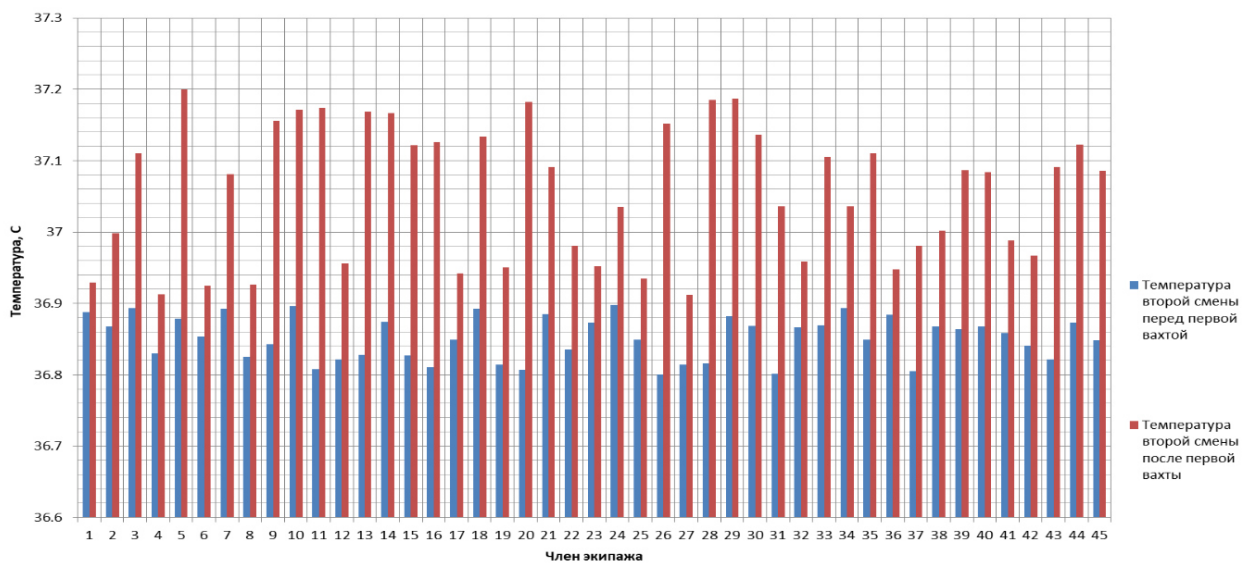


Рис. 3. Температура военнослужащих второй боевой смены в первую вахту

Fig. 3. Temperature of the military personnel of the second combat shift in the first watch

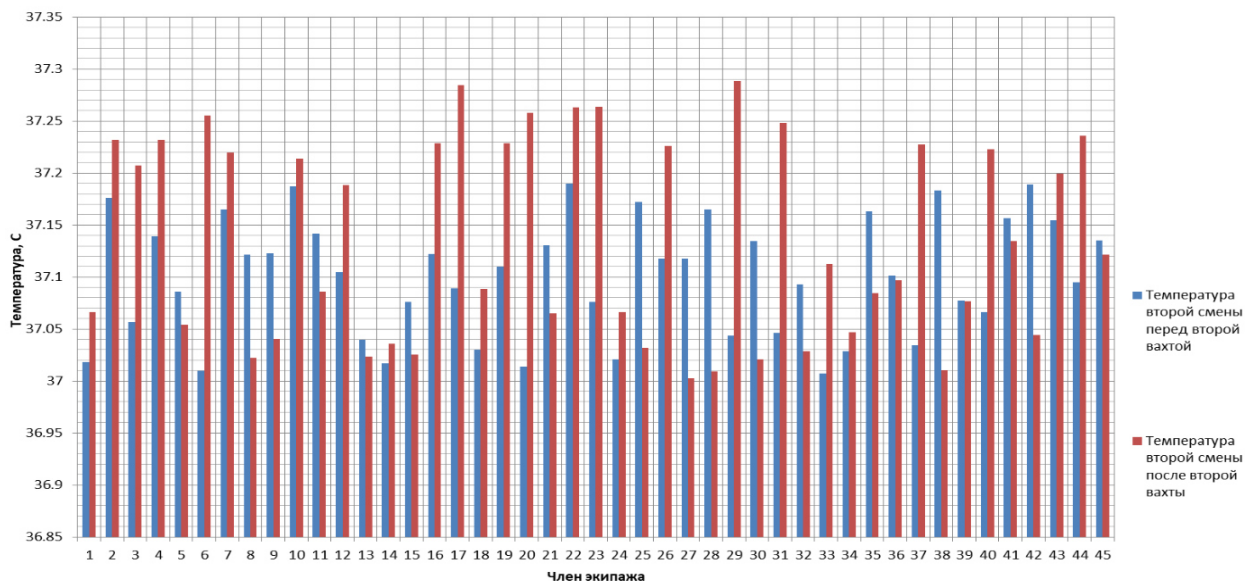


Рис. 4. Температура военнослужащих второй боевой смены во вторую вахту

Fig. 4. Temperature of the military personnel of the second combat shift in the second watch

После второй боевой смены можно увидеть повышенную нагрузку на личный состав в течение всей вахты. Корреляционная зависимость близка к 0, поскольку нагрузка в смене распределяется на всю смену. Рост температуры подтверждает, что при выполнении

сложной работы, обработке массива информации организм реагирует на это путем изменения температуры тела испытуемого. Об этом говорят и результаты измерения температуры третьей боевой смены (рис. 5, 6).

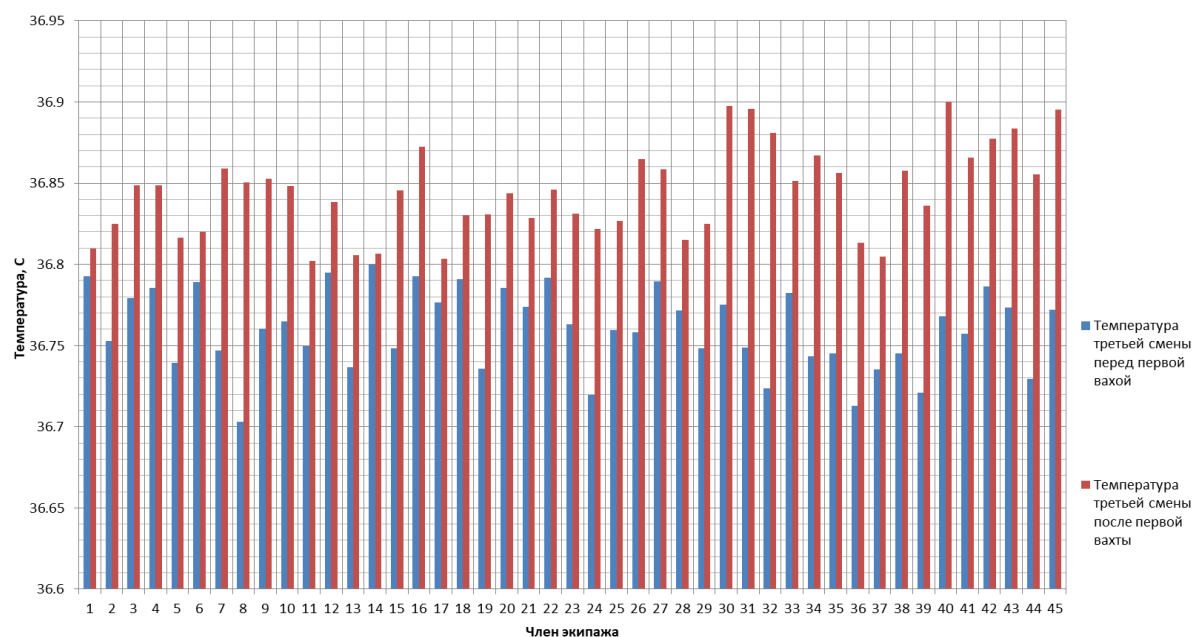


Рис. 5. Температура военнослужащих третьей боевой смены в первую вахту

Fig. 5. Temperature of the military personnel of the third combat shift in the first watch

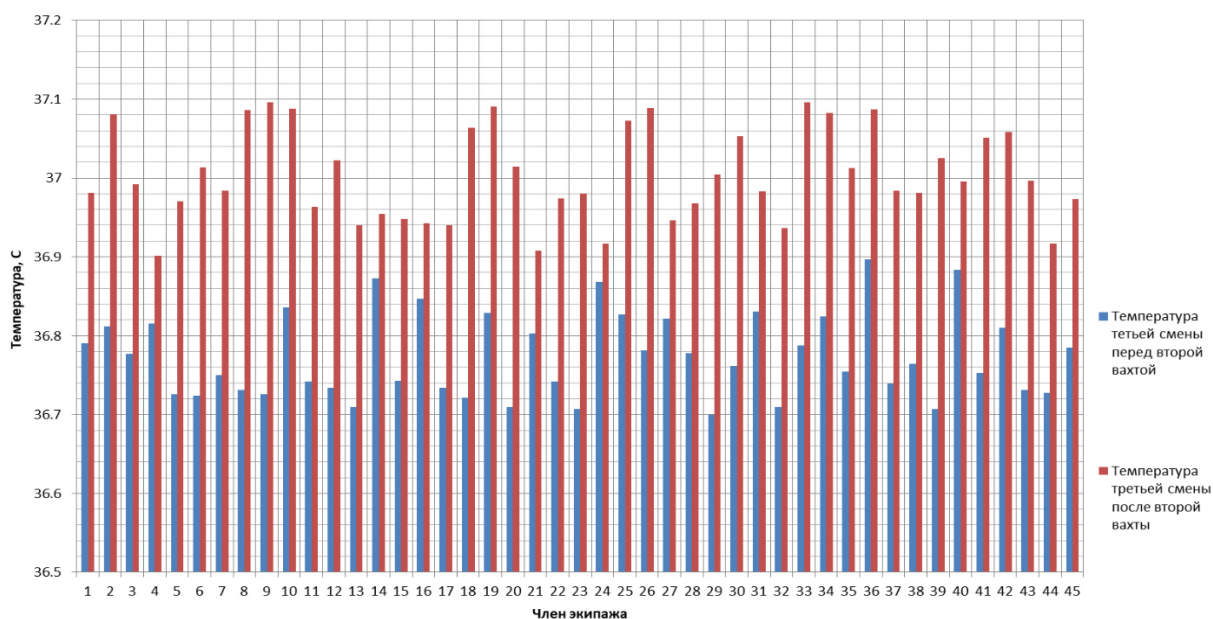


Рис. 6. Температура военнослужащих третьей боевой смены во вторую вахту

Fig. 6. Temperature of the military personnel of the third combat shift in the second watch

Рассмотрим результаты измерения температуры тел четвертой боевой смены (рис. 7, 8).

За весь период наблюдения к врачу с симптомами недомогания обратилось лишь четверо военнослужащих, трое из которых находились во второй боевой смене, а один находился сначала в

первой боевой смене, а после заступил и с четвертой боевой сменой, последний обратившийся имел самое слабое здоровье из всех участников исследования. Отсутствие активности и резкое повышение нагрузки в двух сменах – все это сказалось на его состоянии.

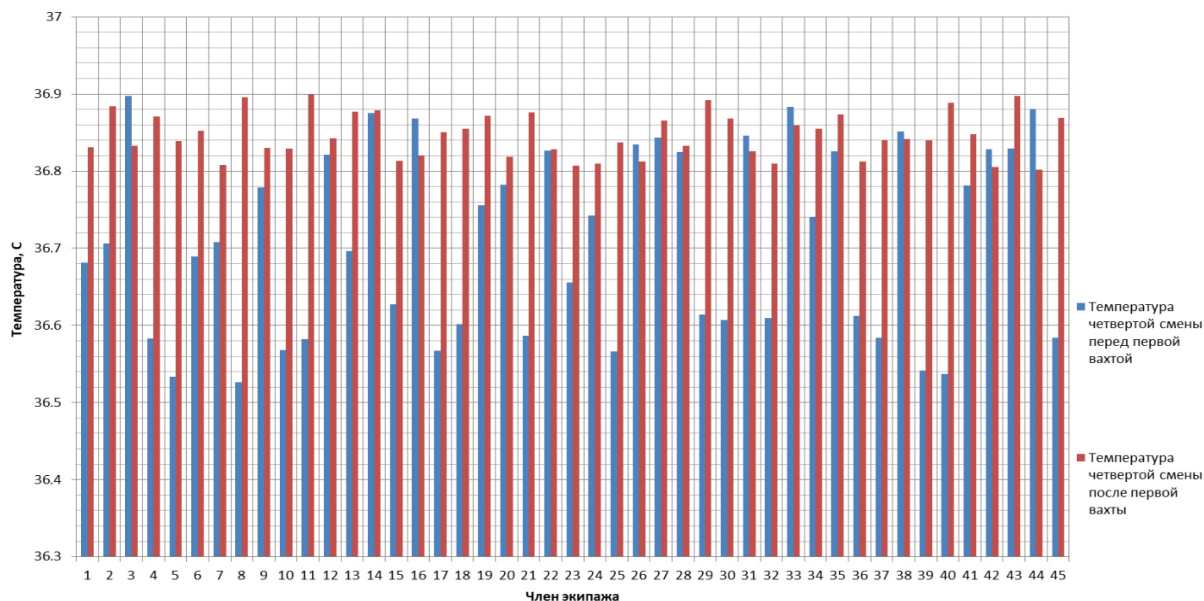


Рис. 7. Температура военнослужащих четвертой боевой смены в первую вахту

Fig. 7. Temperature of the military personnel of the fourth combat shift in the first watch

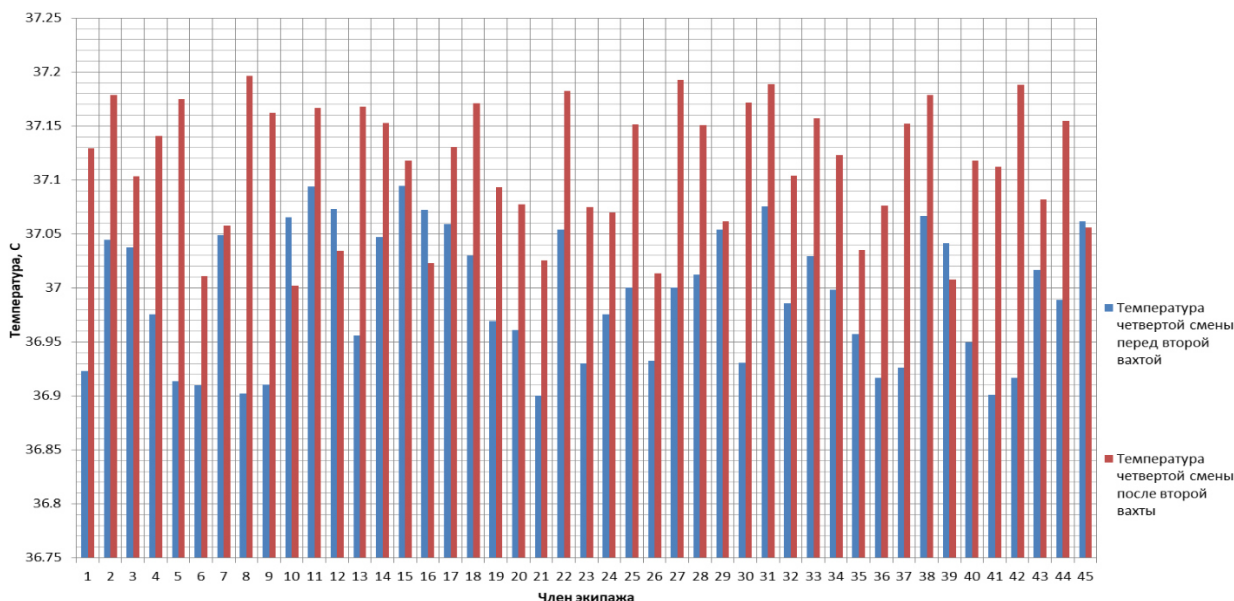


Рис. 8. Температура военнослужащих четвертой боевой смены во вторую вахту

Fig. 8. Temperature of the military personnel of the fourth combat shift in the second watch

В таблице 1 представлен фрагмент давления 10 человек перед началом и по-
результатов измерений артериального сле каждой вахты в боевой смене.

Таблица 1. Измерения артериального давления военнослужащих боевых смен

Table 1. Blood pressure measurements of military personnel in combat shifts

АД первой смены перед первой вахтой	АД первой смены после первой вахты	АД первой смены перед второй вахтой	АД первой смены после второй вахты	Экипаж
117/79	123/89	112/88	129/72	1 человек
117/63	127/89	114/88	128/79	2 человек
115/61	128/80	119/90	120/82	3 человек
101/79	125/89	112/89	129/73	4 человек
109/69	125/81	116/76	122/85	5 человек
117/76	122/83	116/82	127/73	6 человек
106/66	124/80	113/82	127/76	7 человек
111/67	124/81	114/73	130/81	8 человек
119/77	124/88	110/90	124/77	9 человек
100/67	122/88	116/72	122/88	10 человек
АД второй смены перед первой вахтой	АД второй смены после первой вахты	АД второй смены перед второй вахтой	АД второй смены после второй вахты	Экипаж
117/79	134/71	130/83	140/83	1 человек
117/63	136/86	127/82	135/87	2 человек
115/61	138/74	125/75	137/91	3 человек
101/79	134/88	129/80	142/86	4 человек
109/69	131/80	125/77	140/72	5 человек
117/76	139/82	128/87	142/89	6 человек
106/66	140/74	126/79	136/77	7 человек
111/67	133/89	130/70	137/90	8 человек
119/77	134/74	125/72	143/76	9 человек
100/67	134/76	128/82	143/89	10 человек
АД третьей смены перед первой вахтой	АД третьей смены после первой вахты	АД третьей смены перед второй вахтой	АД третьей смены после второй вахты	Экипаж
122/86	141/90	105/66	128/88	1 человек
128/86	141/89	114/62	126/80	2 человек
129/90	138/90	102/65	125/81	3 человек
130/89	138/89	106/69	130/81	4 человек
121/85	140/89	108/65	130/86	5 человек
130/89	140/89	104/68	126/82	6 человек
128/81	138/90	105/62	126/80	7 человек
127/88	141/89	111/62	128/87	8 человек
126/88	138/90	101/61	128/88	9 человек
126/87	140/90	108/66	129/88	10 человек

АД четвертый смены перед первой вахтой	АД четвертой смены после первой вахты	АД четвертой смены перед второй вахтой	АД четвертой смены после второй вахты	Экипаж
110/61	130/84	103/87	130/85	1 человек
115/61	129/85	130/65	126/83	2 человек
108/65	129/83	128/73	140/87	3 человек
106/65	125/80	129/61	137/90	4 человек
112/62	130/86	112/70	136/84	5 человек
115/67	129/85	113/78	128/84	6 человек
104/67	128/86	109/78	138/82	7 человек
108/63	127/88	111/88	122/86	8 человек
100/60	127/88	112/66	124/89	9 человек
114/69	126/87	105/90	137/84	10 человек

Из таблицы 1 видно, что артериальное давление военнослужащих после первой и второй вахты повышается, что подтверждает подобные исследования ИКАО [8]. Существенное различие в значениях артериального давления боевых смен показывает разницу во времени несения вахты [9]. Так самые высокие показатели артериального давления были зафиксированы у военнослужащих второй боевой смены, поскольку их вахты по 4 часа приходятся на ночное время. В ночное время биологическим часам довольно тяжело подтолкнуть организм на выполнение сложных операций, связанных с повышенным вниманием, поскольку военнослужащие в данный момент напрягаются в своей работе, это разгоняет кровь по организму, что и приводит к росту артериального давления с последующим обратным эффектом в виде роста утомляемости. По общему осмотру военнослужащих наибольшее утомление приходится на военнослужащих второй боевой смены. Это также подтверждают исследования частоты сердечных сокращений внутри каждой

боевой смены. График представлен ниже (рис. 9).

Показатели частоты ударов минуту членов экипажа № 1, № 2, № 3 взяты из второй боевой смены. Члены экипажа № 4, № 5, № 6 представляют первую боевую смену, № 7, № 8, № 9 представляют третью боевую смену. Последние три члена экипажа несли вахты в первой и четвертой боевых сменах. В течение несения вахты пульс боевой смены № 2 только учащался, к окончанию вахты он составлял в среднем 100 ударов в минуту, что подтверждает повышенное артериальное давление и температура тела. Самые близкие показатели к норме были выявлены у боевой смены № 1. Связано это с несением вахт в первой половине дня. Третья смена несет одну вахту днем, вторую – перед сном. Четвертая смена повторяет несение первой смены, но состоит из членов экипажей еще и первых трех боевых смен. Мы видим, что перед вахтой их показания выше, чем у первой смены, но ниже, чем у второй и третьей смены [10].

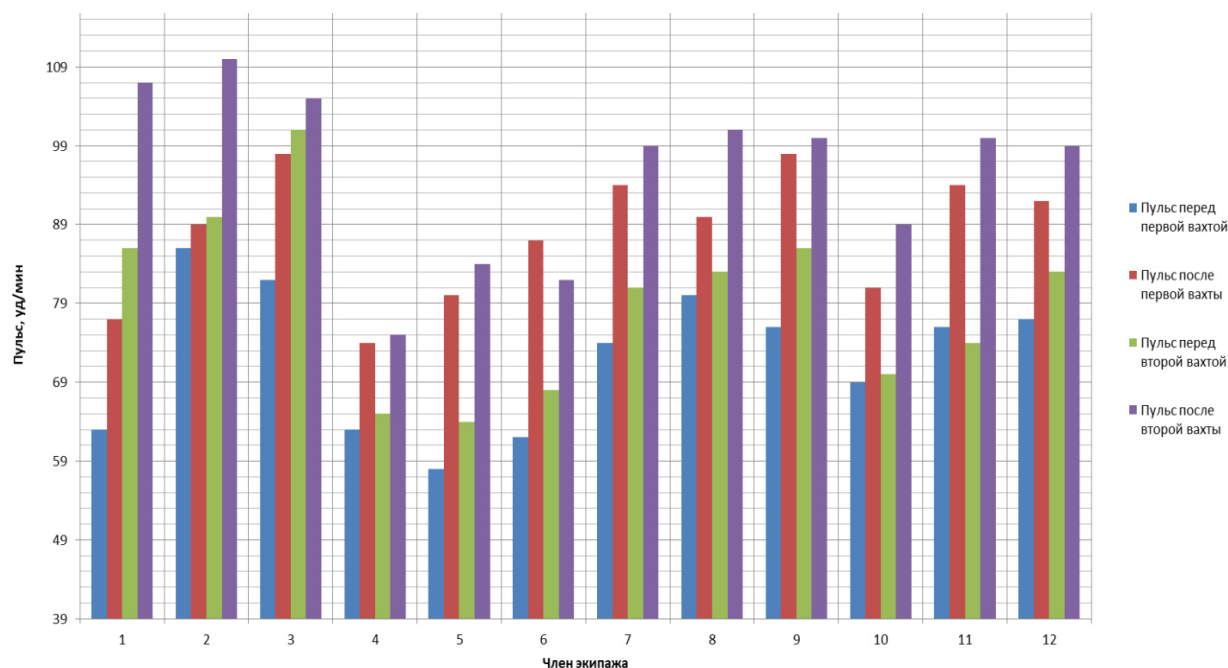


Рис. 9. График частоты ударов в минуту членов экипажа

Fig. 9. Graph of the frequency of beats per minute of the crew members

По итогам можно отметить зависимость исследуемых показателей от времени несения вахты и их связь с ростом утомляемости, поэтому для разработки систем мониторинга за военнослужащими следует производить системный анализ и объективную оценку, которые помимо исследований должны включать в себя:

- разработку новых и внедрение усовершенствованных методов контроля состояния военнослужащих;
- заимствование и объединение знаний из медицины, физиологии, биофизики, биомеханики, биоинженерии, электроники, схемотехники и программирования, которые позволяют разработать эффективные методики контроля физического состояния и утомляемости военнослужащих;
- разработку новых методов, технологий и средств для контроля состояния военнослужащих [11].

Рассмотрим одну из систем мониторинга RT-PSM, с помощью которой предоставляется информация руководителям небольших подразделений, о безопасности солдат и их работоспособности.

Например, для изменения рациона питания и управления запасами жизнедеятельности в организме человека, физической подготовкой и гидратацией для дальнейшей оптимизации производительности может быть использована информация о темпе работы, тепловой нагрузке и управлении рабочей нагрузкой на организм [12]. Четыре параметра производительности солдат неразрывно взаимосвязаны; продолжающиеся исследования приводят к более глубокому пониманию более сложных физиологических взаимосвязей, которые также непосредственно влияют на оптимизацию солдат (рис. 10).



1. Головные датчики ЭЭГ и оксиметрии на ленте.
2. Акустический датчик контроля уровня стресса по голосу и речевому контенту.
3. Датчики позиции и положения: 3-х осный акселерометр, GPS, магнитометр, высотомер.
4. ЭКГ датчик и датчик импеданса (сопротивления) грудной клетки.
5. Температурный датчик (ядра тела и кожной температуры).
6. Инфракрасный датчик (NIR диапазона) для определения pH тканей, уровня глюкозы и лактатов.
7. Запястный датчик траектории руки.
8. Датчик веса – опоры-движения.
9. Беспроводной модуль обмена данными.

Рис.10. RT-PSM система носимых датчиков мониторинга физиологического состояния военнослужащих [13]

Fig. 10. RT-PSM system of wearable sensors for monitoring the physiological state of military personnel [13]

Недостатком такой системы является ее негабаритность, что в стесненных условиях подводных средств доставит только неудобство.

Американское агентство по исследованиям в военных целях армии США DARPA разработало особые аппликационные датчики (рис. 11).

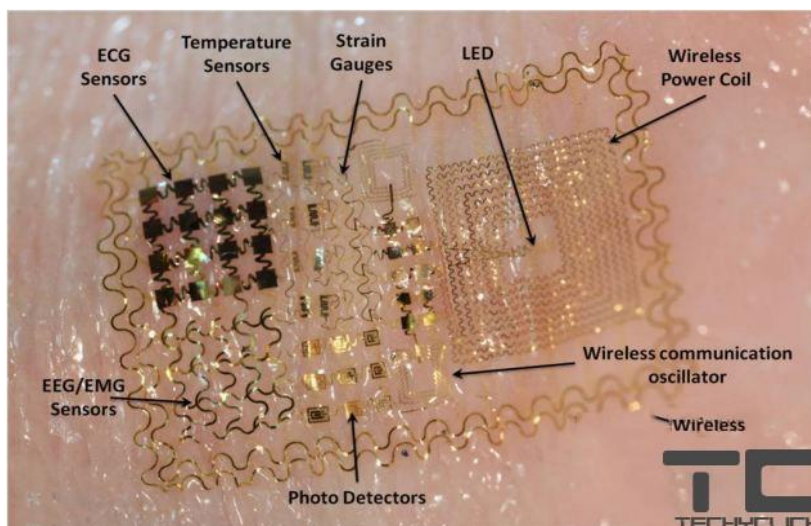


Рис. 11. Архитектура аппликационного мультисенсора с детекцией ЭКГ, ЭЭГ, ЭМГ, физической нагрузки, температуры, фотоплетизмографии и беспроводной передачей данных

Fig. 11. Architecture of an application multi-sensor with ECG, EEG, EMG, physical activity, temperature, photoplethysmography and wireless data transmission

Ведущим разработчиком аппликационных датчиков является профессор Джон А. Роджерс из Северо-Западного университета Иллинойса, США. Аппликационные мультидатчики способны считывать определенные показания жизнедеятельности, не стесняя движения, не принося дискомфорта носителю [14].

Для армии России на данный момент в обиход входит система «Стрелец», состоящая из базовой станции на командном пункте и браслетов с датчиками падения, сердцебиения, российской ГЛОНАСС, дополняется все это системой охраны периметра (рис. 12).



Рис.12. Браслет комплекса «Стрелец» [15]

Fig. 12. The bracelet of the Sagittarius complex [15]

Система безопасности «Стрелец-Интеграл», в которую и входит браслет, служит для решения задачи охраны периметра, отслеживания за контролем доступа и его управлением, мониторингом системы пожаротушения, оповещения и связи с браслетом [16]. Приоритетным для военного флота, на наш взгляд, выглядит основа в виде применения браслетов с отслеживаемыми показаниями на центральном посту или медицинском

блоке. Помимо этого, не стоит забывать и о разработке программно-вычислительных средств и алгоритмов, проведении математического моделирования.

Математическое моделирование, разработка алгоритмов и аппаратные решения являются основными задачами для разработки полезной системы мониторинга военнослужащих [17]. Для восребования данной разработки система должна предоставлять полезную информацию и только ту, которая необходима во время обучения или выполнения миссии. Для первоначального применения мониторинга термической деформации должны протестированы различные прогностические подходы, включая оценку температуры тела и окружающей среды, оценку скорости метаболизма, частоту сердечных сокращений, походку и осанку и другие легко получаемые данные [18].

На рисунке 13 показана структурная схема измерительной системы. Система разработана таким образом, чтобы принимать несколько входных сигналов для измерения физиологических параметров человека и внешних влияющих факторов, таких как температура, частота сердечных сокращений и обнаружение любого падения, температура окружающей среды, уровень шума, уровень освещенность.

Конструкция является модульной, что позволяет довольно легко и просто добавлять дополнительные датчики для измерения и контроля других параметров.

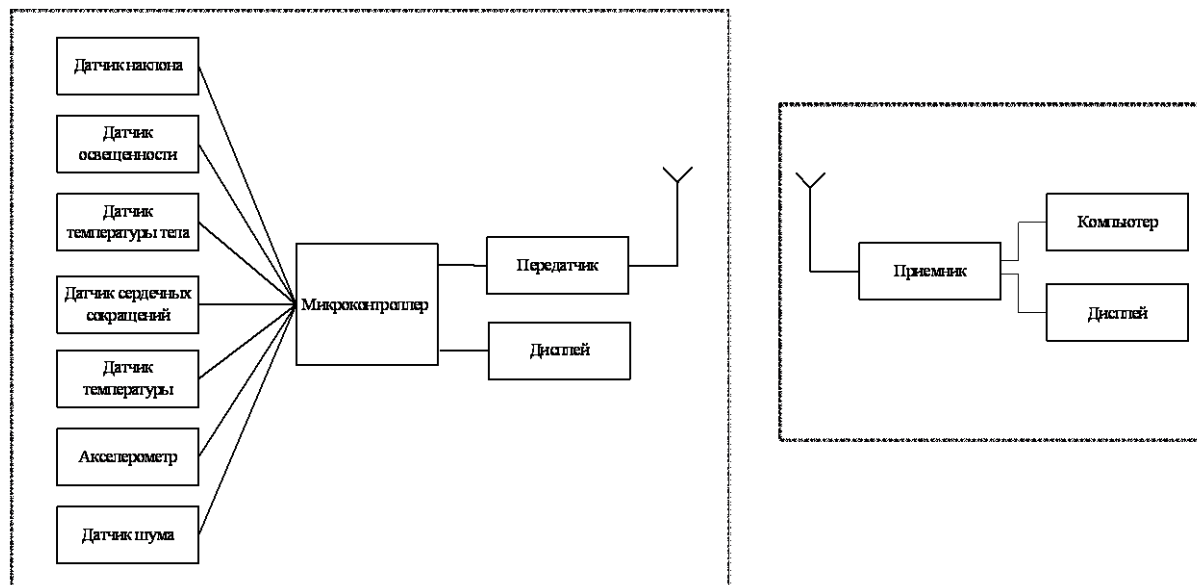


Рис. 13. Структурная схема измерительной системы

Fig. 13. Block diagram of the measuring system

Используемый датчик температуры выдает аналоговый сигнал, который передается на аналоговый вход микроконтроллера.

В системе для измерения температуры тела человека будет использоваться датчик температуры DS600 с погрешностью 0,5°C производства Maxim – Dallas Semiconductor [19]. Датчик выдает аналоговый выходной сигнал в зависимости от измеренной температуры. Это напряжение должно быть измерено микроконтроллером с помощью 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Для преобразования полученной информации с датчика температуры воспользуемся следующей формулой:

$$U = \frac{ADC_{рез} \cdot U_{э}}{4095}, \quad (1)$$

$$T = \frac{U - U_{см}}{6,45}, \quad (2)$$

где $ADC_{рез}$ – полученное напряжение, мВ; $U_{э}$ – эталонное напряжение, 2400 мВ; 4095 – разрядность; U – расчетное напряжение, мВ; $U_{см}$ – напряжение смещения, 509 мВ; T – температура, °C; 6,45 – линейный выходной сигнал, мВ/°C.

Уровень освещенности в системе будет измеряться с помощью фоторезистора GL5516, который подключен через резистор.

Для измерения уровня шума используется аналоговый датчик KY-037.

В системе используется акселерометр ADXL213. Это обеспечивает двухосевой отклик, измеряя ускорения до $\pm 2g$. Акселерометр выдает цифровой сигнал, пропорциональный ускорению. Ускорение может быть определено путем измерения длительности положительного импульса ($t1$) и периода ($t2$) (рис. 14).

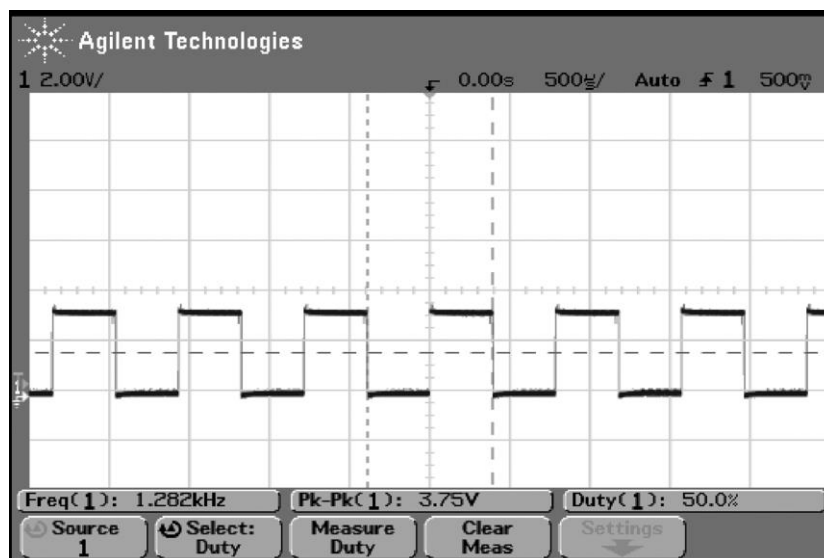


Рис. 14. Форма сигнала с акселерометра на осциллографе

Fig. 14. The shape of the signal from the accelerometer on the oscilloscope

На рисунке 14 показана типичная форма сигнала датчика удара в осциллографе, когда пользователь стоит в нормальном положении, значение рабочего цикла составляет около 50%.

Сигнал каждого датчика отбирается с заданной скоростью с помощью алгоритмов, управляемых прерываниями [15].

Можно сделать вывод, что современные носимые устройства должны обладать такими параметрами, как быстродействие, малое потребление заряда аккумулятора и компактность. Последний пункт можно достигнуть за счет использование устройств поверхностного монтажа [16].

Создание систем и устройств мониторинга необходимо в современном мире для предотвращения катастроф и увеличения работоспособности военнослужащих.

Выводы

Таким образом, мониторинг физиологического состояния и степени военнослужащих является перспективным направлением в научно-методическом, научно-биологическом и техническом, которое позволит отследить индивидуальные особенности, систематизировать работу и управление военнослужащими.

В ходе проводимых исследований и изучения проблемы систем мониторинга военнослужащих рассматривалась одна из зарубежных систем. Предложен один из возможных аппаратных способов сбора физиологических данных и оценки факторов, влияющих на утомляемость военнослужащих.

На основе предложенной структурной схемы будут реализованы алгоритмы работы и математическое моделирование.

Список литературы

1. Пугачев И. Ю. Инновации физической подготовки экипажей атомных подводных лодок // Вестник Мордовского университета. 2015. № 3. С. 31–41. <https://doi.org/10.15507/VMU.025.201503.031>
2. Руководство для регламентирующих органов: системы управления рисками, связанными с утомляемостью. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1728394330&tld=ru&lang=ru&name=9966_cons_ru (дата обращения: 20.06.2024).
3. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation / Sh. Patel, H. Park, P. Bonato, L. Chan, M. Rodgers // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2012. N 9. P. 21. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-21>
4. Дмитриев С. П., Степанов О. А. Нелинейные алгоритмы комплексной обработки избыточных измерений // Известия Российской академии наук. 2000. № 4. С. 52–61.
5. Тарасенко Е. А. Развитие технологических инноваций в области mHealth: возможности для врачей для профилактики заболеваний, диагностики и консультирования пациентов // Врач и информационные технологии. 2014. № 4. С. 59–64.
6. Церковский А. Л. Современные взгляды на проблему стрессоустойчивости // Вестник Витебского государственного медицинского университета. 2021. Т. 10, № 1. С. 6–19.
7. Saw A. E., Main L. C., Gastin P. B. Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review // Br. J. Sports. Med. 2016. N 50(5). P. 281–291. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094758>
8. Зибарев Е. В., Иммель О. В., Никонова С. М. Напряженность труда и утомление пилотов гражданской авиации на современных типах воздушных судов // Медицина труда и промышленная экология. 2019. Т. 59, № 9. С. 630–632.
9. Chernjak S. V. Psycho-physiological aspects of professional activities of scamen-submariners OF Russian NAVY // Актуальные проблемы физической подготовки силовых структур. 2008. № 2. С. 65.
10. Сошкин П. А. Стрессоустойчивость и адаптивные возможности у военно-морских специалистов с признаками профессионального выгорания // Морская медицина. 2021. Т. 7, № 3. С. 62–70.
11. Hao Y., Foster J. Wireless sensor networks for health monitoring applications // Physiological Meas. 2008. Vol. 29, N 11. P. R27–R56.
12. Pantelopoulos A., Bourbakis N. Design of the new prognosis wearable system-prototype for health monitoring of people at risk // Advances in Biomedical Sensing, Measurements, Instrumentation and Systems. Springer, 2009. Vol. 55. P. 29–42.

13. Kuravsky L. S., Yuryev G. A. A novel approach for recognizing abnormal activities of operators of complex technical systems: three non-standard metrics for comparing performance patterns // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. 2020. Vol. 11, N 4. P. 119–136.

14. Модель пилота как средство валидации перспективной кабины и бортового оборудования воздушного судна / И. И. Грешников, Л. С. Куравский, С. Д. Логачев, И. А. Махортов // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Vol. 12, N 4. P. 101–104.

15. Оценка эффективности мероприятий по поддержанию функционального состояния военно-морских специалистов в ходе решения экипажем задач в море по состоянию центральной нервной системы / Ю. Р. Ханкевич, К. В. Сапожников, А. В. Седов, В. Г. Белов, Е. В. Ершов, С. А. Парфенов // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур. 2016. № 1. С. 171–177.

16. Continuous inference of psychological stress from sensory measurements collected in the natural environment / K. Plarre, A. Raij, M. Hossain, A. Ali, M. Nakajima, M. al’Absi // Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Chicago, IL, USA: IEEE, 2011. P. 97–108.

17. MConverse: Inferring Conversation Episodes from Respiratory Measurements Collected in the Field / M. M. Rahman, A. A. Ali, K. Plarre, A. Raij, M. al’Absi [et al.] // Proceedings of Wireless Health. San Diego, CA, USA, 2011. P. 1–10.

18. Privacy risks emerging from the adoption of innocuous wearable sensors in the mobile environment / A. Raij, A. Ghosh, S. Kumar, M. Srivastava // Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems. Vancouver, Canada, 2011 P. 11–20.

19. ESC working group on e-cardiology position paper: use of commercially available wearable technology for heart rate and activity tracking in primary and secondary cardiovascular prevention-in collaboration with the european heart rhythm association, european association of preventive cardiology, association of cardiovascular nursing and allied professionals, patient forum, and the digital health committee / M. T. Jensen, R. W. Treskes, E. G. Caiani, R. Casado-Arroyo, M. R. Cowie, P. Dilaveris, D. Duncker, M. di Rienzo, I. Frederix, N. de Groot [et al.] // European Heart Journal – Digital Health. 2021. Vol. 2, is. 1.

References

1. Pugachev I. Yu. Innovations in physical training of crews of nuclear submarines. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Bulletin of the Mordovian University*. 2015;(3):31–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/VMU.025.201503.031>

2. Guidance for regulatory authorities: Fatigue risk management systems. (In Russ.) Available at.: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1728394330&tld=ru&lang=ru&name=9966_cons_ru (accessed 20.06.2024).
3. Patel S., Park H., Bonato P., Chan L., Rodgers M. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2012;(9):21. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-21>
4. Dmitriev S.P., Stepanov O.A. Nonlinear algorithms for complex processing of redundant measurements. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2000;(4):52–61. (In Russ.)
5. Tarasenko E.A. Development of technological innovations in the field of mHealth: opportunities for doctors to prevent diseases, diagnose and consult patients. *Vrach i informatsionnye tekhnologii = Doctor and Information Technologies*. 2014;(4):59–64. (In Russ.)
6. Tserkovskiy A.L. Modern views on the problem of stress resistance. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Vitebsk State Medical University*. 2021;10(1):6–19. (In Russ.)
7. Saw A.E., Main L.C., Gastin P.B. Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review. *Br. J. Sports. Med.* 2016;(50):281–291. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094758>
8. Zibarev E.V., Immel O.V., Nikonova S.M. Labor intensity and fatigue of civil aviation pilots on modern types of aircraft. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Labor Medicine and Industrial Ecology*. 2019;59(9):630–632. (In Russ.)
9. Chernjak S.V. Psycho-physiological aspects of professional activities of scamed submariners of the Russian NAVY. *Aktual'nye problemy fizicheskoi podgotovki silovykh struktur = Actual Problems of Physical Training of Military Structures*. 2008;(2):65.
10. Soshkin P.A. Stress resistance and adaptive capabilities of naval specialists with signs of professional burnout. *Morskaya meditsina = Marine Medicine*. 2021;7(3):62–70. (In Russ.)
11. Hao Y., Foster J. Wireless sensor networks for health monitoring applications. *Physiological Meas.* 2008;29(11):R27–R56.
12. Pantelopoulos A., Bourbakis N. Design of the new prognosis wearable system-prototype for health monitoring of people at risk. In: *Advances in Biomedical Sensing, Measurements, Instrumentation and Systems*. Vol. 55. Springer; 2009. P. 29–42.
13. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. A novel approach for recognizing abnormal activities of operators of complex technical systems: three non-standard metrics for comparing performance patterns. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2020;11(4):119–136.

14. Greshnikov I.I., Kuravsky L.S., Logachev S.D., Makhorov I.A. The pilot model as a means of validating a promising cockpit and on-board equipment of an aircraft. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(4):101–104. (In Russ.)
15. Khankevich Yu.R., Sapozhnikov K.V., Sedov A.V., Belov V.G., Ershov E.V., Parfenov S.A. Evaluation of the effectiveness of measures to maintain the functional state of naval specialists in the course of solving tasks by the crew at sea according to the state of the central nervous system. *Aktual'nye problemy fiziche-skoi i spetsial'noi podgotovki silovykh struktur = Actual Problems of Physical and Special Training of Law Enforcement Agencies*. 2016;(1):171–177. (In Russ.)
16. Plarre K., Raij A., Hossain M., Ali A., Nakajima M., al'Absi M. Continuous inference of psychological stress from sensory measurements collected in the natural environment. In: *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. Chicago, IL, USA: IEEE; 2011. P. 97–108.
17. Rahman M.M., Ali A.A., Plarre K., Raij A., al'Absi M., et. al. MConverse: Inferring Conversation Episodes from Respiratory Measurements Collected in the Field. In: *Proceedings of Wireless Health*. San Diego, CA, USA; 2011. P. 1–10.
18. Raij A., Ghosh A., Kumar S., Srivastava M. Privacy risks emerging from the adoption of innocuous wearable sensors in the mobile environment. In: *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems*. Vancouver, Canada; 2011. P. 11–20.
19. Jensen M.T., Treskes R.W., Caiani E.G., Casado-Arroyo R., Cowie M.R., Dilaveris P., Duncker D., di Rienzo M., Frederix I., de Groot N., et al. ESC working group on e-cardiology position paper: use of commercially available wearable technology for heart rate and activity tracking in primary and secondary cardiovascular prevention-in collaboration with the european heart rhythm association, european association of preventive cardiology, association of cardiovascular nursing and allied professionals, patient forum, and the digital health committee. *European Heart Journal – Digital Health*. 2021;2(1).

Информация об авторах / Information about the Authors

Ларина Евгения Александровна, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ev.larina19@gmail.com,
Researcher ID: KLY-4764-2024,
ORCID: 0009-0006-8517-2224

Eugenia A. Larina, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: ev.larina19@gmail.com,
Researcher ID: KLY-4764-2024,
ORCID: 0009-0006-8517-2224

Трехлебов Андрей Сергеевич, инженер управления пусконаладочных работ по автоматическим системам управления технологическими процессами, Филиал АО «Атомтехэнерго» в Народной Республике Бангладеш, г. Ишварди, Народная Республика Бангладеш, e-mail: TrekhlebovAS@smolate.ru, Researcher ID: KLD-2365-2024, ORCID: 0009-0008-8989-0105

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladia58@mail.ru, Researcher ID: J-8844-2013, ORCID: 0000-0003-2578-0026

Andrey S. Trekhlebov, Engineer of the Automatic Process Control Systems Pre-Commissioning Department, Branch of JSC "Atomtehenergo" in the People's Republic of Bangladesh, Ishwardi, People's Republic of Bangladesh, e-mail: TrekhlebovAS@smolate.ru, Researcher ID: KLD-2365-2024, ORCID:0009-0008-8989-0105

Vladimir G. Andronov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladia58@mail.ru, Researcher ID: J-8844-2013, ORCID: 0000-0003-2578-0026

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-206-222>

УДК 51-7:616.314-089.23-021.4

Планирование и многоаспектный анализ качества протезирования зубов

А. А. Маслак¹ ✉, А. С. Арутюнов², Д. И. Грачев², С. А. Муслов²

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

² Российский университет медицины Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Долгоруковская, д. 4, г. Москва 127006, Российская Федерация

✉ e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Резюме

Цель исследования состоит в многоаспектном анализе «качества жизни» пациентов до и после протезирования зубов. Необходимо оценить качество жизни пациентов после протезирования в зависимости от вида протезов, пола, возраста пациентов и дать рекомендации по выбору метода протезирования.

Методы. Зубное протезирование проводилось в клинике МГМСУ им. А. И. Евдокимова, испытывались четыре вида протезов: классический традиционный протез (TR) и три типа цифровых протезов (D1, D2, D3). На основе разработанного опросника OHIP-20 DG оценивалось качество жизни пациентов до протезирования, сразу после протезирования и через шесть месяцев. Качество жизни пациентов после протезирования определялось в рамках теории латентных переменных. С использованием четырехфакторного дисперсионного анализа оценивалось влияние на качество жизни вида протезов, продолжительности адаптации после протезирования, пола и возраста пациентов.

Результаты. В рамках теории латентных переменных показано, что разработанный опросник можно использовать в качестве измерительного инструмента для анализа влияния исследуемых факторов на качество жизни пациентов после протезирования. Благодаря использованию четырехфакторного дисперсионного анализа повышена точность статистического анализа и выявлена статистическая значимость четырех источников дисперсии. На основе результатов статистического анализа разработаны рекомендации по выбору метода протезирования.

Заключение. Проведен многоаспектный анализ исследуемых факторов, влияющих на качество жизни пациентов после протезирования зубов. Качество жизни пациентов статистически значимо увеличивается после протезирования. Благодаря использованию четырехфакторной модели дисперсионного анализа повышена точность оценок качества жизни пациентов. Для женщин рекомендован метод протезирования (D1), для мужчин рекомендован метод протезирования (D3). Полученные рекомендации важны для использования в стоматологической практике.

Ключевые слова: стоматологическое ортопедическое протезирование; качество жизни; латентные переменные; модель Раша; многофакторный дисперсионный анализ.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» и руководству Научно-образовательного института непрерывного медицинского образования ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» им. Н. Д. Ющука за предоставление необходимых ресурсов для проведения данного исследования.

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

Для цитирования: Планирование и многоаспектный анализ качества протезирования зубов / А. А. Маслак, А. С. Арутюнов, Д. И. Грачев, С. А. Муслов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С.206–222. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-206-222>

Поступила в редакцию 27.07.2024

Подписана в печать 15.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Design and multidimensional analysis of dental orthopedic prosthetics quality

Anatoly A. Maslak¹✉, Anatoly S. Arutyunov²,
Dmitry I. Grachev², Sergey A. Muslov²

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

² Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation
4 Dolgorukovskaya Str., Moscow 127006, Russian Federation

✉ e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is a multidimensional analysis of the "quality of life" of patients before and after dental prosthetics. It is necessary to assess the quality of life of patients after prosthetics, depending on the type of prostheses, gender, and age of patients and give recommendations on the choice of prosthetics method.

Methods. Dental prosthetics was performed at the clinic of the Moscow State Medical University named after A. I. Evdokimov, four types of prostheses were tested - the classic traditional prosthesis (TR) and three types of digital prostheses (D1, D2, D3). Based on the developed OHIP-20 DG questionnaire, the quality of life of patients was assessed before prosthetics, immediately after prosthetics and six months later. The quality of life of patients after prosthetics was determined within the framework of the theory of latent variables. Using a four-factor analysis of variance, the impact on the quality of life of the type of prostheses, the duration of adaptation after prosthetics, gender and age of patients was assessed.

Results. Within the framework of the theory of latent variables, it is shown that the developed questionnaire can be used as a measuring tool to analyze the influence of the studied factors on the quality of life of patients after prosthetics. Due to the use of four-factor analysis of variance, the accuracy of statistical analysis has been improved and the statistical significance of four sources of variance has been revealed. Based on the results of statistical analysis, recommendations on the choice of prosthetics method have been developed.

Conclusion. A multidimensional analysis of the studied factors affecting the quality of life of patients after dental prosthetics was carried out. The quality of life of patients increases statistically significantly after prosthetics. Due to the use of a four-factor model of variance analysis, the precision of assessments of the quality of life of patients has been improved. The prosthetics method (D1) is recommended for women, the prosthetics method (D3) is recommended for men. The obtained results are recommended to be used in practice.

Keywords: dental orthopedic prosthetics; quality of life; latent variables; Rasch model; multifactorial analysis of variance.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the leadership of the Kuban State University and the leadership of the Scientific and Educational Institute of Continuing Medical Education named after N.D. Yushchuk of the Russian University of Medicine for providing the necessary resources to conduct this research.

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

For citation: Maslak A.A., Arutyunov A.S., Grachev D.I., Muslov S.A. Design and multidimensional analysis of dental orthopedic prosthetics quality. *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(3):206–222. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-206-222>

Received 20.07.2024

Accepted 15.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Актуальность протезирования при потере зубов становится все более острой из-за старения населения. По данным Всемирной организации здравоохранения, во многих западных странах более 40% пожилых людей страдают от полной потери зубов [1].

В Российской Федерации число пациентов, нуждающихся в стоматологической ортопедической помощи, постоянно растет и по некоторым оценкам в старшей возрастной группе достигает 40% [2]. Полная потеря зубов вызывает крайне отрицательные эмоции, чувство неполноценности, страх потерять работу и провоцирует многие заболевания [3].

Наиболее общим подходом является оценка влияния общего здоровья на качество жизни [4]. Обычно эффективность протезирования пациентов определяется по клиническим критериям. В некоторых подходах оценивается влияние некоторых факторов, например состояние полости рта, на здоровье [5]. В частности, для оценки влияния здоровья органов и тканей рта на качество жизни разработано большая серия анкет ОНПР (Oral Health Impact Profile). Варианты

этих анкет подробно описаны в работе [6].

Однако это не в полной мере отражает удовлетворенность пациентов проведенным лечением [7]. Поэтому все шире используются субъективные оценки пациентов результатами лечения, отчего в современной медицинской парадигме эффективность лечения оценивается не только улучшением здоровья по клиническим показателям, но и удовлетворенностью пациентов результатами лечения [8]. Изучению качества жизни посвящены многие исследования, которые представлены в отечественной литературе, – оригинальные [9] и в виде обзоров литературы [10].

Эта тематика активно рассматривается и в зарубежных исследованиях [11]. Акцент в этих работах сделан на том, что качество протезирования должно оцениваться не только по уменьшению патологических изменений в организме пациентов, но и удовлетворенностью самих пациентов качеством жизни [12]. Сегодня это общепринятый постулат достоверной оценки эффективности лечения и реабилитации больных с различными заболеваниями, который

используется для планирования оказания медицинской помощи, выбора альтернатив лечения при наличии равных и клинически эффективных методов [13].

Результаты многих исследований показали, что один из вариантов этого опросника, а именно ОНIP-20 DG, обладает достаточно высокой разрешающей способностью в рамках теории латентных переменных [14]. Поэтому именно этот опросник был выбран для многоаспектного статистического анализа качества жизни после протезирования. Была показана возможность измерения качества жизни на линейной шкале. Исследовалось качество этого опросника как измерительного инструмента для оценивания качества жизни пациентов после протезирования [15].

Цель исследования состоит в многоаспектном анализе качества жизни пациентов до и после протезирования. Качество жизни является латентной переменной, которая определяется операционально в виде пунктов опросника. Каждый пункт опросника характеризует один из аспектов латентной переменной. Фактически латентная переменная является интегральным показателем «качество жизни». Необходимо выбрать схему анализа результатов опроса качества жизни, обеспечивающих наибольшую точность оценивания исследуемых факторов.

В данном исследовании используется опросник ОНIP-20 DG, состоящий из 20 пунктов, который был апробирован в рамках классического

тестирования [14]. Опрос проводился на основе пятибалльной шкалы Лайкерта, на которой оценивается степень выраженности дискомфорта пациента по каждому пункту опросника:

- 0 – постоянно;
- 1 – очень часто;
- 2 – часто;
- 3 – крайне редко;
- 4 – никогда.

Существенным недостатком классического тестирования является нелинейная шкала, что затрудняет интерпретацию получаемых результатов, а также применение многих методов статистического анализа [16]. Преодоление недостатков классического тестирования для целей измерения латентных переменных подробно рассмотрено в монографии [17]. Особенности измерения латентных переменных в области здравоохранения представлены в [18].

Поэтому в данном исследовании измерение интегрального показателя «качество» осуществлялось в рамках теории измерения латентных переменных. Наиболее полно теория и практика измерения латентных переменных изложены в монографии [19]. Свойства оценок латентных переменных представлены при формировании метода линейных шкал [20].

Для увеличения общности исследования рассматриваются четыре вида протезирования, три временных измерения качества жизни, пол и возраст пациента.

В терминах планирования эксперимента откликом (Y) является качество жизни пациента.

На качество жизни исследуется влияние следующих факторов.

Фактор А – тип протезов, который варьируется на четырех уровнях:

a1 – TR (классический традиционный протез);

a2 – D1 (протез изготовлен с помощью монолитной 3D-печати – цифровой протез 1 типа);

a3 – D2 (протез с базисом, изготовленным 3D-печатью и гарнитурными зубами, – цифровой протез 2 типа);

a4 – D3 (протез с базисом, изготовленным 3D-печатью и фрезерованными зубами, – цифровой протез 3 типа).

Рассматриваемые типы протезов подробно описаны в [14].

Фактор В – дата измерения качества жизни, варьируется на трех уровнях:

b1 – до протезирования;

b2 – сразу после проведения протезирования;

b3 – через шесть месяцев после проведения протезирования.

Фактор С – пол пациента, варьируется на двух уровнях:

c1 – женский;

c2 – мужской.

Фактор D – возраст пациента, согласно классификации ВОЗ варьируется на трех уровнях:

d1 – средний возраст (45–59 лет);

d2 – пожилой возраст (60–74 лет);

d3 – старческий возраст (75–89 лет).

Зубное протезирование проводилось в клинике МГМСУ им. А. И. Евдокимова. Случайным образом из всего множества пациентов для протезирования по каждому из четырех методов было выбрано по 50 человек.

Материалы и методы

Обработка результатов опроса пациентов по выбранному выше опроснику состояла из трех этапов.

На первом этапе на основе разработанного опросника оценивалось качество жизни всех 200 пациентов на всех трех временных интервалах (до протезирования, сразу после протезирования и через шесть месяцев после протезирования).

На втором этапе определялась возможность анализировать 600 оценок опросника в рамках теории латентных переменных. Это обусловлено тем, что качество опросника как измерительного инструмента можно определить только при обработке экспериментальных данных [21]. Для этой цели использовались диалоговая система RUMM2020 [22]. В результате показано, что используемый опросник можно использовать для измерения качества жизни пациентов на линейной шкале.

На третьем этапе оценивалось влияние на качество жизни всех трех факторов. Поскольку исследуемые факторы являются качественными, то в качестве метода обработки использовался четырехфакторный дисперсионный анализ [19].

Результаты и их обсуждение

Как уже было отмечено выше, в клинике МГМСУ им. А. И. Евдокимова согласно выбранному плану на основе опросника были получены $50 \times 4 \times 3 = 600$ оценок на шкале Лайкерта.

Принципиально важной задачей при измерении латентной переменной является оценка совместимости индикаторов (пунктов опросника). Фактически решается вопрос, является ли опросник измерительным инструментом для получения оценок на линейной шкале. Другими словами, определяется адекватность данных опроса модели измерения (модели Раша). Для этой цели используется критерий Пирсона Хи-квадрат. Эмпирический уровень значимости статистики

Хи-квадрата оказался равным 0,147, что больше номинального уровня 0,05. Это означает, что данный опросник можно использовать в качестве измерительного инструмента.

Важным аспектом качества опросника также является его дифференцирующая способность, т. е. в какой степени пациенты отличаются друг от друга по полученным оценкам. Статистический анализ показал, что пациенты в значительной степени отличаются друг от друга. Об этом свидетельствует большое значение Person Separation Index (аналог альфа Кронбаха), равное 0,718.

Расположение 600 ($50 \times 4 \times 3$) оценок качества жизни пациентов всех трех 200 пациентов представлено ниже (рис. 1).

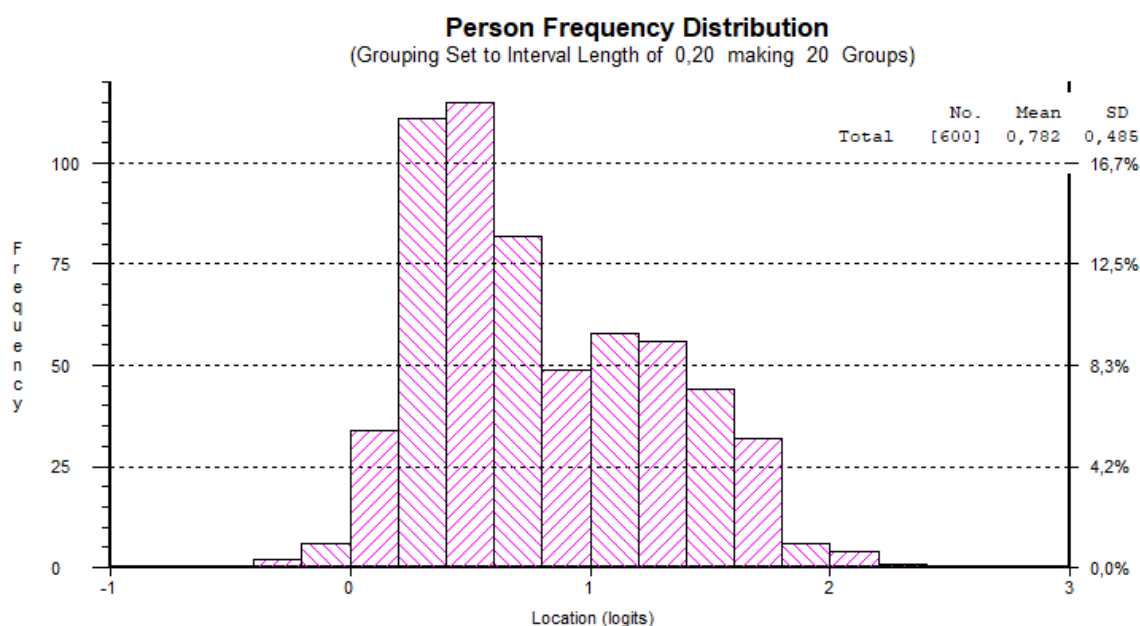


Рис. 1. Оценки качества жизни пациентов на линейной шкале

Fig. 1. Assessment of patients' quality of life on a linear scale

Как видно из рисунка 1, диапазон варьирования оценок качества жизни больше 2 логит. Это свидетельствует о

том, что пациенты в значительной степени отличаются друг от друга по качеству жизни. Это может также

свидетельствовать о том, что есть значимые источники дисперсии.

Статистический анализ факторов на основе полученных оценок качества жизни проводился с использованием четырех моделей:

- 1) линейной модели (учитываются только эффекты факторов);
- 2) модели с двухфакторными взаимодействиями факторов;
- 3) модели с двух- и трехфакторными взаимодействиями факторов;

4) полной четырехфакторной модели.

Оказалось, несмотря на то, что трех- и четырехфакторное взаимодействия оказались незначимыми, полная четырехфакторная модель обеспечивает наибольшую точность оценивания.

Рассмотрим результаты дисперсионного анализа качества жизни пациентов на основе полной четырехфакторной модели (табл. 1).

Таблица 1. Дисперсионный анализ качества жизни пациентов

Table 1. Variance analysis of patients' quality of life

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	F	p
Фактор А	0,237	3	0,079	1,592	0,190
Фактор В	37,489	2	18,744	377,519	<0,001
Фактор С	0,022	1	0,022	0,440	0,507
Фактор D	2,653	2	1,327	26,720	<0,001
Взаимодействие АхВ	0,206	6	0,034	0,692	0,656
Взаимодействие АхС	0,391	3	0,130	2,623	0,050
Взаимодействие АхD	0,304	6	0,051	1,019	0,412
Взаимодействие ВхС	0,023	2	0,012	0,234	0,791
Взаимодействие ВхD	5,277	4	1,319	26,572	<0,001
Взаимодействие СхD	0,113	2	0,057	1,143	0,320
Взаимодействие АхВхС	0,477	6	0,080	1,602	0,144
Взаимодействие АхВхD	0,650	12	0,054	1,091	0,365
Взаимодействие АхСхD	0,493	6	0,082	1,655	0,130
Взаимодействие ВхСхD	0,225	4	0,056	1,133	0,340
Взаимодействие АхВхСхD	0,467	12	0,039	0,780	0,671
Ошибка	26,345	528	0,050		
Всего	140,667	599			

В таблице 1 полужирным шрифтом выделены значимые источники дисперсии. Как видно из таблицы 1, из четырех факторов значимо влияют на качество

жизни только два (факторы В и D), из шести парных взаимодействий значимы только два (АхС и ВхD). Все трехфакторные и одно четырехфакторное

взаимодействия незначимы. С одной стороны, это означает, что достаточно провести интерпретацию только значимых факторов и двухфакторных взаимодействий, которые значимо влияют на качество жизни. Тем не менее целесообразно рассмотреть эффекты всех исследуемых факторов.

Проинтерпретируем полученные результаты.

1. Фактор А незначим, об этом свидетельствует то, что эмпирический уровень для этого фактора больше номинального: $p = 0,384 > 0,05$. Это означает, что нет статистически значимой разницы между типами протезов в среднем по измеряемым временным интервалам и полу. Тем не менее представляют интерес оценки уровней этого фактора (табл. 2).

Таблица 2. Оценка качества жизни пациентов в зависимости от типа протеза

Table 2. Assessment of the quality of life of patients depending on the type of prosthesis

Тип протезирования	Качество жизни, логит	Стандартная ошибка, логит	Доверительный интервал	
			нижняя граница	верхняя граница
TR	0,738	0,023	0,694	0,783
D1	0,731	0,029	0,673	0,788
D2	0,741	0,026	0,690	0,791
D3	0,808	0,029	0,751	0,866

Как видно из таблицы 2, наибольшая оценка качества жизни 0,808 логита (в среднем по всем остальным факторам) достигается при типе протезирования D3. Однако, как было отмечено в таблице 1, все типы протезирования статистически значимо не отличаются друг от друга.

2. Наибольший интерес представляет фактор В, который характеризует эффективность протезирования. Как видно из таблицы 1, этот фактор значим на очень высоком уровне: $p < 0,001$. Это свидетельствует о высокой эффективности протезирования в среднем по всем факторам (табл. 3).

Таблица 3. Оценки качества жизни пациентов после протезирования

Table 3. Assessment of the quality of life of patients after prosthetics

Время измерения	Качество жизни, логит	Стандартная ошибка, логит	Доверительный интервал	
			нижняя граница	верхняя граница
До протезирования	0,408	0,023	0,363	0,454
Сразу после протезирования	0,597	0,023	0,552	0,642
После адаптации (6 месяцев)	1,258	0,023	1,213	1,303

Из таблицы 3 следует, что наименьшее качество жизни пациентов – до протезирования (0,392 логита), после протезирования качество жизни значительно повысилось (0,596 логита). Более высокий уровень качества жизни у пациентов

через шесть месяцев после протезирования (1,351 логит).

3. Фактор С (пол) статистически незначим. Соответствующие оценки качества жизни женщин и мужчин приведены ниже (табл. 4).

Таблица 4. Оценка качества жизни пациентов в зависимости от пола

Table 4. Assessment of the quality of life of patients depending on gender

Пол	Качество жизни, логит	Стандартная ошибка, логит	Доверительный интервал	
			нижняя граница	верхняя граница
Женщины	0,775	0,017	0,742	0,808
Мужчины	0,784	0,013	0,758	0,810

Как следует из таблицы 4, качество жизни мужчин (0,784 логита) несколько выше качества жизни женщин (0,775 логита), но это различие статистически незначимо.

4. Фактор D (возраст) статистически значим на очень высоком уровне: $p < 0,001$. Это означает, что качество жизни пациентов очень сильно зависит от их возраста (табл. 5).

Таблица 5. Оценка качества жизни пациентов в зависимости от их возраста

Table 5. Assessment of the quality of life of patients depending on their age

Возраст	Качество жизни, логит	Стандартная ошибка, логит	Доверительный интервал	
			нижняя граница	верхняя граница
45–59	0,866	0,015	0,836	0,896
60–74	0,737	0,014	0,710	0,764
75–89	0,660	0,035	0,592	0,729

Как и следовало ожидать, качество жизни наибольшее у пациентов среднего возраста (0,866 логита), наименьшее – у старческого возраста (0,660 логита). Пациенты пожилого возраста занимают промежуточное положение по качеству жизни (0,737 логита). Необходимо подчеркнуть, что эти различия статисти-

чески значимы на очень высоком уровне: $p < 0,001$.

5. Особый интерес представляет значимость взаимодействия АхС ($p = 0,05$), поскольку факторы А и С незначимы. Эффект этого взаимодействия представлен ниже (рис. 2).

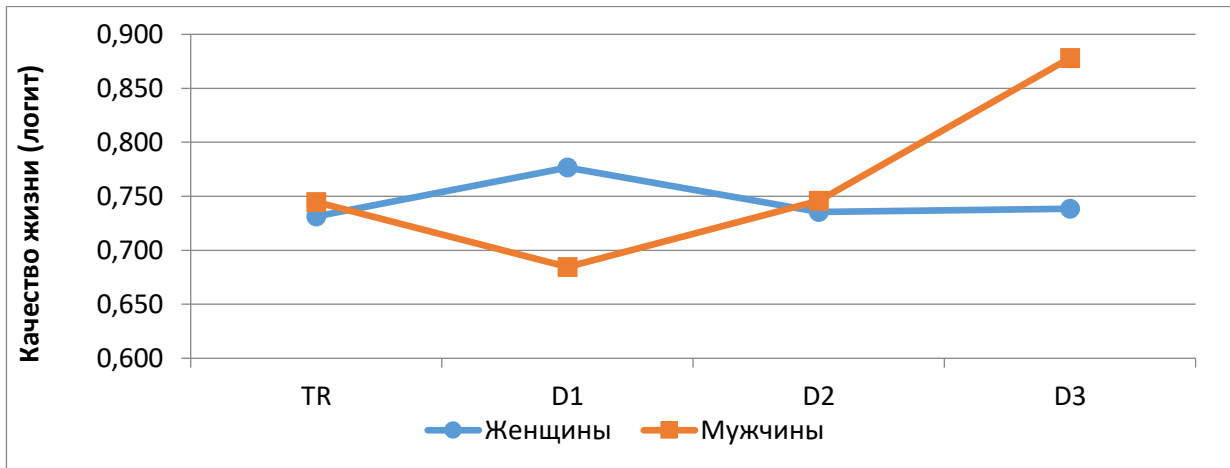


Рис. 2. Качество жизни женщин и мужчин в зависимости от метода протезирования

Fig. 2. The quality of life of women and men depending on the method of prosthetics

Отметим, что на рисунке 2 представлены оценки качества жизни пациентов после протезирования в среднем для всех временных периодов (фактор В) и всех возрастов (фактор D). Полученные данные свидетельствуют о том, что при методах протезирования TR и D2 качество жизни у женщин и мужчин практически одинаковое (0,777 и

0,685 логита соответственно). При методе протезирования D3, наоборот, качество жизни у женщин ниже по сравнению с мужчинами (0,738 и 0,878 логита соответственно).

6. Значительный интерес представляет также эффект взаимодействия $V \times D$ (время измерения качества жизни и возраст пациентов – рис. 3).

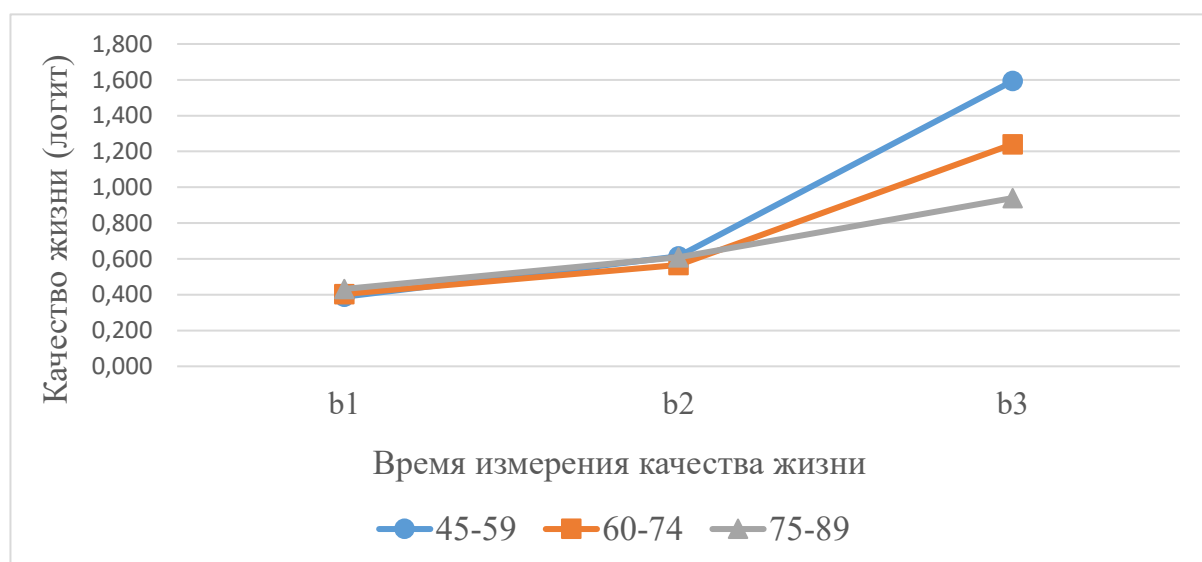


Рис. 3. Качество жизни пациентов в зависимости от их возраста и времени измерения

Fig. 3. Quality of life of patients depending on their age and measurement time

Из рисунка 3 следует, что в среднем для всех качество жизни пациентов зависит только от их возраста. Так, до протезирования качество жизни у пациентов среднего, пожилого и старческого возраста практически одинаковое (0,389, 0,404 и 0,432 логита соответственно). После протезирования качество жизни у пациентов всех возрастов также практически одинаковое (0,615, 0,566 и 0,609 логита соответственно). И только после адаптации (шесть месяцев) качество жизни пациентов существенно зависит от их возраста. Наибольшее качество жизни наблюдается у пациентов среднего возраста (1,593 логита), наименьшее – у пациентов старческого возраста (1,593 логита). У пациентов пожилого возраста качество жизни равно 1,241 логита.

Выводы

В работе представлен многоаспектный анализ качества жизни пациентов после протезирования зубов в зависимости от типа протезов, времени адаптации после протезирования пола и возраста пациентов.

1. В рамках теории латентных переменных проведен анализ качества опросника OHIP-20 DG как измерительного инструмента для оценивания на линейной шкале качества жизни. Показано, что результаты опроса адекватны модели Раша, эмпирический уровень значимости статистики Хи-квадрат равен 0,147. Кроме того, опросник обладает

высокой разрешающей способностью, Person Separation Index (аналог альфа Кронбаха) равен 0,718. Таким образом, опросник OHIP-20 DG можно использовать в качестве измерительного инструмента для анализа влияния исследуемых факторов.

2. Показана эффективность полной модели четырехфакторного дисперсионного анализа. Четырехфакторное и трехфакторные взаимодействия оказались незначимыми, но их учет позволил снизить ошибку для определения значимости источников дисперсии. В результате повышена точность статистического анализа и выявлена статистическая значимость четырех источников дисперсии.

3. Проведен многоаспектный анализ исследуемых факторов, влияющих на качество жизни после протезирования. Как и следовало ожидать, фактор В оказался значимым, качество жизни увеличивается после протезирования. Еще в большей степени качество жизни увеличивается через шесть месяцев после протезирования, что свидетельствует о хорошей адаптации пациентов. Ожидаемо фактор D также оказался значимым. После адаптации качество жизни тем больше, чем меньше возраст пациентов. Так, наибольшее качество больше у пациентов среднего возраста (45–59 лет), наименьшее качество жизни у пациентов старческого возраста (75–89 лет).

4. Использование четырехфакторной модели дисперсионного анализа оценок качества жизни позволило

выявить значимость взаимодействий факторов. Так, в среднем по всем уровням факторов В, С и D (время измерения качества жизни, пол и возраст пациентов) между типами протезов нет статистически значимой разницы по качеству жизни. Но значимость взаимодействия свидетельствует о том, что качество жизни после протезирования зависит от пола. Так, при использовании методов протезирования TR и D2 качество жизни в среднем практически одинаковое у

женщин и мужчин. Однако при использовании метода протезирования D1 качество жизни женщин значимо выше, чем качество жизни мужчин. И наоборот, при использовании метода протезирования D3 качество жизни мужчин значимо больше, чем качество жизни женщин. Таким образом, женщинам можно рекомендовать метод протезирования D1, а мужчинам – метод протезирования D3. Независимо от пола протезирование эффективнее в среднем возрасте.

Список литературы

1. Oral health 2020. World Health Organization. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health> (дата обращения: 18.06.2024).
2. Иммедиат-протез с напечатанным зубным рядом из полиметилметакрилата и базисом из полиэтилентерефталата: клинический случай / Е. А. Чижмаков, Е. Г. Жеребцов, М. А. Галанкина, А. С. Арутюнов // Клиническая стоматология. 2023. Т. 26, № 3. С. 100–109. https://doi.org/10.37988/1811-153X_2023_3_100
3. Здоровое старение и состояние полости рта / Е. В. Фролова, А. В. Турушева, В. Н. Трезубов, Р. А. Розов, М. Ю. Кабанов, Р. Ш. Гветадзе, С. Д. Арутюнов // Российский семейный врач. 2023. Т. 27, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.17816/RFD312945>
4. Цифровое исследование качества жизни пациентов с временным эпитезом ушной раковины на период остеоинтеграции краниальных имплантатов / С. Д. Арутюнов, Д. И. Поляков, А. Г. Степанов, С. А. Муслов // Современная стоматология. 2020. № 4. С. 76–82.
5. Use of Oral Health Impact Profile-14 (OHIP-14) in Different Contexts. What Is Being Measured? / L. A. Campos, T. Peltomäki, J. Marôco, J. A. D. B. Campos // Int. J. Environ. Res. Public. Health. 2021. N 18(24). P. 13412. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413412>
6. Pommer B. Use of the Oral Health Impact Profile (OHIP) in Clinical Oral Implant Research // Journal of Dental, Oral and Craniofacial Epidemiology. 2013. Vol. 1, N 3. P. 3–10.
7. Melbye E. L. Dimensional structure of the OHIP-14 and associations with self-report oral health-related variables in home-dwelling Norwegians aged 70+ // Acta odontologica Scandinavica. 2023. Vol. 81, N 1. P. 66–72. <https://doi.org/10.1080/00016357.2022.2083674>

8. Новик А. А., Ионова Т. И. Руководство по исследованию качества жизни в медицине / под ред. акад. РАН Ю. А. Шевченко. 4-е изд. М.: РАЕН, 2021. 664 с.
9. Ионова Т. И. Алгоритм выбора опросника для исследования качества жизни // Вестник Межнационального центра исследования качества жизни. 2023. № 41–42. С. 115–119.
10. Балин К. Д., Борисова Э. Г., Федичкина М. К. Оценка уровня качества жизни пациентов после стоматологических вмешательств (обзор литературы) // Проблемы стоматологии. 2021. Т. 17, № 1. С. 5–11.
11. Tests of data quality, scaling assumptions, reliability, and construct validity of the SF-36 health survey in people who abuse heroin / E. C. Chiu, I. P. Hsueh, C. H. Hsieh, C. L. Hsieh // Journal of the Formosan Medical Association. 2014. N 113(4). P. 234–241.
12. A Systematic Review and Meta-Analysis of Baseline Ohip-Edent Scores / J. M. J. Duale, Y. A. Patel, J. Wu, T. P. Hyde // Review. Eur. J. Prosthodont. Restor. Dent. 2018. N 26(1). P. 17–23. https://doi.org/10.1922/EJPRD_01753Duale07
13. Fayers P. M., Machin D. Quality of Life: The Assessment, Analysis and Reporting of Patient-reported Outcomes. 3rd ed. Wiley-Blackwell, 2016. 648 p.
14. Качество жизни пациентов с полной утратой зубов и психометрические свойства опросника OHIP-20 DG. Часть 2. Мониторинг на этапах стоматологического ортопедического лечения / С. Д. Арутюнов, С. А. Муслов, Н. С. Рузуддинов, Е. А. Чижмаков, Д. И. Грачев, Я. Н. Харах, Г. С. Нерсесов // Российский стоматологический журнал. 2021. Т. 25, № 5. С. 399–408. <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2021-25-5-399-408>
15. Измерение показателей качества жизни в медицине на основе классической и современной теории: монография / С. А. Муслов, И. В. Маев, С. Д. Арутюнов, С. С. Перцов, А. А. Маслак, А. А. Солодов; под ред. Р. Ш. Гветадзе. М.: Практическая медицина, 2023. 216 с.
16. Andrich D. A Course in Rasch Measurement Theory. Measuring in the Educational, Social and Health Sciences. Singapore: Springer, 2019. 482 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7496-8>
17. Bond T., Yan Z., Heene M. Applying the Rasch Model. Fundamental Measurement in the Human Sciences. Routledge. New York, 2020. 348 p.
18. Engelhard G., Wang J. Rasch Models for Solving Measurement Problems: Invariant Measurement in the Social Sciences. Singapore: Sage, 2021. 146 p.
19. Маслак А. А. Теория и практика измерения латентных переменных в образовании: теория и практика: монография. М.: Юрайт, 2024. 255 с.
20. Маслак А. А., Коробко А. И. Метод формирования линейных шкал оценки результатов обучения с контролем адекватности индикаторных переменных // Известия

Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 131–147. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-131-147>

21. Маслак А. А., Коробко А. И. Статистический анализ агрегированного рейтинга российских вузов как измерительного инструмента // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 1. С. 68–79.

22. Andrich D., Sheridan B., Luo G. RUMM2020: Rasch Unidimensional Measurement Models software and manual. Perth, Australia: RUMM Laboratory, 2005. 154 p.

References

1. Oral health 2020. World Health Organization. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health> (accessed 18.06.2024).

2. Chizhnikov E.A., Zhrebtsov E.G., Galankina M.A., Arutyunov A.S. An immediate prosthesis with a printed dentition made of polymethylmethacrylate and a base of polyethylene terephthalate: a clinical case. *Klinicheskaya stomatologiya = Clinical Dentistry*. 2023;26(3):100–109. (In Russ.) https://doi.org/10.37988/1811-153X_2023_3_100

3. Frolova E.V., Turusheva A.V., Trezubov V.N., Rozov R.A., Kabanov M.Yu., Gvetadze R.Sh., Arutyunov S.D. Healthy aging and the state of the oral cavity. *Rossiiskii semeinyi vrach = Russian Family Doctor*. 2023;27(1):5–14. (In Russ.) <https://doi.org/https://doi.org/10.17816/RFD312945>

4. Arutyunov S.D., Polyakov D.I., Stepanov A.G., Muslov S.A. Digital study of the quality of life of patients with temporary epithesis of the auricle for the period of osseointegration of cranial implants. *Sovremennaya stomatologiya = Modern Dentistry*. 2020;(4):76–82. (In Russ.)

5. Campos L.A., Peltomäki T., Marôco J., Campos J.A.D.B. Use of Oral Health Impact Profile-14 (OHIP-14) in Different Contexts. What Is Being Measured? *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021;(8):13412. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413412>

6. Pommer B. Use of the Oral Health Impact Profile (OHIP) in Clinical Oral Implant Research. *Journal of Dental, Oral and Craniofacial Epidemiology*. 2013;1(3):3–10.

7. Melbye E.L. Dimensional structure of the OHIP-14 and associations with self-report oral health-related variables in home-dwelling Norwegians aged 70+. *Acta Odontologica Scandinavica*. 2023;81(1):66–72. <https://doi.org/10.1080/00016357.2022.2083674>

8. Novik A.A., Ionova T.I. Guidelines for the study of quality of life in medicine. 4th ed. Moscow: RAEN; 2021. 664 p. (In Russ.)

9. Ionova T.I. Algorithm for choosing a questionnaire for quality of life research. *Vestnik Mezhnatsional'nogo tsentra issledovaniya kachestva zhizni = Bulletin of the International Center for Quality of Life Research*. 2023;(41–42):115–119. (In Russ.)
10. Balin K.D., Borisova E.G., Fedichkina M.K. Assessment of the quality of life of patients after dental interventions (literature review). *Problemy stomatologii = Problems of Dentistry*. 2021;17(1):5–11. (In Russ.)
11. Chiu E.C., Hsueh I.P., Hsieh C.H., Hsieh C.L. Tests of data quality, scaling assumptions, reliability, and construct validity of the SF-36 health survey in people who abuse heroin. *Journal of the Formosan Medical Association*. 2014;113(4):234–241.
12. Duale J.M.J., Patel Y.A., Wu J., Hyde T.P. A Systematic Review and Meta-Analysis of Baseline Ohip-Edent Scores. *Review. Eur. J. Prosthodont. Restor. Dent*. 2018;26(1):17–23. https://doi.org/10.1922/EJPRD_01753Duale07
13. Fayers P.M., Machin D. Quality of Life: The Assessment, Analysis and Reporting of Patient-reported Outcomes. 3rd ed. Wiley-Blackwell; 2016. 648 p.
14. Arutyunov S.D., Muslov S.A., Ruzuddinov N.S., Chizhmakov E.A., Grachev D.I., Kharakh Ya.N., Nersesov G.S. Quality of life of patients with complete loss of teeth and psychometric properties of the OHIP-20 DG questionnaire. Part 2. Monitoring at the stages of dental orthopedic treatment. *Rossiiskii stomatologicheskii zhurnal = Russian Dental Journal*. 2021;25(5):399–408. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2021-25-5-399-408>
15. Muslov S.A., Mayev I.V., Arutyunov S.D., Pertsov S.S., Maslak A.A., Solodov A.A. Measurement of quality of life in medicine based on classical and modern theory. Moscow: Practical medicine; 2023. 216 p. (In Russ.)
16. Andrich D. A Course in Rasch Measurement Theory. Measuring in the Educational, Social and Health Sciences. Singapore: Springer; 2019. 482 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7496-8>
17. Bond T., Yan Z., Heene M. Applying the Rasch Model. Fundamental Measurement in the Human Sciences. Routledge. New York; 2020. 348 p.
18. Engelhard G., Wang J. Rasch Models for Solving Measurement Problems: Invariant Measurement in the Social Sciences. Singapore: Sage; 2021. 146 p.
19. Maslak A.A. Theory and practice of measuring latent variables in education: theory and practice. Moscow: Yurayt; 2024. 255 p. (In Russ.)
20. Maslak A.A., Korobko A.I. Method of forming linear scales for evaluating learning outcomes with control of the adequacy of indicator variables. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(4):131–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-131-147>

21. Maslak A.A., Korobko A.I. Statistical analysis of the aggregated ranking of Russian universities as a measuring tool. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii. = Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies*. 2023;(1):68–79. (In Russ.)

22. Andrich D., Sheridan B., Luo G. RUMM2020: Rasch Unidimensional Measurement Models software and manual. Perth, Australia: RUMM Laboratory; 2005. 154 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Маслак Анатолий Андреевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, информатики, естественно-научных и общетехнических дисциплин, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Российская Федерация, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3189-4858

Anatoly A. Maslak, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Mathematics, Computer Sciences, Natural Sciences and General Technical Disciplines, Branch of the Kuban State University in Slavyansk-on-Kuban, Slavyansk-on-Kuban, Russian Federation, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3189-4858

Арутюнов Анатолий Сергеевич, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры пропедевтики и технологий протезирования в стоматологии, Научно-образовательный институт стоматологии им. А. И. Евдокимова, Российский университет медицины Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: a.arutyunov@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-2655-6707

Anatoly S. Arutyunov, Doctor of Sciences (Medical), Associate Professor, Professor of the Department of Propaedeutics and Prosthetic Technologies in Dentistry, Scientific and Educational Institute of Dentistry named after A. I. Evdokimov, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.arutyunov@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-2655-6707

Грачев Дмитрий Игоревич, кандидат медицинских наук, доцент кафедры ортопедической стоматологии и цифровых технологий, Научно-образовательный институт непрерывного медицинского образования им. Н. Д. Юшука, Российский университет медицины Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dr.grachev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5758-7485

Dmitry I. Grachev, Candidate of Sciences (Medical), Associate Professor of the Department of Orthopedic Dentistry and Digital Technologies, Scientific and Educational Institute of Continuing Medical Education named after N. D. Yushchuk, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, e-mail: dr.grachev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5758-7485

Муслов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук, профессор кафедры нормальной физиологии и медицинской физики, Российский университет медицины Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: muslov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9752-6804

Sergey A. Muslov, Candidate of Sciences (Physical and Mathematical), Doctor of Sciences (Biological), Professor of the Department of Normal Physiology and Medical Physics, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, e-mail: muslov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9752-6804

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-223-237>

УДК 004.451

Концептуальная модель и реализация объектно ориентированной системы с помощью метапрограммирования

А. А. Чаплыгин¹ ✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Резюме

Цель исследований заключается в разработке концептуальной модели объектно ориентированной системы и ее реализации с помощью функционального языка с поддержкой метапрограммирования.

Методы. Была разработана концептуальная модель объектно ориентированной системы на основе динамической объектной системы с передачей сообщений и динамической диспетчеризацией. Разработанная объектно ориентированная система включает в себя функции создания и удаления классов, создания и удаления объектов-экземпляров класса, функции для работы со свойствами объектов, функции добавления методов в класс и передачи сообщений. Также возможно наследование, когда дочерний класс будет иметь свойства родительского класса и свои собственные свойства.

Результаты. Объектно ориентированная система была реализована с помощью набора макросов и вспомогательных функций. В качестве базовой структуры данных выступила хеш-таблица с возможностями доступа по ключу, которая также была реализована с помощью макросов. При создании класса автоматически генерируется конструктор экземпляра с установкой начальных значений полей объекта. Наследование реализовано как включение полей родительского класса в дочерний объект. Полиморфизм реализован как динамическая диспетчеризация: при обработке сообщения происходит поиск метода-обработчика. Полученная объектно ориентированная система вместе с модулем хеш-таблиц занимает 97 строк.

Заключение. В результате работы была создана и реализована концептуальная модель объектно ориентированной системы, включающей в себя основные функции объектно ориентированной парадигмы программирования. Было показано, что с помощью макросов можно создать компактную объектно ориентированную систему, при этом в интерпретатор функционального языка не нужно добавлять никаких новых функций или возможностей.

Ключевые слова: объектно ориентированное программирование; концептуальная модель; интерпретатор; Common Lisp; макрос.

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

Для цитирования: Чаплыгин А. А. Концептуальная модель и реализация объектно-ориентированной системы с помощью метапрограммирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 223–237. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-223-237>

Поступила в редакцию 14.07.2024

Подписана в печать 12.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Concept model and realization of object oriented system with metaprogramming

A. A. Chaplygin¹ ✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a conceptual model of an object oriented system and implement it using a functional language with metaprogramming support.

Methods. A conceptual model of an object oriented system was developed based on a dynamic object system with message passing and dynamic dispatch. The developed object oriented system includes functions for creating and deleting classes, creating and deleting object instances of a class, functions for working with object properties, functions for adding methods to a class and passing messages. Inheritance is also possible, when a child class will have the properties of the parent class and its own properties.

Results. The object oriented system was implemented using a set of macros and helper functions. The basic data structure was a hash table with key access capabilities, which was also implemented using macros. When a class is created, an instance constructor is automatically generated, setting the initial values of the object's fields. Inheritance is implemented as the inclusion of fields of a parent class in a child object. Polymorphism is implemented as dynamic dispatch: when processing a message, a handler method is searched. The resulting object oriented system, together with the hash table module, occupies 97 lines.

Conclusion. As a result of the work, a conceptual model of an object oriented system was created and implemented, which includes the main functions of the object oriented programming paradigm. It has been shown that macros can be used to create a compact object oriented system without the need to add any new functions or capabilities to the functional language interpreter.

Keywords: object oriented programming; conceptual model; interpreter; Common Lisp; macro.

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

For citation: Chaplygin A.A. Concept model and realization of object oriented system with metaprogramming. *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*. 2024;14(3):223–237. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-223-237>

Received 14.07.2024

Accepted 12.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Объектно ориентированное программирование (ООП) – это современная парадигма программирования, которая используется почти во всех современных

языках программирования [1]. Основная концепция ООП – это объекты, которые содержат данные в виде полей и код в виде процедур (методов) [2]. Программы в ООП разрабатываются как множество

объектов, взаимодействующих друг с другом [3].

Впервые термин «объект» стал употребляться как обозначение атомов в языке Лисп [4; 5; 6]. Эти объекты имели свойства или атрибуты. Другим примером может являться графическая система Sketchpad, где появляется понятие «класс» (как образец).

Первым объектно ориентированным языком был язык Симула [7]. Этот язык создал важнейшие концепции ООП: классы, объекты, наследование, динамическое связывание [8].

Дальнейшее развитие идей Симула отразилось в разработке языка Smalltalk, который повлиял на все последующие объектно ориентированные языки программирования [9]. Smalltalk изначально включал в себя окружение для программирования, динамическую типизацию и был реализован в виде интерпретатора [10]. В отличие от Симула это была полностью динамическая система, где классы могли создаваться и меняться динамически [11].

В 80-х годах стали появляться гибридные языки программирования, где объектно ориентированная парадигма соединялась с другими парадигмами, такой как функциональное программирование. В языках Flavors, Interlisp и Common Lisp [12; 13; 14] появляется множественное наследование и метаобъектный протокол.

Язык Objective-C [15] возник как расширение языка C посредством пре-процессора, чтобы добавить объектно

ориентированные возможности, как в языке Smalltalk. Объекты-экземпляры взаимодействуют друг с другом с помощью сообщений. Обработчик сообщения выбирается во время выполнения программы, следствием чего является отсутствие проверки типов. Ответ на сообщение не гарантируется. Данный подход имеет как достоинства, так и недостатки. К достоинствам Smalltalk относятся: динамичность отправки сообщений, возможность отправки одного сообщения множеству объектов, методы не обязательно должны быть реализованы, что дает возможность раннего тестирования без ошибок времени выполнения. К недостаткам данного подхода можно отнести меньшую скорость работы по сравнению с статическими системами.

Язык C++ [16; 17] также расширил язык C, добавив в него ООП, но за основу была взята модель языка Simula. Вместо передачи сообщений происходит вызов метода, который определяется статически во время компиляции, кроме случаев вызовов виртуальных методов. Это повышает скорость работы программы, но лишает ее динамичных свойств и требует обязательной реализации абстрактных методов.

Современные языки, такие как Python [18] и Java [19], поддерживают ООП. Язык Python соединяет процедурное программирование с объектно ориентированным, а язык Java является чистым объектно ориентированным языком, программировать, используя другие парадигмы, там нельзя.

Материалы и методы

В качестве базовой модели ООП возьмем модель языка Smalltalk с передачей сообщений, поздним связыванием и одиночным наследованием. Опишем концептуальную модель данной системы. Она должна обладать следующими функциями:

- динамическое создание нового класса;
- динамическое удаление класса;
- создание экземпляра класса;
- удаление объекта-экземпляра;
- получение свойства объекта;
- установка свойства объекта;
- добавление обработчика сообщения (метода) в класс;
- передача сообщения объекту;

`(defclass point () (x y))` ; возвращает имя класса

Рис. 1. Создание класса для точки с параметрами x и y

Fig. 1. Creation of point class with parameters x and y

При наследовании экземпляр дочернего класса будет иметь свойства родительского класса и свои собственные свойства, поэтому при создании дочернего класса достаточно указать только поля, принадлежащие дочернему

`(defclass line point (x2 y2))`

Рис. 2. Создание класса «Линия», наследуемого от класса «Точка»

Fig. 2. Creating a "Line" class inherited from the "Point" class

`(remove-class line)` ; возвращает *nil*

Рис. 3. Удаление класса

Fig. 3. Class removal

– передача сообщения родительскому классу.

Каждый класс должен иметь уникальное имя, с помощью которого происходит работа с данным классом. Сам класс по своей сути является структурой или записью, которая содержит поля (свойства) и методы. В функциональном программировании удобно отделить методы от классов и сделать их обычными функциями. Тогда при создании класса нужно указать список его полей, которые являются переменными (символами) для доступа к свойствам экземпляра класса. Также при создании класса необходимо указать имя родительского класса, чтобы была возможность наследования (рис. 1).

классу. Например, класс «Линия» наследуется от класса «Точка», добавляя еще одну пару координат (рис. 2).

Для удаления класса необходим другой оператор (рис. 3).

Для создания экземпляра класса достаточно знать только имя класса. При этом создается объект, у которого

свойства будут иметь пустое значение, например `nil` (рис. 4).

`(make-instance point)` ; возвращает объект – экземпляр

Рис. 4. Создание экземпляра класса

Fig. 4. Creation of class instance

Так как пустые свойства могут быть неудобными, необходим способ задать начальные значения полей. Для экземпляров дочерних классов необходимо

задавать значение всех полей: как родителя, так и потомка. Такую функцию обычно называют конструктор объекта-экземпляра (рис. 5).

`(make-point 10 10)` ; создание точки с координатами *10, 10*

`(make-line 10 10 20 30)` ; создание линии с заданными координатами

Рис. 5. Конструкторы экземпляра класса

Fig. 5. Constructors of class instance

Так как в функциональных языках происходит автоматическое управление памятью, то для удаления экземпляра класса не требуется специальной функции. Сборщик мусора сам выявит объекты, на которых нет ссылок от других

объектов, и тогда память, занимаемая объектом, будет автоматически освобождена.

Для получения значения свойства объекта нужен сам объект и имя-символ свойства (рис. 6).

`(setq p2 (make-point 10 20))` ; в переменной *p2* – новый экземпляр
`(slot p2 'x)` ; возвращает *10*

Рис. 6. Получение значения свойства объекта

Fig. 6. Getting of object property value

Чтобы присвоить значение свойства объекту, необходим оператор присваивания. Удобно использовать макрос, который сам определяет вид присваивания –

простое присваивание значения переменной или присваивание значения свойству объекта (рис. 7).

`(setq p2 (make-point 10 20))` ; в переменной *p2* – новый экземпляр
`(setf (slot p2 'x) 50)` ; присваиваем новое значение полю *x*
`(slot p2 'x)` ; возвращает *50*

Рис. 7. Присваивание значения свойству объекта

Fig. 7. Assigning of new value to object property

Как уже было сказано выше, методы класса удобно сделать как обычные функции, чтобы не создавать новый интерфейс передачи сообщений, а использовать простой вызов функции. Когда объект принимает сообщение, то он должен выбрать метод, который будет вызван при обработке сообщения. Выбор метода будет происходить по имени

метода. Если метод с таким именем есть в классе объекта, то он будет вызван, если нет – поиск продолжится в классе родителя и т. д. Это называется полиморфизмом – разные обработчики одного и того же сообщения в разных классах. Если родительского класса нет, а метод не найден, то должна выводиться ошибка (рис. 8).

```
(setq p1 20 20) ; создали точку
(setq l1 (make-line 1 1 3 3)) ; создали линию
(move p1 20 20) ; перемещение точки
(move l1 20 20) ; перемещение линии
(test l1 10) ; возвращает ошибку – неизвестный метод test
```

Рис. 8. Передача сообщений объектам

Fig. 8. Sending messages to objects

Для создания метода необходим оператор, которому передается имя метода, имя класса, параметры метода и

тело метода. Также необходима переменная, которая получает ссылку на экземпляр класса, обычно *self* (рис. 9).

```
(defmethod move ((self point) dx dy) ; создаем метод для класса точки
(setf (slot self 'x) (+ (slot self 'x) dx)) ; dx, dy – вектор перемещения
(setf (slot self 'y) (+ (slot self 'y) dy)))
(defmethod move ((self line) dx dy) ; для объекта класса линии
(setf (slot self 'x) (+ (slot self 'x) dx)) ; перемещаются обе точки
(setf (slot self 'x2) (+ (slot self 'x2) dx))
(setf (slot self 'y) (+ (slot self 'y) dy))
(setf (slot self 'y2) (+ (slot self 'y2) dy)))
```

Рис. 9. Создание метода с одним именем для разных классов

Fig. 9. Creation of methods with the same name to different classes

Для удаления метода достаточно указать имя метода и имя класса (рис. 10).

возможность перенаправления сообщения родительскому классу или суперклассу (рис. 11).

Кроме возможности передачи сообщения объекта необходима также

```
(remove-method move point) ; у класса точки удален метод move
```

Рис. 10. Удаление метода

Fig. 10. Method removal

(setq l1 (make-line 1 1 3 3)) ; создали линию

(super move l1 20 20) ; будет перемещена только первая точка линии

Рис. 11. Перенаправление сообщения родительскому классу

Fig. 11. Message redirection to parent class

Приведенный выше интерфейс обеспечивает все базовые возможности для объектно ориентированного программирования, такие как динамическая работа с объектами, классами, наследование, полиморфизм.

Результаты и их обсуждение

Для реализации модели объектно ориентированной системы воспользуемся интерпретатором функционального языка с возможностями метапрограммирования [20].

Заметим, что в классах и объектах присутствует общая структура. И там и там есть поля или свойства и их

значения, в т. ч. функции-методы. Подобная структура называется «словарь» или «хеш-таблица» (ассоциативный массив), потому что чаще всего она реализуется с использованием хеш-функции для быстрого поиска. В таком объекте каждому ключу-символу соответствует значение как другой объект, поэтому данная структура универсальна и может хранить любые иерархические данные.

Хеш-таблица может поддерживаться языком напрямую, но ее также можно легко реализовать как А-список (рис. 12).

Рассмотрим интерфейс для работы с хеш-таблицей (рис. 13).

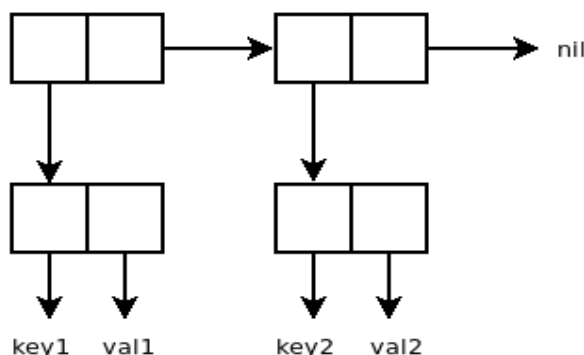


Рис. 12. Устройство хеш-таблицы

Fig. 12. Hash table structure

(setq a (make-hash)) ; в переменной а новая хеш – таблица

(set-hash a 'x 5) ; добавление значения по ключу

(set-hash a 'y 10) ; добавление значения по другому ключу

(set-hash a 'x 15) ; установка нового значения по ключу

(get-hash a 'x) ; получение значения по ключу

(delete-hash a 'x) ; удаление значения с данным ключом

Рис. 13. Интерфейс хеш-таблицы

Fig. 13. Hash table interface

Теперь хеш-таблица будет основной структурой для классов и объектов. В качестве значения по ключу в хеш-таблице может храниться другая хеш-таблица. Это позволяет создавать иерархические данные, что необходимо для реализации классов.

Объекты-классы будут храниться в глобальной хеш-таблице **class-table**. Ключами в этой таблице будут символы – имена классов. Значениями

являются сами объекты-классы в виде другой хеш-таблицы. Она содержит следующие поля:

- *parent* – имя-символ класса родителя;
- *slots* – список свойств класса;
- другие поля с ключом *имя метода* и таким значением, как *lambda-функция* метода.

Рассмотрим пример таблицы классов (рис. 14).

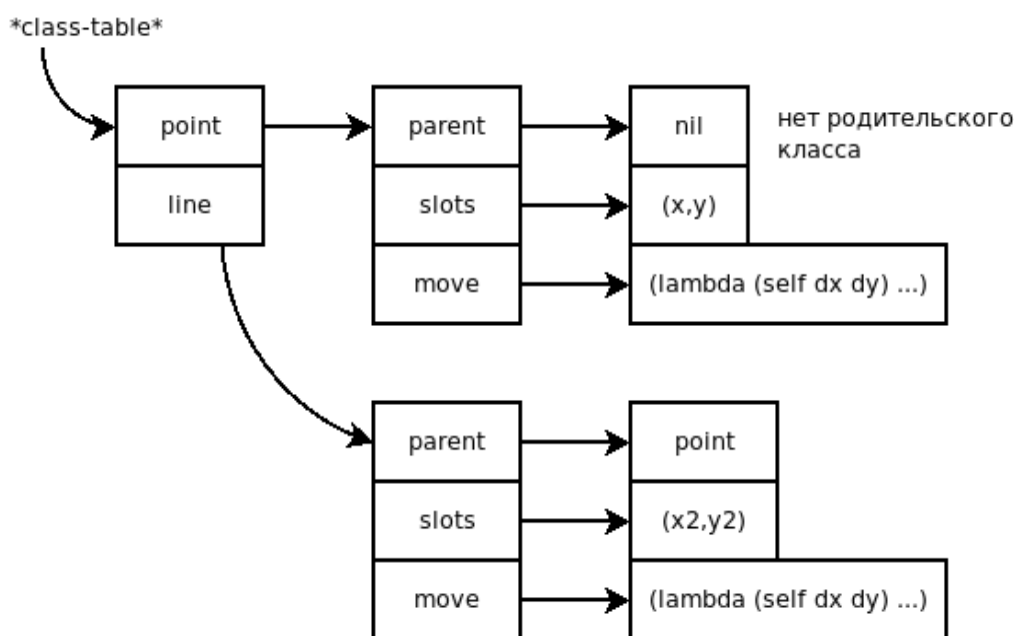


Рис. 14. Таблица классов

Fig. 14. Class table

При создании класса создается объект таблицы классов, заполняются его поля, и он добавляется в таблицу. Также здесь удобно автоматически создать конструктор экземпляра с инициализацией полей класса. Имя конструктора генерируется как “make-” и имя класса. Тогда макрос создания класса будет иметь следующий вид (рис. 15).

В конструкторе создается экземпляр объекта, а далее используется генерация кода инициализации полей с помощью функции отображения списка полей. Вспомогательная функция *get-slots* получает список свойств класса, рекурсивно добавляя к нему список свойств родительского класса (рис. 16).

```

(defmacro defclass (name parent slots)
  "Создание _ нового _ класса      _ _ name _ – _ имя, _ parent _ – _ родительский _
  класс,
      _ _ slots _ – _ список _ полей"
  "(defclass _ point _ () _ (x _ y))"
  ‘(let ((class (make-hash)))
    (set-hash class 'parent 'parent)
    (set-hash class 'slots 'slots)
    (set-hash *class-table* 'name class)
    'name)
  ‘(defun ,(intern (concat "MAKE-" (symbol-name name))) ,(get-slots name)
    (let ((obj (make-instance ,name)))
      ,@(map '(lambda(s) ‘(setf (slot obj ',s) ,s)) (get-slots name))
      obj))
  ‘’,name)

```

Рис. 15. Макрос создания класса

Fig. 15. Class creation macro

```

(defun get-slots (class)
  "Получение _ списка _ свойств _ класса _ class"
  (if (null class) nil
    (let* ((cl (get-hash *class-table* class))
      (slots (get-hash cl 'slots))
      (parent (get-hash cl 'parent)))
      (append (get-slots parent) slots))))

```

Рис. 16. Функция получения свойств класса

Fig. 16. Class properties getting function

Удаление класса не представляет сложностей, так как совпадает с функцией удаления значения из хеш-таблицы классов по ключу – имени класса.

Объект-экземпляр класса представляет собой хеш-объект со всеми

свойствами (своими и всех родителей), также здесь необходим ключ class, который хранит имя класса данного объекта (рис. 17).

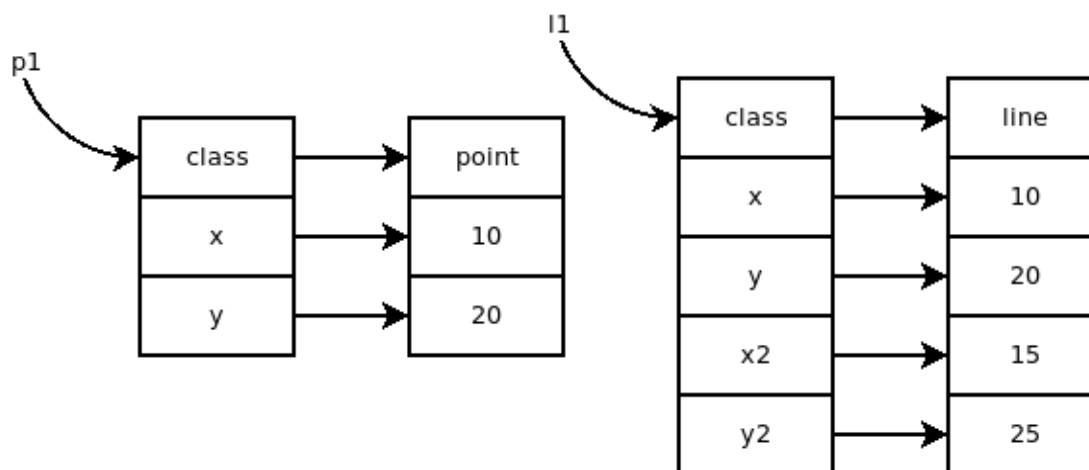


Рис. 17. Устройство объектов

Fig. 17. Objects structure

Создание экземпляра объекта представляет собой создание хеш-объекта, у которого устанавливается имя класса и все поля присваиваются в начальное значение nil (рис. 18). Также происходит

проверка, что требуемый класс присутствует в таблице классов.

Получение свойства объекта реализуется просто как получение значения из хеш-объекта по ключу (рис. 19).

```
(defmacro make-instance (class)
  "Создать _ экземпляр _ объекта _ класса _ class"
  "(make-instance _ 'point) _ -> _ ((X.nil)(Y.nil))"
  (if (not (check-key *class-table* class)) (concat "no _ class _" (symbol-name class))
      '(let ((object (make-hash)))
        (set-hash object 'class 'class)
        (app '(lambda (x) (set-hash object x nil)) ',(get-slots class))
        object)))
```

Рис. 18. Макрос создания экземпляра класса

Fig. 18. Class instance creation macro

```
(defmacro slot (obj key)
  "Возвращает _ значение _ свойства _ key _ у _ объекта _ obj"
  '(get-hash ,obj ,key))
```

Рис. 19. Макрос получения значения поля

Fig. 19. Property value getting macro

Установка нового значения в поле объекта происходит аналогично, используя функцию set-hash хеш-объекта.

Для реализации полиморфизма необходимо организовать диспетчеризацию –

поиск метода. Сначала проверяется, есть ли метод с данным именем в классе объекта, а затем функция рекурсивно вызывается с классом родителя объекта (рис. 20).

(defun get-method (class-name method-name)

"Рекурсивно _ возвращает _ тело _ метода _ method-name _ из _ класса _ class-name"

(if (null class-name) (concat "no _ method _" (symbol-name method-name))

(let ((class (slot *class-table* class-name)))

(if (check-key class method-name)

(slot class method-name)

(get-method (slot class 'parent) method-name))))))

Рис. 20. Функция поиска метода по имени и классу

Fig. 20. Method search function based on name and class

Когда определена вспомогательная функция поиска метода, возможно реализовать макрос создания нового метода. Этот макрос создает lambda-

функцию в объекте класса, а также создает функцию с именем метода, которая осуществляет динамическую диспетчеризацию – поиск метода (рис. 21).

(defmacro defmethod (name args &rest body)

"Определяет _ метод _ с _ именем _ name"

"args _ _ аргументы, _ первый _ аргумент _ состоит _ из _ имени _ экземпляра _ объекта _ и _ имени _ класса"

"body _ _ тело _ метода"

'(let* ((class-name (cadar args))

(class (slot *class-table* class-name)))

(set-hash class 'name '(lambda ,(cons (caar args) (cdr args)) ,@body))

(defun ,name ,(cons (caar args) (cdr args))

(funcall (get-method (slot ,(caar args) 'class) 'name) ,(caar args) ,@(cdr args))))))

Рис. 21. Макрос создания метода и генерации функции диспетчеризации

Fig. 21. Method creation and generation of dispatch function macro

При вызове метода родителя возможен бесконечный цикл поиска метода. Эту проблему можно решить, если

изменить класс объекта на класс родительского объекта, вызвать метод, а затем восстановить имя класса (рис. 22).

```
(defmacro super (method-name obj &rest args)
```

```
"Вызов _ метода _ method-name _ родителя _ экземпляра _ класса _ obj _ с _ аргумен-  
тами _ args"
```

```
‘(let ((origclass (slot ,obj 'class)) (res nil))
```

```
(setf (slot ,obj 'class) (slot (slot *class-table* (slot ,obj 'class)) 'parent))
```

```
(setq res (funcall (get-method (slot ,obj 'class) ',method-name) ,obj ,@args))
```

```
(setf (slot ,obj 'class) origclass)
```

```
res))
```

Рис. 22. Макрос вызова метода родительского класса

Fig. 22. Parent class method call macro

В результате реализации разработанная компактная объектно ориентированная система. Весь код этой системы вместе с функциями хеш-объектов занимает 97 строк. Здесь представлены только базовые возможности ООП, но можно добавить и другие функции, подобно тем, которые есть в других системах.

CLOS (Common Lisp Object System) – это одна из самых мощных объектных систем. Как и разработанная система, она динамическая, обладает динамической диспетчеризацией, но также позволяет множественное наследование, интроспекцию и содержит метаобъектный протокол. Разработанная система обладает гораздо меньшей функциональностью, но также меньше на несколько порядков.

MerooNet – еще одна простая реализация объектно ориентированной системы на языке Scheme. По своим возможностям она совпадает с разработанной системой, но также имеет

дополнительные возможности, такие как автоматическая генерация функций для получения и установки полей объекта, а также предикатов проверки принадлежности объекта конкретному классу. Также она включает определенные оптимизации.

Выводы

В результате работы была предложена концептуальная модель объектно ориентированной системы, которая была реализована с помощью функционального языка с поддержкой метапрограммирования. Было показано, что с помощью метапрограммирования можно создать маленькую по размеру кода, но в то же время функциональную динамическую объектную систему. Таким образом, в интерпретаторе с поддержкой метапрограммирования не нужно включать поддержку ООП, а существующий язык может быть расширен до необходимой функциональности с помощью макросов.

Список литературы

1. Bloch J. Effective Java: Programming Language Guide. URL: <https://theswissbay.ch/pdf/Gentoomen%20Library/Programming/Java/Addison%20Wesley%20-%20Effective%20Java%20Programming%20Language%20Guide.pdf> (дата обращения: 11.06.2024).
2. Цыбулько Д. М. Сравнение подходов проблемно ориентированного и объектно ориентированного программирования // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2015. № 7(77). С. 278–280. EDN WFEKVH
3. Шарыкин Р. Е. Методология разработки программного обеспечения с использованием модели распределенных объектно ориентированных стохастических гибридных систем // Информатика. 2022. Т. 19, № 1. С. 88–95. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-1-88-95>. EDN DIHJAV
4. Abelson H., Sussman G. J., Sussman J. Structure and Interpretation of Computer Programs. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2004. 268 p.
5. Domkin V. Programming Algorithms in Lisp. Berkeley: Apress, Ins., 2021. 377 p.
6. Вторников А. Lisp: маленький гигант // Системный администратор. 2016. № 6(163). С. 64–69. EDN VZGXVD
7. Ершов А. П., Покровский С. Б. Эволюция языков программирования // Проблемы информатики. 2017. № 2(35). С. 70–79. EDN ZOLFPJ
8. Романов С. С. Ключевые понятия и особенности объектно ориентированного программирования // Таврический научный обозреватель. 2016. № 12-2(17). С. 141–146. EDN YFXCCN
9. Паттерны объектно ориентированного проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес. СПб.: Питер, 2024. 448 с.
10. Nystrom R. Crafting interpreters. Moscow: Nobel Press, 2024. 640 p.
11. How (and why) developers use the dynamic features of programming languages: the case of smalltalk / O. Callaú, R. Robbes, É. Tanter, D. Röthlisberger // Empirical Software Engineering. 2013. Vol. 18, N 6. P. 1156–1194. <https://doi.org/10.1007/s10664-012-9203-2>. EDN YOGDYK
12. Пол Г. ANSI Common LISP. СПб.: Символ-Плюс, 2020. 448 с.
13. Малов А. В., Родионов С. В. Реализация упрощенного алгоритма Байеса в среде функционального программирования COMMON LISP // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 2. С. 32–37.
14. Сайбель П. Практическое использование Common Lisp. М.: ДМК Пресс, 2017. 488 с.
15. Кочан С. Программирование на Objective-C. М.: ЭКОМ Паблишерз, 2014. 550 с.
16. Страуструп Б. Язык программирования C++. Краткий курс. М.: Вильямс, 2019. 320 с.

17. Кувардин М. В. Сравнение структур данных связной список и массив структур с использованием примеров на языке программирования C++ // Научные исследования XXI века. 2021. № 2(10). С. 69–72. EDN TVPPBJ
18. Стивен Ф. Лотт, Дастин Ф. Объектно ориентированный Python. 4-е изд. СПб.: Питер, 2024. 704 с.
19. Шилд Г. Java. Полное руководство. 12-е изд. М.: Диалектика-Вильямс, 2023. 1344 с.
20. Чаплыгин А. А. Моделирование интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. № 14(2). С. 181–193. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>

References

1. Bloch J. Effective Java: Programming Language Guide. Available at: <https://theswissbay.ch/pdf/Gentoomen%20Library/Programming/Java/Addison%20Wesley%20-%20Effective%20Java%20Programming%20Language%20Guide.pdf> (accessed 11.06.2024).
2. Tsybulko D.M. Comparison of problem-oriented and object-oriented programming approaches. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT = Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT*. 2015;(7):278–280. (In Russ.) EDN WFEKVH
3. Sharykin R.E. Methodology of software development using a model of distributed object-oriented stochastic hybrid systems. *Informatika = Informatics*. 2022;19(1):88–95. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-1-88-95>. (In Russ.) EDN DIHJAV
4. Abelson H., Sussman G.J., Sussman J. Structure and Interpretation of Computer Programs. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press; 2004. 268 p.
5. Domkin V. Programming Algorithms in Lisp. Berkeley: Apress, Ins.; 2021. 377 p.
6. Tuesdays A. Lisp: The Little Giant. *Sistemnyi administrator = System Administrator*. 2016;(6):64–69. (In Russ.) EDN VZGXVD
7. Ershov A.P., Pokrovsky S.B. Evolution of programming languages. *Problemy informatiki = Problems of Computer Science*. 2017;2(35):70–79. (In Russ.) EDN ZOLFPJ
8. Romanov S.S. Key concepts and features of object-oriented programming. *Tavricheskii nauchnyi obozrevatel' = The Tauride Scientific Observer*. 2016;(12):141–146. (In Russ.) EDN YFXCCN
9. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Patterns of object oriented design. St. Petersburg: Piter; 2024. 448 p. (In Russ.)
10. Nystrom R. Crafting interpreters. Moscow: Nobel Press; 2024. 640 p.

11. Callaú O., Robbes R., Tanter É., Röthlisberger D. Chow (and why) developers use the dynamic features of programming languages: the case of smalltalk. *Empirical Software Engineering*. 2013;18(6):1156–1194. <https://doi.org/10.1007/s10664-012-9203-2>. EDN YOGDYK
12. Paul G. ANSI Common LISP. St. Petersburg: Simvol-Plyus; 2020. 448 p. (In Russ.)
13. Malov A.V., Rodionov S.V. Implementation of the simplified Bayes algorithm in the COMMON LISP functional programming environment. *Izvestiya SPbSETU "LETI" = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2015;(2):32–37. (In Russ.)
14. Saibel P. Practical use of Common Lisp. Moscow: DMK Press; 2017. 488 p. (In Russ.)
15. Kochan S. Programming in Objective-C. Moscow: ECOM Publishers; 2014. 550 p. (In Russ.)
16. Stroustrup B. C++ programming language. Short course. Moscow: Vil'yams; 2019. 320 p.
17. Kuvardin M.V. Comparison of data structures a linked list and an array of structures using examples in the C++ programming language. *Nauchnye issledovaniya XXI veka = Scientific Research of the XXI Century*. 2021;(2):69–72. (In Russ.) EDN TVPPBJ
18. Stephen F. Lott, Dusty F. Object Oriented Python. 4th ed. Moscow: Piter; 2024. 704 p. (In Russ.)
19. Shield G. Java. A complete guide. 12th ed. Moscow: Dialectics-Williams; 2023. 1344 p. (In Russ.)
20. Chaplygin A.A. Modeling of a functional programming language interpreter with metaprogramming capabilities. *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):181–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>

Информация об авторе / Information about the Author

Чаплыгин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

Aleksandr A. Chaplygin, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

– лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200–250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций ($\sin$, $\cos$, $\tg$ и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>.