

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

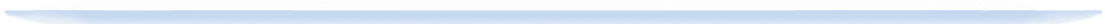
Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 14 № 1 / 2024



Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 14 № 1 / 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).

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)

Корневский 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 29.03.2024. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 04.04.2024

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 18,7.

Тираж 1000 экз. Заказ 8.

16+



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

Peer-reviewed scientific journal

Published since 2011

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher:

“Southwest State University”

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

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

ISSN 2223-1536 (Print)

DOI Prefix: 10.21869

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

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str., 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 44288

in the General Catalogue “Pressa Rossii”

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. A. Leonova

© Southwest State University, 2024



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

Signed for printing 29.03.2024. Format 60×84/8.

Release date 04.04.2024.

Offset paper. Printer's sheets: 18,7.

Circulation 1000 copies. Order 8.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
<i>Оригинальные статьи</i>	
Анализ эффективности применения двухэтапных нейросетевых моделей для раннего обнаружения лесных пожаров	8
<i>Киселев А. В., Брусенцев Н. С., Кулешова Е. А.</i>	
Методы оценки показателей гемодинамики почек после проведения малоинвазивных методик лечения мочекаменной болезни	24
<i>Холименко И. М., Серегин С. П., Родионова С. Н., Пугжилис А. В.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	36
<i>Оригинальные статьи</i>	
Исследование воздействия концентратора механических напряжений на процессы возникновения и развития трещин в конструктивных элементах авиационной техники	36
<i>Сизонов И. И., Лебедев Е. Л., Попов А. Н., Мухин И. Е.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	50
<i>Оригинальные статьи</i>	
Автоматическое распознавание частиц на цифровых изображениях	50
<i>Опарин Е. С., Дзус М. А., Давыдов Н. Н., Хорьков К. С.</i>	
Автоматизированная классификация абдоминальных ультразвуковых изображений поджелудочной железы на основе спектрального представления контуров ее границы	67
<i>Кузьмин А. А., Сухомлинов А. Ю., Часиб Хасан Аль-Дарраджи, Томакова Р. А., Долженков С. Д., Шульга Л. В.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	88
<i>Оригинальные статьи</i>	
Система учета и мониторинга расходов электроэнергии на основе геопространственных данных расположения потребителей	88
<i>Лапина Т. И., Малыхина В. С., Крупчатников Р. А.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	104
<i>Оригинальные статьи</i>	
Аналитическое моделирование эластографии молочной железы	104
<i>Кравчук Д. А., Чернов Н. Н., Михралиева А. И.</i>	
Модель информационного обеспечения регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами	115
<i>Александров Д. В., Гуламов А. А.</i>	
Модель прототипа экспертной системы для формирования единого классификатора компетенций	131
<i>Брежнев А. В., Дорожкин С. Д., Тивиков П. С.</i>	
Компьютерная оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шеи на основании данных МРТ-исследований	149
<i>Мохова Е. С., Колсанов А. В.</i>	
К сведению авторов.....	162

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
<i>Original articles</i>	
Analysis of the Effectiveness of Using Two-Stage Neural Network Models for Early Detection of Forest Fires.....	8
<i>Kiselev A. V., Brusencev N. S., Kuleshova E. A.</i>	
Methods for Assessing Renal Hemodynamics after Minimally Invasive Treatment of Urolithiasis	24
<i>Kholimenko I. M., Seregin S. P., Rodionova S. N., Pugzhilis A. V.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	36
<i>Original articles</i>	
Investigation of the Effect of a Mechanical Stress Concentrator on the Processes of Occurrence and Development of Cracks in Structural Elements of Aviation Equipment	36
<i>Sizonov I. I., Lebedev E. L., Popov A. N., Mukhin I. E.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	50
<i>Original articles</i>	
Automatic Particle Recognition Based on Digital Image Processing.....	50
<i>Oparin E. S., Dzuz M. A., Davydov N. N., Khorkov K. S.</i>	
Automated Classification of Abdominal Ultrasound Images of the Pancreas Based on the Spectral Representation of the Border's Contours	67
<i>Kuzmin A. A., Sukhomlinov A. Yu., Chasib Hasan Al-Darraj, Tomakova R. A., Dolzhenkov S. D., Shulga L. V.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	88
<i>Original articles</i>	
Accounting and Monitoring System of Electricity Expenditures Based on Geospatient Data Consumers Location	88
<i>Lapina T. I., Malykhina V. S., Krupchatnikov R. A.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	104
<i>Original articles</i>	
Analytical Modeling of Breast Elastography	104
<i>Kravchuk D. A., Chernov N. N., Mihralieva A. I.</i>	
Model of Information Support for a Regional Operator for the Management of Municipal Solid Waste	114
<i>Aleksandrov D. V., Gulamov A. A.</i>	
Model of a Prototype Expert System for the Formation of a Simple Classifier of Competencies	130
<i>Brezhnev A. V., Dorozhkin S. D., Tivikov P. S.</i>	
Computer Assessment of the Risk of Herniated Protrusions of the Intervertebral Discs of the Neck Based on MRI Data.....	148
<i>Mokhova E. S., Kolsanov A. V.</i>	
Information for Authors.....	162

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-8-23>



УДК 004.93

Анализ эффективности применения двухэтапных нейросетевых моделей для раннего обнаружения лесных пожаров

А. В. Киселев¹ ✉, Н. С. Брусенцев¹, Е. А. Кулешова¹

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 двухэтапных нейросетевых моделей для решения задачи обнаружения лесных пожаров на изображениях, полученных с беспилотных летательных аппаратов.

Методы. Синтезирован тренировочный набор данных, предназначенный для обучения нейросетевых моделей с целью детекции и семантической сегментации лесных пожаров на изображениях. Для обучения использовались двухэтапные нейросетевые модели (Faster R-CNN, Mask RCNN ... Retina-Net). Обучение нейросетевых моделей проводилось в соответствии с едиными параметрами, установленными для всех моделей с целью обеспечения согласованности и общей основы экспериментов. Проведена оптимизация параметров моделей в процессе обучения для минимизации функции потерь классификации. Для синтеза тестовой выборки использовался видеоряд, охватывающий события лесных пожаров в Иркутской области, который был снят беспилотным летательным аппаратом. С использованием специально разработанного скрипта на языке программирования Python проведен процесс разбиения данного видеоряда на отдельные кадры, которые использовались в качестве тестового набора данных при оценке качества классификации обученных нейросетевых моделей.

Результаты. На основе анализа полученных значений показателя качества, а также визуального анализа на тестовом наборе данных, произведенного в рамках тестирования нейросетевых моделей, проведена оценка эффективности исследуемых моделей обнаружения лесных пожаров на изображениях. Для оценки качества бинарной классификации нейросетевых моделей использовался показатель качества Accuracy (точность классификации).

Заключение. Экспериментальные исследования на тестовом наборе данных показали, что модель Retina-Net демонстрирует наименьшую по сравнению с другими исследованными нейросетевыми моделями, но приемлемую результативность. Двухэтапные нейросетевые модели Faster R-CNN и Mask R-CNN демонстрируют близкие значения показателя точности классификации (0,9492 и 0,9521 соответственно), что позволяет рекомендовать их для использования в системах раннего обнаружения лесных пожаров.

© Киселев А. В., Брусенцев Н. С., Кулешова Е. А., 2024

Ключевые слова: лесные пожары; сверточная нейронная сеть; нейросетевые модели; классификация объектов на изображении; семантическая сегментация; бинарная классификация; оценка качества бинарной классификации.

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

Для цитирования: 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>.

Поступила в редакцию 18.01.2024

Подписана в печать 16.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Analysis of the Effectiveness of Using Two-Stage Neural Network Models for Early Detection of Forest Fires

Alexey V. Kiselev¹ ✉, Nikita S. Brusencev¹, Elena A. Kuleshova¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Abstract

The purpose of the research – analysis of the effectiveness of two-stage neural network models for solving the problem of detecting forest fires in images obtained from unmanned aerial vehicles.

Methods. A training dataset was synthesized for training neural network models for the purpose of detection and semantic segmentation of forest fires in images. Two-stage neural network models ("Faster R-CNN", "Mask RCNN" and "Retina-Net") were used for training. The neural network models were trained according to the same parameters set for all models in order to ensure consistency and a common basis for experiments. Optimization of model parameters during the training process was carried out to minimize the classification loss function. To synthesize the test sample, we used a video sequence covering the events of forest fires in the Irkutsk region, which was filmed by an unmanned aerial vehicle. Using a specially developed script in the Python programming language, the process of dividing this video sequence into separate frames was carried out, which were used as a test data set when assessing the quality of classification of trained neural network models.

Results. Based on the analysis of the obtained values of the quality criterion, as well as visual analysis on the test data set produced as part of testing neural network models, the effectiveness of the studied models for detecting forest fires in images was assessed. To assess the quality of binary classification of neural network models, the quality criterion "Accuracy" (classification accuracy) was used.

Conclusion. Experimental studies on a test data set showed that the Retina-Net model demonstrates the lowest, but acceptable, performance compared to other studied neural network models. The two-stage neural network models "Faster R-CNN" and "Mask R-CNN" demonstrate similar classification accuracy values (0.9492 and 0.9521, respectively), which allows us to recommend them for use in early detection systems for forest fires.

Keywords: forest fires; convolutional neural network; neural network models; classification of objects in the image; semantic segmentation; binary classification; quality assessment of binary classification.

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., Brusencev 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>.

Received 18.01.2024

Accepted 16.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

Лесные пожары (ЛП) имеют широкий спектр негативных последствий и являются одной из наиболее актуальных экологических проблем современности. ЛП оказывают существенное воздействие на биоразнообразие, уничтожая флору и фауну, приводя к снижению популяций различных видов. Кроме того, уничтожение природных ресурсов ЛП наносит серьезный вред экономике [1].

Еще одним тревожным аспектом ЛП является их прямое воздействие на человеческую жизнь и здоровье. Задымление и выбросы токсичных веществ, создаваемые ЛП, значительно снижают качество воздуха, что приводит к отравлениям продуктами горения, а также к возникновению риска заболеваний дыхательной системы. Сам огонь также несет опасность для физического здоровья людей, включая возможность ожогов, травм и даже потери жизни [2].

Таким образом, можно сделать вывод, что ЛП являются сложной экологической проблемой, требующей комплексных усилий и междисциплинарного подхода для их предотвращения, контроля и борьбы, с помощью

разработки и внедрения эффективных стратегий пожарной безопасности [3].

Вмешательство человека в природные экосистемы сопровождается изменениями климата и повышением температур, что, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности и распространения ЛП [4].

В свете этих факторов раннее обнаружение и эффективная локализация ЛП становятся необходимостью. Разработка и внедрение передовых технологий и систем дистанционного зондирования, таких как спутниковые системы наблюдения и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), позволяют повысить скорость и точность обнаружения ЛП, что, в свою очередь, позволяет ускорить оперативность реагирования [5].

Таким образом, повышение эффективности раннего обнаружения и локализации ЛП является ключевым аспектом в борьбе с ними. Постоянные исследования и инновационные подходы к мониторингу и борьбе с ЛП играют важную роль в сохранении природных ресурсов, защите биоразнообразия и обеспечении безопасности и благополучия человеческого общества [6].

Согласно статистическим данным за 2023 г., приведенным в [7], количество ЛП в России достигло рекордно высоких значений. Эти статистические данные подчеркивают нарастающую потребность в эффективных методах мониторинга и предупреждения ЛП для минимизации их разрушительного воздействия.

Традиционные методы обнаружения ЛП могут быть недостаточно эффективными, поэтому использование новых технологий представляет значительный потенциал для улучшения систем обнаружения ЛП [8].

Применение алгоритмов машинного обучения позволяет значительно повысить эффективность анализа видеоданных с БПЛА для раннего обнаружения и локализации ЛП [9].

В работе [10] описан метод обнаружения ЛП, основанный на объединении традиционных технологий обработки изображений и технологии сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Network, CNN), а также вводится подход адаптивного пула. Проведенные авторами эксперименты показывают, что метод сверточной нейронной сети (СНС), основанный на методе адаптивного пула, имеет лучшую производительность и более высокую скорость распознавания.

В работе [11] авторами предлагается методология обнаружения ЛП, основанная на методах компьютерного зрения и искусственного интеллекта. Для

решения проблем, связанных с длительным временем обучения СНС и неэффективностью предварительно обученных моделей при отсутствии достаточного объема данных, авторы предлагают метод трансферного обучения на предварительно обученных моделях, сопровождаемый использованием метода обучения без «забывания» (Learning without Forgetting). Этот подход предназначен для сохранения прежних способностей модели при новом обучении, предотвращая потерю ее классификационных навыков на исходных данных. Этот метод позволяет улучшить эффективность системы раннего обнаружения ЛП и снизить количество ложных срабатываний, что критически важно для оперативных мер по их ликвидации.

Также следует отметить исследование [12], посвященное проблеме выбора оптимизатора для обучения СНС при решении задачи классификации ЛП. Авторы провели анализ эффективности различных оптимизаторов при обучении СНС для классификации ЛП на изображениях.

В работе [13] авторами проведено исследование применения одноэтапных нейросетевых моделей (НМ) (на примере YOLOv3) для решения задачи обнаружения пожаров на аэрофотоснимках, полученных с БПЛА. Приводится подробное описание процедур конфигурирования набора данных и обучения одноэтапной НМ для обнаружения пожара на фото- и видеоизображениях.

В работе [14] авторами предложен улучшенный метод обнаружения дыма от ЛП, основанный на использовании СНС. Используя усовершенствованную СНС, авторы провели оптимизацию многозначных ядер свертки и внедрили стратегии пакетной нормализации для улучшения функций потерь, что способствовало увеличению эффективности и устойчивости модели. Эксперименты демонстрируют, что предложенная СНС автоматически изучает характеристики дыма на ранних стадиях ЛП с высокой точностью распознавания.

В работе [15] авторы представляют метод раннего обнаружения ЛП, используя подход сегментации на основе метода опорных векторов (Support Vector Machine) и две архитектуры СНС (VGG16 и ResNet50) на обучающем наборе данных.

В работе [16] авторы предлагают кэшированную СНС, направленную на ускорение обнаружения ЛП. Эта модель классифицирует входные изображения, основываясь на их сходстве с предыдущими изображениями, что повышает эффективность обнаружения.

В работе [17] предложенный авторами метод направлен на обнаружение пожаров в горных условиях и основан на применении СНС с использованием метода аугментации изображения. Также в рамках исследования проводится анализ воздействия аугментации изображения в различных пространственных областях на точность обнаружения пожаров.

Результаты исследования демонстрируют, что оптимизированная СНС, применяющая несколько различных методов аугментации изображения, способна повысить точность обнаружения ЛП по сравнению со СНС, в которой отсутствует аугментация данных.

В работе [18] авторы предлагают метод обнаружения ЛП с использованием глубокого обучения на основе модели SqueezeNet. Предложенный метод использует статические изображения из лесных районов с разными погодными условиями для классификации наличия или отсутствия пожара.

В работе [19] авторы подходят к проблеме ЛП, предлагая оптимизированный метод обнаружения на основе глубокого обучения. Рассматриваются архитектуры СНС для семантической сегментации изображений ЛП. Четыре модели семантической сегментации тщательно анализируются с использованием набора данных, содержащего снимки дистанционного зондирования ЛП, полученных с БПЛА.

В работе [20] авторы представляют метод обнаружения ЛП с использованием СНС, интегрированной в вычислительное устройство Raspberry Pi. В работе рассматривается проблема детекции ЛП, для ее решения предложена модель СНС, которая успешно интегрируется в аппаратное обеспечение Raspberry Pi. Этот подход позволяет обеспечить эффективное обнаружение ЛП с

минимальным использованием вычислительных ресурсов.

Таким образом, в контексте существующих исследований задача обнаружения и классификации объектов на изображении, в частности ЛП, ориентирована на применение и сравнение различных моделей нейронных сетей и оценку их эффективности в реальных условиях. Важным моментом является также оценка качества классификации, которая имеет непосредственное влияние в вопросе оперативного решения проблемы ранней локализации ЛП.

Материалы и методы

Задача обнаружения и классификации объектов на изображении представляет собой область машинного обучения, направленную на выявление присутствия или отсутствия объектов в определенной области на изображении. Эта задача включает в себя определение границ объекта в системе координат пикселей исходного изображения.

Для решения поставленной задачи был синтезирован тренировочный набор данных, предназначенный для обучения нейросетевых моделей (НМ) с целью детекции и семантической сегментации ЛП на изображениях. Данный набор данных был сформирован из 5915 фотографий, полученных из открытых источников, специально отобранных в соответствии с темой исследования.

Тренировочный набор данных был разделен на две ключевые части —

тренировочную и валидационную выборку. Такой подход обеспечивает возможность эффективного обучения НМ на разнообразных данных, а также последующей проверки качества классификации на независимой валидационной выборке.

Дополнительно к разделению на выборки была проведена аугментация данных с использованием различных техник, таких как изменение масштаба, повороты и отражения. Этот этап предназначен для обогащения данных и способствует увеличению разнообразия обучающего набора и улучшению обобщающей способности НМ.

Кроме того, тренировочный набор данных был модернизирован для обучения НМ, связанной с семантической сегментацией. Этот этап включал в себя дополнительную разметку данных с использованием сегментационных масок, что позволяет НМ выделять области ЛП на изображениях с высокой точностью.

Таким образом, описанный тренировочный набор данных представляет собой основной инструмент для обучения НМ, направленных на автоматическое обнаружение и сегментацию ЛП, а проведенные процессы разделения, аугментации и модернизации способствуют формированию разнообразного обучающего набора, позволяющего провести эффективное обучение.

Обучение НМ проводилось в соответствии с едиными параметрами, установленными для всех моделей с целью

обеспечения согласованности и общей основы экспериментов. Параметры обучения были тщательно выбраны для оптимальной сходимости и высокого качества результатов.

Для обучения использовались двухэтапные (Faster R-CNN, Mask RCNN и Retina-Net) НМ. Каждая НМ была настроена на решение задачи детекции ЛП.

Параметры обучения:

1. Максимальное количество итераций обучения было установлено на уровне 2000, который является достаточным для эффективного обучения.

2. Оценка НМ на тестовом наборе данных выполнялась периодически – каждые 200 итераций, что позволяет оценить прогресс и качество обучения в процессе выполнения эксперимента.

3. Базовая скорость обучения была установлена на уровне 0,001, что обеспечивает стабильность и конвергенцию в процессе оптимизации весов НМ.

4. Количество изображений в пакете было установлено равным 64, что обеспечивает баланс между высокой информативностью и эффективностью обучения.

5. Использовался двоичный формат масок, что позволяет эффективно представлять пространственную информацию о местоположении объектов на изображениях.

Проведена оптимизация параметров НМ в процессе обучения для мини-

мизации функции потерь (ФП) классификации. В бинарной классификации используется двоичная ФП, которая определяется как

$$f(\hat{y}, y) = \begin{cases} 1, & \hat{y} \neq y, \\ 0, & \hat{y} = y, \end{cases} \quad (1)$$

где $\hat{y}$ – рассматриваемый элемент; y – эталонный элемент класса.

Таким образом, потери определяются появлением двух взаимоисключающих состояний выхода НМ.

ФП Loss Box Regression применяется для измерения расхождения между предсказанными координатами ограничивающих рамок и их истинными значениями. Для определения достоверности местоположения ограничивающей рамки используется отношение площадей ограничивающих рамок (Intersection over Union, IoU):

$$IoU = \frac{S(A \cap B)}{S(A \cup B)}, \quad (2)$$

где A и B – предсказанная ограничивающая рамка и настоящая ограничивающая рамка соответственно; $IoU = 0$, если A и B не пересекаются; $IoU = 1$ – в случае идеального наложения.

Высокие значения данной ФП могут свидетельствовать о недостаточной точности определения координат ограничивающих рамок НМ. Графическое представление ФП Loss Box Regression, полученных в ходе обучения двухэтапных НМ, изображено ниже (рис. 1).

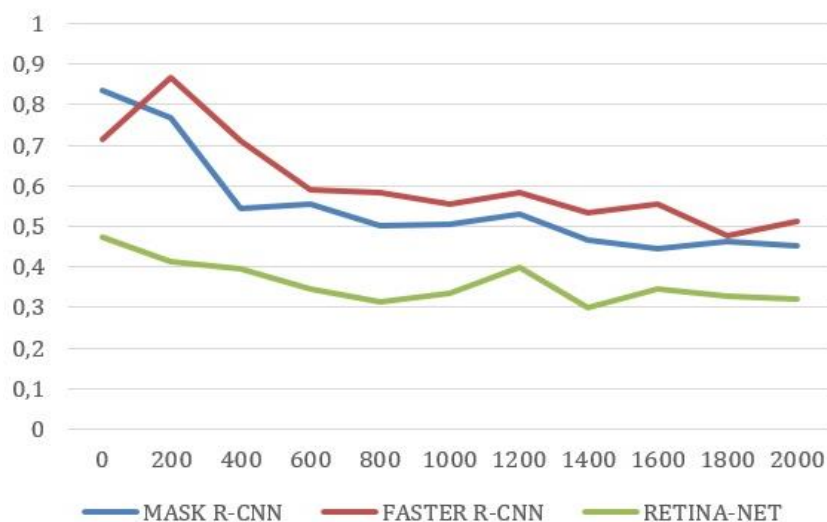


Рис. 1. ФП Loss Box Regression для двухэтапных моделей

Fig. 1. Loss Box Regression function for two-stage models

Функция общих потерь для двухэтапных НМ (total_loss) представляет собой сумму всех компонентов потерь в процессе обучения. Функция отражает

общую эффективность НМ, учитывая как потери классификации, так и потери регрессии (рис. 2).

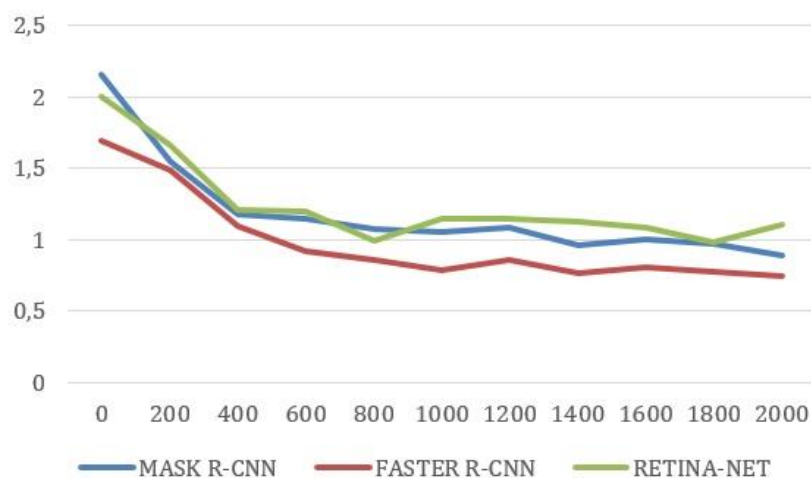


Рис. 2. Функция общих потерь для двухэтапных моделей

Fig. 2. Total loss function for two-stage models

Результаты и их обсуждение

После обучения НМ был проведен ряд экспериментов на тестовой выборке. Тестовая выборка представляет собой видеоряд, снятый БПЛА, который охватывает события ЛП в Иркутской области. С использованием специально разработанного скрипта на

языке программирования Python был проведен процесс разбиения данного видеоряда на отдельные кадры. Эти кадры использовались в качестве тестового набора данных при оценке качества классификации обученных НМ. Данный подход позволил систематизировать и стандартизировать тестовые

данные и обеспечить надежные исходные материалы для оценки алгоритмов обнаружения ЛП.

Рассмотрим визуализацию результатов обнаружения ЛП, полученных НМ Retina-Net (рис. 3).



Рис. 3. Результаты обнаружения НМ Retina-Net

Fig. 3. Detection results of the neural network model Retina-Net

Визуализация результатов обнаружения ЛП, полученных НМ Faster R-CNN, представлена ниже (рис. 4).

Рассмотрим визуализацию результатов обнаружения ЛП, полученных НМ Mask R-CNN (рис. 5).

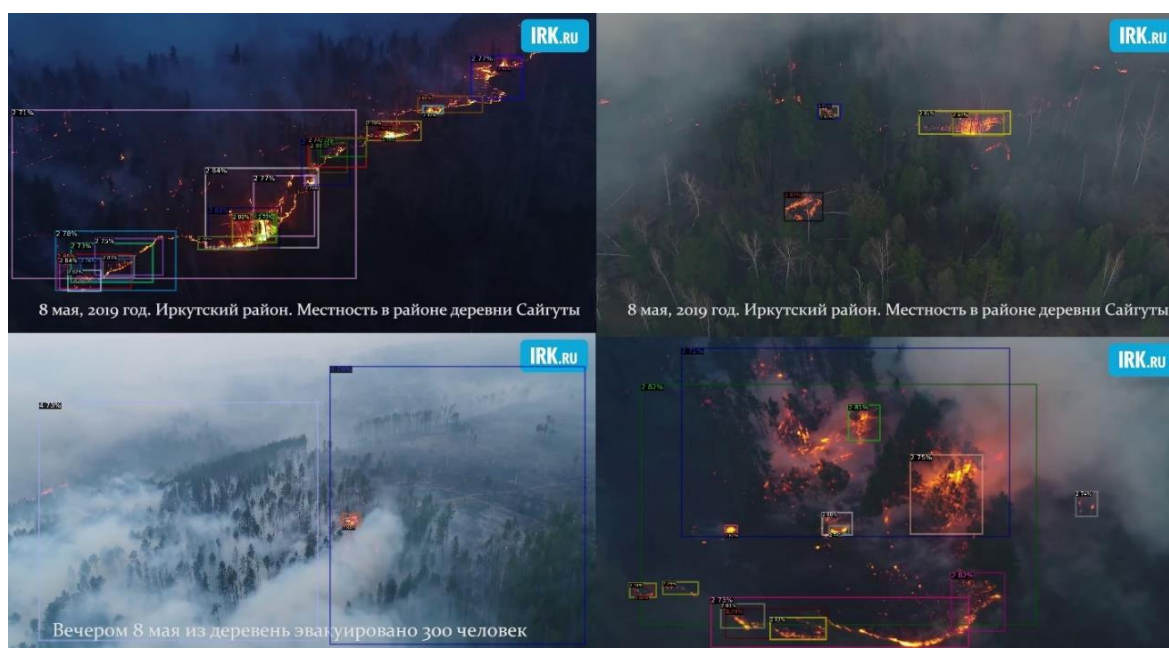


Рис. 4. Результаты обнаружения НМ Faster R-CNN

Fig. 4. Detection results of the neural network model Faster R-CNN



Рис. 5. Результаты сегментации NM Mask R-CNN

Fig. 5. Detection results of the neural network model Mask R-CNN

Показатель качества классификации должен выбираться таким образом, чтобы он зависел как от ошибок первого, так и второго рода, а недопустимо большие ошибки хотя бы одного вида снижали бы показатель качества классификации к недопустимым значениям [21].

Для оценки качества бинарной классификации по обучающей выборке $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ при $y_i \in \{0,1\}$ НМ, которые по объекту x предсказывают принадлежность класса $f(x) \in \{0,1\}$, использовался показатель качества Accuracy (точность классификации). Данный показатель определяется следующим образом:

$$Accuracy(y, \hat{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i = f(x_i)]. \quad (3)$$

Рассмотрим графическое представление оценки качества классификации с

помощью показателя качества Accuracy для двухэтапных НМ (рис. 6).

На основе анализа полученных значений показателя качества, а также визуального анализа на тестовом наборе данных, произведенного в рамках тестирования НМ, можно сделать вывод о степени эффективности исследуемых моделей для обнаружения ЛП на изображениях. При углубленном рассмотрении результатов тестирования установлено, что модель Retina-Net демонстрирует наименьшие значения показателя точности классификации (0,879) по сравнению с другими исследованными НМ. Визуальный анализ результатов классификации с помощью НМ Retina-Net подтверждает ее наименьшую, но приемлемую результативность.

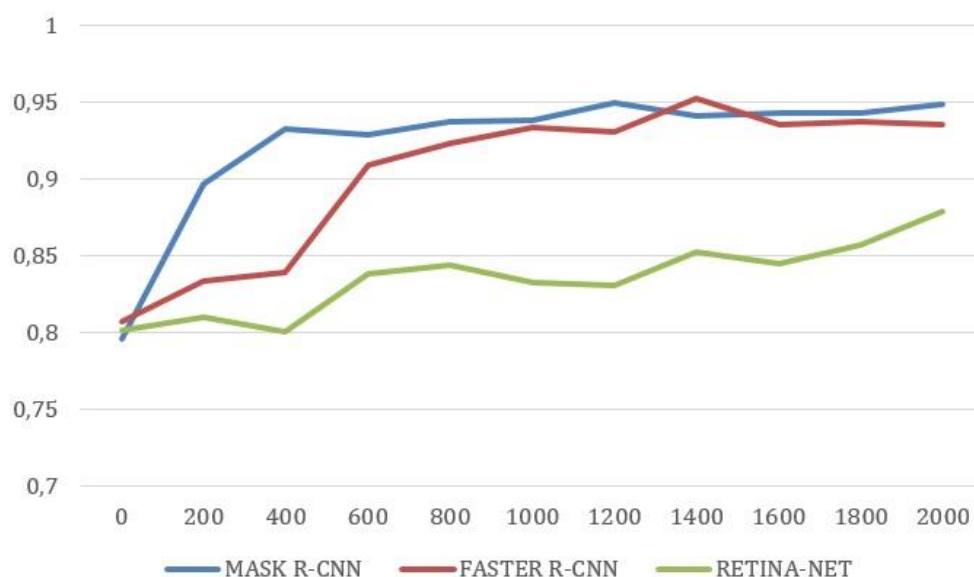


Рис. 6. Результаты оценки качества классификации двухэтапных моделей

Fig. 6. Results of assessing the quality of classification of two-stage models

НМ Faster R-CNN и Mask R-CNN демонстрируют близкие значения показателя точности классификации (0,9492 и 0,9521 соответственно), что также подтверждается визуальным анализом результатов классификации на тестовых изображениях.

Выводы

Синтезирован тренировочный набор данных, предназначенный для обучения двухэтапных НМ (Faster R-CNN, Mask RCNN и Retina-Net) с целью детекции и семантической сегментации ЛП на изображениях. Проведена оптимизация параметров моделей в процессе обучения для минимизации функции потерь классификации.

Проведен ряд экспериментов на тестовой выборке, синтезированной с

помощью специально разработанного скрипта.

Проведен анализ эффективности двухэтапных НМ для обнаружения ЛП на изображениях, полученных с БПЛА. Для оценки эффективности обнаружения ЛП на изображениях использовался показатель качества Accuracy (точность классификации). Экспериментальные исследования на тестовом наборе данных показали, что модель Retina-Net демонстрирует наименьшую по сравнению с другими исследованными НМ, но приемлемую результативность. Двухэтапные НМ Faster R-CNN и Mask R-CNN демонстрируют близкие значения показателя точности классификации (0,9492 и 0,9521 соответственно), что позволяет рекомендовать их для использования в системах раннего обнаружения ЛП.

Список литературы

1. Сибиркина А. Р., Лихачев С. Ф. О лесных пожарах в лесах Челябинской области за 2018-2021 годы и анализ требований к воспроизводству лесов в лесохозяйственном регламенте // Лесной вестник. 2023. Т. 27, № 5. С. 60–73. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-60-73>.
2. Yang L., Yusheng S. Estimates of Global Forest Fire Carbon Emissions Using FY-3 Active Fires Product // Atmosphere. 2023. Vol. 14, N 10. P. 1575. <https://doi.org/10.3390/atmos14101575>.
3. Ecological Impact of Forest Fires and Subsequent Restoration in Chile / V. Luz [et. al.] // Resources. 2018. Vol. 7, N 2. P. 26. <https://doi.org/10.3390/resources7020026>.
4. Конькова Ю. М. Лесные пожары как фактор утраты функций лесных экосистем // Новости науки в АПК. 2021. № 2. С. 111–13. <https://doi.org/10.25930/2218-855x/029.2.2021>.
5. Ковалев Р. Н., Еналеева-Бандура И. М., Никончук А. В. Оценка влияния пожаров на лесные экосистемы с учетом уровня развития лесотранспортной сети // Известия вузов. Лесной журнал. 2021. № 4. С. 131–149. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-131-149>.
6. Евдокименко М. Д., Кривобоков Л. В., Петренко А. Е. Лесозоологические последствия ландшафтных пожаров в Забайкалье // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2022. № 58. С. 153–180. <https://doi.org/10.17223/19988591/58/8>.
7. РБК (РосБизнесКонсалтинг). URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/64dcd6519a79472d7611c76f?ysclid=lowv68ywr7525405056> (дата обращения: 22.12.2023).
8. 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. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-93-110>.
9. Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А., Томакова Н. Г. Нефедов [и др.]. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>.
10. Yuanbin W., Langfei D., Jieying R. Forest fire image recognition based on convolutional neural network // Journal of Algorithms & Computational Technology. 2019. Vol. 13. P. 1–11. <https://doi.org/10.1177/1748302619887689>.

11. Forest fire and smoke detection using deep learning-based learning without forgetting / V. E. Sathishkumar [et. al.] // *Fire Ecology*. 2023. Vol. 19, N 9. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00165-0>.
12. Журавлева Н. А. Выбор оптимизатора для обучения сверточной нейронной сети: задача классификации лесных пожаров // *StudNet*. 2022. № 5. С. 4722–4737.
13. Шарапов А. А., Дамдынчап Ч. А. Применение нейронных сетей для распознавания дыма и пожара на изображениях // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021. № 2. С. 38–43.
14. Xiaofang S., Liping S., Yinglai H. Forest fire smoke recognition based on convolutional neural network // *J. For. Res.* 2021. N 32. P. 1921–1927. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01230-7>.
15. Environmental harm mitigation based on early forest fire detection using Deep CNN / R. I. Bendjillali [et. al.] // *The second International Conference on Energy Transition and Security*. Adrar, Algeria, 2023.
16. Nguyen T. L., Afanasiev D. A., Nguyen T. H. Segmentation of Forest Fire Images Based on Convolutional Neural Networks // *International Journal of Artificial Intelligence*. 2021. N 19. P. 21–35.
17. Forest Fire Detection Method Based on Convolutional Neural Network with Data Augmentation Optimization / L. Qilin [et. al.] // *Proceeding of 2022 International Conference on Wireless Communications, Networking and Applications (WCNA 2022)*. P. 769–776. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3951-0_84.
18. An Efficient Model for Forest Fire Detection using Deep Convolutional Neural Networks / B. Anjanadevi [et. al.] // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2023. Vol. 11, N 10. P. 177–181. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i10s.7617>.
19. Ziqi W., Tao P., Zhaoyou L. Comparative Research on Forest Fire Image Segmentation Algorithms Based on Fully Convolutional Neural Networks // *Forests*. 2022. Vol. 13, N 7. P. 1133. <https://doi.org/10.3390/f13071133>.
20. Forest Fire Detection and Prediction System Using Deep Learning and IOT / P. Deshmukh [et. al.] // *Soft Computing for Security Applications*. 2023. Vol. 1449. P. 813–828. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3608-3_56.
21. Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Киселев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова [и др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020. Т. 10, № 1. С. 114–133.

References

1. Sibirskina A. R., Lihachev S. F. O lesnyh pozharah v lesah Chelyabinskoy oblasti za 2018–2021 gody i analiz trebovaniy k vosproizvodstvu lesov v lesokhozyajstvennom reglamente [On forest fires in the forests of the Chelyabinsk region for 2018–2021 and analysis of requirements for forest reproduction in forest management regulations]. *Lesnoj vestnik = Forest Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 60–73. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-60-73>
2. Yang L., Yusheng S. Estimates of Global Forest Fire Carbon Emissions Using FY-3 Active Fires Product. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, p. 1575. <https://doi.org/10.3390/atmos14101575>
3. Luz V., eds. Ecological Impact of Forest Fires and Subsequent Restoration in Chile. *Resources*, 2018, vol. 7, no. 2, p. 26. <https://doi.org/10.3390/resources7020026>
4. Konkova Yu. M. Lesnyye pozhary, kak faktor utraty funktsiy lesnykh ekosistem [Forest fires as a factor in the loss of functions of forest ecosystems]. *Novosti nauki v APK = Science News in the Agro-Industrial Complex*, 2021, vol. 2, pp. 111–113. <https://doi.org/10.25930/2218-855x/029.2.2021>
5. Kovalev R. N., Enaleeva-Bandura I. M., Nikonchuk A. V. Ocenka vliyaniya pozharov na lesnye ekosistemy s uchetom urovnya razvitiya lesotransportnoy seti [Assessment of fire impact on forest ecosystems taking into account the level of forest transportation network development]. *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal = Proceedings from Universities. Forestry Journal*, 2021, vol. 4, pp. 131–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-131-149>
6. Evdokimenko M. D., Krivobokov L. V., Petrenko A. E. Lesoekologicheskie posledstviya landshaftnyh pozharov v Zabajkal'e [Forest-ecological consequences of landscape fires in Transbaikalia]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Bulletin of Tomsk State University. Biology*, 2020, no. 58, pp. 153–180. <https://doi.org/10.17223/19988591/58/8>
7. RBK (RosBiznesKonsalting) [RBC (RosBusinessConsulting)]. Available at: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/64dcd6519a79472d7611c76f?ysclid=lowv68ywr7525405056>. (accessed 22.12.2023)
8. Tomakova R. A., Filist S. A., Brezhneva A. N., eds. Metod i algoritm avtonomnogo planirovaniya trayektorii poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata pri monitoringe pozharnoy obstanovki v tselyakh rannego obnaruzheniya istochnika vozgoraniya [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: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 93–110. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-93-110>

9. Filist S. A., Tomakova R. A., Nefedov N. G., eds. Intellectual'naya sistema obrabotki izobrazheniy, poluchayemykh s bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Intelligent system for processing images received from unmanned aerial vehicles]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 64–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>
10. Yuanbin W., Langfei D., Jieying R. Forest fire image recognition based on convolutional neural network. *J. of Algorithms & Computational Technology*, 2019, vol. 13, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1177/1748302619887689>
11. Sathishkumar V. E., eds. Forest fire and smoke detection using deep learning-based learning without forgetting. *Fire Ecology*, 2023, vol. 19, no. 9. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00165-0>
12. Zhuravleva N. A. Vybory optimizatora dlya obucheniya svertochnoy neyronnoy seti: zadacha klassifikatsii lesnykh pozharov [Optimizer selection for training convolutional neural network: forest fire classification task]. *StudNet*, 2022, no. 5, pp. 4722–4737.
13. Sharapov A. A., Damdynchap Ch. A. Primeneniye neyronnykh setey dlya raspoznavaniya dyma i pozhara na izobrazheniyah [Application of neural networks for recognizing smoke and fire in images]. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2021, no. 2, pp. 38–43.
14. Xiaofang S., Liping S., Yinglai H. Forest fire smoke recognition based on convolutional neural network. *J. For. Res.*, 2021, no. 32, pp. 1921–1927. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01230-7>
15. Bendjillali R. I., eds. Environmental harm mitigation based on early forest fire detection using Deep CNN. The Second International Conference on Energy Transition and Security. Adrar, Algeria, 2023.
16. Nguyen T. L., Afanasiev D. A., Nguyen T. H. Segmentation of Forest Fire Images Based on Convolutional Neural Networks. *International Journal of Artificial Intelligence*, 2021, no. 19, pp. 21–35.
17. Qilin L., eds. Forest Fire Detection Method Based on Convolutional Neural Network with Data Augmentation Optimization. Proceeding of 2022 International Conference on Wireless Communications, Networking and Applications (WCNA 2022), pp. 769–776. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3951-0_84
18. Anjanadevi B., eds. An Efficient Model for Forest Fire Detection using Deep Convolutional Neural Networks. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2023, vol. 11, no. 10, pp. 177–181. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i10s.7617>

19. Ziqi W., Tao P., Zhaoyou L. Comparative Research on Forest Fire Image Segmentation Algorithms Based on Fully Convolutional Neural Networks. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 7, pp. 1133. <https://doi.org/10.3390/f13071133>
20. Deshmukh P., eds. Forest Fire Detection and Prediction System Using Deep Learning and IOT. *Soft Computing for Security Applications*, 2023, vol. 1449, pp. 813–828. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3608-3_56
21. Kiselev A. V., Shatalova O. V., Protasova Z. U., eds. Modeli latentnykh prediktorov v intellektual'nykh sistemakh prognozirovaniya sostoyaniya zhivyykh sistem [Models of latent predictors in intelligent systems for predicting the state of living systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 114–133.
-

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. Kiselyov, 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

Брусенцев Никита Сергеевич, студент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: brusencev2001@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-7805-2819

Nikita S. Brusencev, Student of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: brusencev2001@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-7805-2819

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

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-24-35>



УДК 615.47

Методы оценки показателей гемодинамики почек после проведения малоинвазивных методик лечения мочекаменной болезни

И. М. Холименко¹, С. П. Серегин²,
С. Н. Родионова²✉, А. В. Пугжилис²

¹ Курская областная многопрофильная клиническая больница
ул. Сумская, д. 45а, г. Курск 305007, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Мочекаменная болезнь занимает ведущее место среди всех урологических заболеваний после инфекционно-воспалительных. Кроме того, она не теряет своей актуальности в связи с тем, что число пациентов с данным заболеванием неуклонно растет.

Целью исследования является изучение особенностей изменения показателей гемодинамики почек после проведения малоинвазивных методик лечения мочекаменной болезни – дистанционной ударно-волновой литотрипсии (ДЛТ) и перкутанной нефролитотрипсии (ПНЛ) для повышения качества оказания медицинской помощи урологическим больным.

Методы. В многочисленных работах подробно показана эффективность использования дистанционной ударно-волновой литотрипсии и перкутанной нефролитотрипсии в лечении мочекаменной болезни почек. Данные методы малоинвазивные, хорошо переносятся пациентами, позволяют снизить риски осложнений, но они сопровождаются травмой почек, в частности, нарушением микроциркуляции. Применение доплерографического метода исследования позволяет высокоинформативно оценить степень нарушения микроциркуляции почки для диагностики мочекаменной болезни, в том числе и для оценки гемодинамики после проведения малоинвазивных методик лечения.

Результаты. В работе показано, что при применении доплерографии сосудов почек после дистанционной ударно-волновой литотрипсии и перкутанной нефролитотрипсии в динамике отмечается нарушение гемодинамики после ДЛТ уже в первые сутки. Кроме того, сроки нормализации показателей более длительные в сравнении с гемодинамикой после ПНЛ. Также при ПНЛ отмечается постепенный рост показателей кровотока в динамике послеоперационного периода.

Заключение. В работе показано, что ультразвуковая доплерография является эффективным методом динамической оценки почечного кровотока, а индикатором ренального повреждения является индекс резистентности, преимущественно в междольковых артериях.

Ключевые слова: мочекаменная болезнь; дистанционная литотрипсия; перкутанная нефролитотрипсия; ультразвуковая доплерография.

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

© Холименко И. М., Серегин С. П., Родионова С. Н., Пугжилис А. В., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(1): 24–35

Для цитирования: Формализованное информационное описание для медицинской экспертной системы / И. М. Холименко, С. П. Серегин, С. Н. Родионова, А. В. Пугжлиис // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 24–35. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-24-35>.

Поступила в редакцию 16.01.2024

Подписана в печать 14.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Methods for Assessing Renal Hemodynamics after Minimally Invasive Treatment of Urolithiasis

Ivan M. Kholimenko¹, Stanislav P. Seregin²,
Sofia N. Rodionova² ✉, Anastasia V. Pugzhilis²

¹ Kursk Regional Multidisciplinary Clinical Hospital
45a Sumskaya Str., Kursk 305007, Russian Federation

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of research. Urolithiasis occupies a leading place among all urological diseases after infectious and inflammatory ones. In addition, it does not lose its relevance due to the fact that the number of patients with this disease is steadily increasing. The aim of the study is to study the peculiarities of changes in renal hemodynamics after minimally invasive methods of treatment of urolithiasis - remote shock wave lithotripsy (DLT) and percutaneous nephrolithotripsy (PNL) to improve the quality of medical care for urological patients.

Methods. Numerous studies have shown in detail the effectiveness of using remote shock wave lithotripsy and percutaneous nephrolithotripsy in the treatment of kidney stones. These methods are minimally invasive, well tolerated by patients, and reduce the risks of complications, but they are accompanied by kidney injury, in particular, microcirculation disorders. The use of the Dopplerographic method of investigation allows for a highly informative assessment of the degree of impaired renal microcirculation for the diagnosis of urolithiasis, including for the assessment of hemodynamics after minimally invasive treatment methods.

Results. The work shows that when using dopplerography of renal vessels after remote shock wave lithotripsy and percutaneous nephrolithotripsy, a violation of hemodynamics after DLT is noted in dynamics already on the first day. In addition, the terms of normalization of indicators are longer in comparison with hemodynamics after PNL. Also, with PNL, there is a gradual increase in blood flow indicators in the dynamics of the postoperative period.

Conclusion. The work shows that ultrasound Dopplerography is an effective method of dynamic assessment of renal blood flow, and the indicator of renal damage is the resistance index, mainly in the interlobular arteries.

Keywords: urolithiasis; remote lithotripsy; percutaneous nephrolithotripsy; ultrasound dopplerography.

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

For citation: Kholimenko I. M., Seregin S. P., Rodionova S. N., Pugzhilis A. V. Methods for Assessing Renal Hemodynamics after Minimally Invasive Treatment of Urolithiasis. *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): 24–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-24-35>.

Received 16.01.2024

Accepted 14.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

Мочекаменная болезнь (МКБ) – полиэтиологическое, полипатогномичное заболевание обмена веществ, характеризующееся образованием камней в почках. Заболевание занимает ведущее место среди всех урологических заболеваний после инфекционно-воспалительных. Проблема МКБ сохраняет свою актуальность в связи с неуклонным ростом заболеваемости. По данным разных авторов, пациенты с МКБ составляют от 30% до 45% пациентов урологических стационаров и до 60% пациентов урологических отделений [1]. Чаще всего заболевание возникает в трудоспособном возрасте, а также имеет тенденцию к рецидивированию. По данным Минздрава России, за последние десятилетия отмечается увеличение заболеваемости МКБ, прирост заболеваемости с 2005 по 2019 гг. составил 35,45% [2]. Стоит отметить, что летальность среди пациентов с МКБ за последнее время существенно снизилась благодаря внедрению малоинвазивных методов диагностики и лечения [3]. Такими методиками являются дистанционная ударно-волновая литотрипсия (ДЛТ) [4] и перкутанная нефролитотрипсия (ПНЛ) [5]. Эти технологии хорошо переносятся пациентами, позволяют избежать открытых операций, а также добиться ускорения реабилитации. ПНЛ позволяет уменьшить площадь повреждения почечной паренхимы [6], сохранить ее функциональные способности, сократить сроки госпитального периода, снизить риски интра- и послеоперационных осложнений [7].

Однако проведение ДЛТ всегда сопровождается травмой почки [8]. Сразу же после проведения сеансов ДЛТ возникает гломерулярное кровотечение с

последующей атрофией и некрозом канальцев, а также разрывы дуговых сосудов [9]. Имеют место формирования в остром периоде субкапсулярных и интрапаренхиматозных гематом, диффузные кровоизлияния, некроз канальцев, в дальнейшем формируются зоны фиброзной ткани капсулы и паренхимы почки [10]. По данным авторов, типичными изменениями после ДЛТ являются нарушения микроциркуляции [11], а в отдаленном периоде – снижение функции почки и артериальная гипертензия [12]. Оценить степень нарушения кровообращения в почке после применения ударно-волновой литотрипсии позволяет доплерография [13]. Данный метод диагностики является высокоинформативным, безопасным и неинвазивным [14]. Он позволяет оценить нарушения микроциркуляции почки для диагностики МКБ, в том числе и для оценки гемодинамики после проведения малоинвазивных методик лечения [15].

Целью исследования является выявление особенности гемодинамики почек у пациентов с нефролитиазом после проведения ДЛТ и ПНЛ.

Материалы и методы

Исследование проводилось на основании обследования 45 пациентов с МКБ, находящихся на лечении в урологическом отделении ОБУЗ КОМКБ в 2022–2023 гг., которым проведены ДЛТ и ПНЛ. Критерием исключения пациента из проводимого исследования являлось наличие установленного диагноза «сахарный диабет». Ультразвуковое исследование выполнялось на аппарате Logiq S8 с использованием конвексного датчика C1-5-D в положении пациентов на боку и на спине, с

соблюдением полипозиционности для получения достоверной оценки в В-режиме паренхимы, чашечно-лоханочной системы, расположения почечных сосудов, состояния паранефральной клетчатки [16].

Доплерографические показатели кровотока регистрировались на уровне проксимального отдела почечных артерий, сегментарных, дуговых и междольковых артерий, оценивались такие показатели, как индекс резистентности (IR), систоло-диастолическое соотношение (S/D), пиковые систолические скорости кровотока (PSV) [17].

Пациенты были разделены на три группы, в зависимости от оперативного вмешательства. Пациентам из первой группы (25 больных с конкрементами

чашечно-лоханочной системы) была выполнена ДЛТ, второй – ПНЛ (20 больных с конкрементами чашечно-лоханочной системы), третью группу (группа сравнения) составили пациенты, не страдающие мочекаменной болезнью (25 человек).

Результаты и их обсуждение

На дооперационном этапе у всех обследованных больных индекс резистентности составлял $0,60 \pm 0,09$, систоло-диастолическое отношение $3,10 \pm 0,003$, пиковые систолические скорости кровотока $63,0 \pm 0,19$ см/с. После сеанса ДЛТ и проведения ПНЛ почечный кровоток оценивался на 1, 3, 5, 7 сутки. Результаты исследования представлены ниже (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Показатели динамики изменения почечного кровотока после ДЛТ

Table 1. Indicators of the dynamics of changes in renal blood flow after remote shock wave lithotripsy

Показатель	I группа (ДЛТ, 25 больных)			
	проксимальный отдел почечной артерии	сегментарная артерия	дуговая артерия	междольковая артерия
Норма	IR $0,61 \pm 0,01$ S/D $2,90 \pm 0,03$ PSV $67 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,60 \pm 0,02$ S/D $2,70 \pm 0,04$ PSV $47 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,60 \pm 0,02$ S/D $2,70 \pm 0,04$ PSV $25 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,60 \pm 0,02$ S/D $2,70 \pm 0,04$ PSV $19,0 \text{ см/с} \pm 0,01$
До сеанса ДЛТ	IR $0,66 \pm 0,01$ S/D $2,90 \pm 0,03$ PSV $71 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,60 \pm 0,02$ S/D $2,70 \pm 0,04$ PSV $44 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,54 \pm 0,01$ S/D $1,90 \pm 0,03$ PSV $24,2 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,66 \pm 0,01$ S/D $2,90 \pm 0,03$ PSV $22,6 \text{ см/с} \pm 0,01$
1 сутки	IR $0,69 \pm 0,01$ S/D $3,20 \pm 0,03$ PSV $77 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,71 \pm 0,01$ S/D $3,10 \pm 0,03$ PSV $45,01 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,69 \pm 0,01$ S/D $3,30 \pm 0,03$ PSV $26,1 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,68 \pm 0,01$ S/D $3,60 \pm 0,03$ PSV $22,6 \text{ см/с} \pm 0,01$
3 сутки	IR $0,78 \pm 0,01$ S/D $3,90 \pm 0,03$ PSV $79 \text{ см/с} \pm 0,02$	IR $0,72 \pm 0,01$ S/D $3,70 \pm 0,03$ PSV $47,03 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,75 \pm 0,01$ S/D $3,50 \pm 0,01$ PSV $25,1 \text{ см/с} \pm 0,06$	IR $0,77 \pm 0,01$ S/D $3,70 \pm 0,02$ PSV $33,1 \text{ см/с} \pm 0,002$
5 сутки	IR $0,77 \pm 0,01$ S/D $3,90 \pm 0,03$ PSV $81 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,85 \pm 0,01$ S/D $3,87 \pm 0,03$ PSV $49,11 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,71 \pm 0,01$ S/D $3,6 \pm 0,03$ PSV $27,9 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,81 \pm 0,03$ S/D $3,30 \pm 0,03$ PSV $36,6 \text{ см/с} \pm 0,01$
7 сутки	IR $0,70 \pm 0,01$ S/D $2,70 \pm 0,03$ PSV $78,97 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,73 \pm 0,01$ S/D $2,90 \pm 0,03$ PSV $43,6 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,66 \pm 0,01$ S/D $2,83 \pm 0,03$ PSV $27,76 \text{ см/с} \pm 0,01$	IR $0,74 \pm 0,01$ S/D $2,90 \pm 0,03$ PSV $34,03 \text{ см/с} \pm 0,01$

Таблица 2. Показатели динамики изменения почечного кровотока после ПНЛ**Table 2.** Indicators of the dynamics of changes in renal blood flow after percutaneous nephrolithotripsy

Показатель	II группа (ПНЛ, 20 больных)			
	проксимальный отдел почечной артерии	сегментарная артерия	дуговая артерия	междольковая артерия
Норма	IR 0,61±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 67 см/с±0,01	IR 0,60±0,02 S/D 2,70±0,04 PSV 47 см/с±0,01	IR 0,60±0,02 S/D 2,70±0,04 PSV 25 см/с±0,01	IR 0,60±0,02 S/D 2,70±0,04 PSV 19,0 см/с±0,01
До ПНЛ	IR 0,64 ±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 66,04±0,04 см/с	IR 0,62 ±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 42,03±0,04 см/с	IR 0,59 ±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 27,07±0,04 см/с	IR 0,64 ±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 21,04±0,04 см/с
1 сутки	IR 0,66±0,06 S/D 2,90±0,04 PSV 68,2 см/с±0,01	IR 0,70±0,01 S/D 3,19±0,06 PSV 43,01 см/с±0,04	IR 0,69±0,02 S/D 2,99±0,06 PSV 31,2 см/с±0,01	IR 0,69±0,01 S/D 2,71±0,001 PSV 26,6 см/с±0,05
3 сутки	IR 0,69±0,01 S/D 3,02±0,03 PSV 73,04 см/с±0,01	IR 0,71±0,01 S/D 3,27±0,03 PSV 47,03 см/с±0,01	IR 0,70±0,01 S/D 3,0±0,03 PSV 34,1 см/с±0,01	IR 0,71±0,01 S/D 2,93±0,03 PSV 25,09 см/с±0,01
5 сутки	IR 0,71±0,03 S/D 3,43±0,03 PSV 69,11 см/с±0,01	IR 0,70±0,01 S/D 3,31±0,03 PSV 45,0 см/с±0,01	IR 0,72±0,01 S/D 2,99±0,03 PSV 29,02 см/с±0,01	IR 0,73±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 24,85 см/с±0,01
7 сутки	IR 0,68±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 68,09 см/с±0,01	IR 0,66±0,01 S/D 2,99±0,03 PSV 44,0 см/с±0,01	IR 0,69±0,01 S/D 2,91±0,03 PSV 28,05 см/с±0,01	IR 0,68±0,01 S/D 2,90±0,03 PSV 20,6 см/с±0,01

При выполнении доплерографии на 1 сутки после ДЛТ у пациентов 1-й группы отмечалось незначительное повышение IR преимущественно в паренхиматозных артериях, а также постепенный рост PSV в дуговых и паренхиматозных артериях. Максимальное повышение IR и PSV регистрировалось на 3 и 5 сутки, причем в проксимальном отделе артерии IR на 3 и 5 сутки были на одном уровне, в то время как самое высокое значение IR регистрировалось в сегментарной и междольковой артерии, достигая наибольшего значения IR в междольковой артерии на 5 сутки. На 7 сутки отмечается незначительное улучшение показателей кровотока, IR в

проксимальном отделе артерии существенно понизился в сравнении с 3 сутками, однако в междольковой артерии IR на 3 и на 7 сутки находился примерно на одном уровне (0,77 и 0,74 соответственно). Также стоит отметить, что на 3 и на 7 сутки PSV в междольковой артерии практически не менялась (79,0 см/с и 78,97 см/с соответственно). Тем не менее после проведения сеанса ДЛТ в динамике отмечается стойкое повышение показателей почечного кровотока, главным образом в междольковых артериях, IR до ДЛТ составлял 0,61, на 7 сутки – 0,74, а PSV составила до 22,6 см/с, на 7 сутки показатель достиг 34,03 см/с. Это может быть связано с нарушением

процессов микроциркуляции на фоне ударно-волнового воздействия.

У пациентов 2 группы на 1 сутки после ПНЛ отмечается незначительное повышение гемодинамических показателей на всех уровнях артерий, но величина PSV на уровне дуговых артерий регистрировалась выше, чем до ПНЛ (27,07 см/с и 31,2 см/с соответственно). На 3 сутки отмечается снижение PSV в междольковой артерии (25,09 см/с), но величина IR существенно повысилась в сегментарной, дуговой и паренхиматозной артериях (0,71, 0,70, 0,71 соответственно). В 5 сутки отмечалось снижение PSV в сегментарной и междольковой артериях в сравнении с 3 сутками (47,03 см/с и 25,09 см/с против 45,0 см/с и 24,85 см/с соответственно). IR достигал максимума на 5 сутки на всех уровнях артерий. К 7 суткам отмечалось плавное снижение величины IR на всех уровнях, но незначительное его снижение наблюдалось в дуговой артерии (0,72 на 5 сутки и 0,69 на 7 сутки). Значения PSV в проксимальном отделе, сегментарной и дуговой артериях соответствовали показателям до ПНЛ, но на уровне междольковой артерии этот показатель отмечался ниже, чем до ПНЛ (21,04 см/с и 20,6 соответственно).

Можно сделать вывод, что данные доплерографии в динамике нормализуются в обеих группах, однако при проведении сеанса ДЛТ отмечается нарушение гемодинамики уже в первые сутки, в то время как при ПНЛ происходит постепенный рост показателей кровотока.

Также при ПНЛ отмечаются более короткие сроки восстановления нормализации показателей, при ДЛТ сроки нормализации более длительные.

У пациентов первой группы нарушения гемодинамики были более выраженные, причем рост показателей отмечался на уровне сегментарных и паренхиматозных артерий. Во второй же группе гемодинамические показатели возрастали равномерно, IR был максимальным на 5 сутки.

Таким образом, использование ультразвуковой доплерографии является информативным методом оценки почечного кровотока в динамике лечения МКБ неинвазивными методиками. При ПНЛ отмечается минимальные изменения показателей почечного кровотока в режиме ЦДК, в то время как при ДЛТ изменения гемодинамических показателей отмечаются уже на 1 сутки после сеанса и постепенно нарастают вплоть до 7 суток, что позволяет сделать вывод, что ударная волна вызывает выраженные нарушения почечной микроциркуляции.

Дальнейшее применение технологий обработки медико-биологической информации [18], разработанных на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного университета [19], позволит автоматизировать методику оценки показателей гемодинамики почек после проведения малоинвазивных методик лечения мочекаменной болезни за счет нечеткого математического моделирования и синтеза соответствующих решающих правил [20]. Данное

решение позволит поднять на новый качественный уровень оказание медицинской помощи урологическим больным [21].

Выводы

В работе показано, что ультразвуковая доплерография является достоверным, доступным и неинвазивным методом динамической оценки почечного

кровотока, при этом наиболее информативным индикатором ренального повреждения является IR, преимущественно в междольковых артериях. Кроме того, произведен качественный анализ малоинвазивных методик лечения мочекаменной болезни, в результате чего было показано, что при ДЛТ отмечаются более выраженные нарушения почечной гемодинамики, чем при ПНЛ.

Список литературы

1. Прогнозирование результатов дистанционной ударно-волновой литотрипсии у больных нефролитиазом / Д. А. Бобылев, М. Л. Чехонацкая, М. А. Осадчук, А. Н. Россоловский, Е. Б. Илясова, О. В. Основин, Н. В. Киреева, И. А. Крючков, И. А. Чехонацкий // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2018. Т. 8, № 2. С. 110–115.
2. Заболеваемость мочекаменной болезнью в Российской Федерации с 2005 по 2020 гг. / А. Д. Каприн, О. И. Аполихин, А. В. Сивков, Н. В. Анохин, Н. К. Гаджиев, В. А. Малхасян, Г. Н. Акопян, М. Ю. Просянкин // Экспериментальная и клиническая урология, 2022. Т. 15, № 2. С. 10–17.
3. Шевырин А. А. Результативность дистанционной ударно-волновой литотрипсии мочевых конкрементов у пациентов с мочекаменной болезнью // Урологические ведомости. 2017. Т. 7, № S. С. 125–126.
4. Анализ эффективности различных методов нефролитотрипсии / С. В. Попов, И. Н. Орлов, Н. К. Гаджиев, М. В. Борычев, С. М. Басок, С. М. Малевич // Урологические ведомости. 2016. Т. 6, № 5. С. 86–87.
5. Лазерная ультраминиперкутанная нефролитотрипсия в лечении камней почек / А. Г. Мартов, С. В. Дутов, А. С. Андронов, Р. А. Тахаев // Московская медицина. 2016. Т. S1, № 12. С. 149–150.
6. Сравнительный анализ ультра-мини перкутанной нефролитотрипсии и ретроградной нефролитотрипсии / С. В. Попов, О. Н. Скрябин, И. Н. Орлов, М. В. Борычев, С. М. Малевич, С. М. Басок // Уральский медицинский журнал. 2016. Т. 6, № 139. С. 42–46.
7. Перкутанная нефролитотрипсия: сравнение стандартных и миниинвазивных технологий / В. В. Рогачиков, А. В. Кудряшов, Ю. Ф. Брук, Д. Н. Игнатьев // Экспериментальная и клиническая урология. 2019. № 2. С. 60–69.

8. Чернега М. С. Диагностика закрытых травм почек на основе нечеткой логики принятия решений // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 1. С. 78–79.

9. Динамическая оценка состояния почечной паренхимы у больных после дистанционной ударно-волновой литотрипсии камней почек / А. Н. Россоловский, М. Л. Чехонацкая, Н. Б. Захарова, О. Л. Березинец, Н. В. Емельянова // Вестник урологии. 2014. № 2. С. 3–12.

10. Анализ показателей периферической ренальной гемодинамики у пациентов с хроническими заболеваниями почек / Н. С. Борзунова, Т. В. Жданова, И. В. Борзунов, М. М. Тутунина // Вестник Уральской медицинской академической науки. 2014. Т. 1, № 47. С. 36–37.

11. Линдина М. Л., Шишкин А. Н., Воловникова В. А. Особенности внутривисочечной гемодинамики у пациентов с метаболическим синдромом // Нефрология. 2015. Т. 19, № 4. С. 82–88.

12. Борзунова Н. С. Ультразвуковая доплерография как метод диагностики нарушений почечной гемодинамики при хронической болезни почек и артериальной гипертензии // Уральский медицинский журнал. 2013. Т. 7, № 112. С. 142–149.

13. Шипилова Д. А., Нагибович О. А., Щукина Н. А. Возможности доплерографии в оценке внутривисочечной гемодинамики у больных сахарным диабетом 2-го типа и хронической болезнью почек // Вестник Российской Военно-медицинской академии. 2020. Т. 3, № 71. С. 99–102.

14. Автоматические классификаторы сложноструктурируемых изображений на основе мультиметодных технологий многокритериального выбора / М. В. Дюдин, И. В. Зуев, С. А. Филист, С. М. Чудинов // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 130–141.

15. Капустин С. В., Оуен Р., Пиманов С. И. Ультразвуковое исследование в урологии и нефрологии. 2-е изд., испр. М.: Умный доктор, 2018. 176 с.

16. Метод классификации сложноструктурируемых изображений на основе самоорганизующихся нейросетевых структур / С. А. Филист, Р. А. Томакова, О. В. Шаталова, А. А. Кузьмин, К. Д. Али Кассим // Радиопромышленность. 2016. № 4. С. 57–65.

17. Формирование признакового пространства для задач классификации сложноструктурируемых изображений на основе спектральных окон и нейросетевых структур / С. А. Филист, К. Д. Али Кассим, А. А. Кузьмин, О. В. Шаталова, Е. А. Алябьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. Т. 4, № 67. С. 56–68.

18. Biotechnical system of differential diagnostics of serous and purulent pyelonephritis in pregnant women based on fuzzy logic for decision-making / N. A. Korenevskiy, S. P. Seregin, S. N. Rodionova, R. T. Al-Kasasbeh, G. V. Sipliviy, A. A. Alqaralleh, I. M. Kholimenko,

M. S. Alshamasin, M. U. Ilyash // *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. 2021. Vol. 49, N 1. P. 67–75.

19. Корневский Н. А., Разумова К. В. Синтез нечетких классификационных правил в многомерном пространстве признаков для медицинских приложений // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2012. Т. 2, № 1. С. 223–227.

20. Использование показателей, характеризующих адаптационные механизмы для оценки уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска / Р. И. Сафронов, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Л. В. Стародубцева, С. С. Сергеева, А. В. Титова // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11, № 4. С. 163–179.

21. Developing a biotechnical scheme using fuzzy logic model for classification of severity of pyelonephritis / N. Korenevskiy, S. S. Petrovich, R. T. Al-Kasasbeh, A. A. Alqaralleh, S. N. Rodionova, A. A. Shaqadan, I. M. Yurievich, M. S. Alshamasin // *International Journal of Medical Engineering and Informatics*. 2021. Vol. 1. P. 1.

References

1. Bobylev D. A., Chekhonackaya M. L., Osadchuk M. A., Rossolovskij A. N., Ilyasova E. B., Osnovin O. V., Kireeva N. V., Kryuchkov I. A., Chekhonackij I. A. Prognostirovanie rezul'tatov distancionnoj udarno-volnovoj litotripsii u bol'nyh nefrolitiazom [Forecasting the results of remote shock wave lithotripsy in patients with nephrolithiasis]. *Rossijskij elektronnyj zhurnal luchevoj diagnostiki = Russian Electronic Journal of Radiation Diagnostics*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 110–115.

2. Kaprin A. D., Apolihin O. I., Sivkov A. V., Anohin N. V., Gadzhiev N. K., Malhasyan V. A., Akopyan G. N., Prosyannikov M. Yu. Zaboлеваemost' mochekamЕННОj bolezni'yu v Rossijskoj Federacii s 2005 po 2020 gg. [The incidence of urolithiasis in the Russian Federation from 2005 to 2020]. *Eksperimental'naya i klinicheskaya urologiya = Experimental and Clinical Urology*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 10–17.

3. Shevyrin A. A. Rezul'tativnost' distancionnoj udarno-volnovoj litotripsii mochevyh konkrementov u pacientov s mochekamЕННОj bolezni'yu [Comprehensively developed shock-wave lithotripsy of urinary connectors in powerlifters with urolithiasis]. *Urologicheskie vedomosti = Urological Report*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 125–126.

4. Popov S. V., Orlov I. N., Gadzhiev N. K., Borychev M. V., Basok S. M., Malevich S. M. Analiz effektivnosti razlichnyh metodov nefrolitotripsii [Analysis of the effectiveness of various methods of nephrolithotripsy]. *Urologicheskie vedomosti = Urologic Vedomosti*, 2016, vol. 6, no. 5, pp. 86–87.

5. Martov A. G., Dutov S. V., Andronov A. S., Tahaev R. A. Laser implantation nephrolithotherapy in the treatment of a stone point. *Moskovskaya medicina = Moscow Medicine*, 2016, vol. S1, no. 12, pp. 149–150.

6. Popov S.V., Skryabin O.N., Orlov I.N., Borychev M.V., Malevich S.M., Basok S.M. Sravnitel'nyj analiz ul'tra-mini perkutannoj nefrolitotripsii i retrogradnoj nefrolitotripsii [Comparative analysis of ultra-mini percutaneous nephrolithotripsy and retrograde nephrolithotripsy]. *Ural'skij medicinskij zhurnal = Ural Medical Journal*, 2016, vol. 6, no. 139, pp. 42–46.

7. Rogachikov V. V., Kudryashov A. V., Bruk Yu. F., Ignat'ev D. N. Perkutannaya nefrolitotripsiya: sravnenie standartnyh i miniinvazivnyh tekhnologij [Percutaneous nephrolithotripsy: comparison of standard and minimally invasive technologies]. *Eksperimental'naya i klinicheskaya urologiya = Experimental and Clinical Urology*, 2019, no. 2, pp. 60–69.

8. Chernega M. S. Diagnostika zakrytyh travm pochk na osnove nechetkoj logiki prinyatiya reshenij [Diagnostics of closed kidney injuries based on fuzzy logic of decision-making]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2014, vol. 13, no. 1, pp. 78–79.

9. Rossolovskij A. N., Chekhonackaya M. L., Zaharova N. B., Berezinec O. L., Emel'yanova N. V. Dinamicheskaya ocenka sostoyaniya pochechnoj parenhimy u bol'nyh posle distancionnoj udarno-volnovoj litotripsii kamnej pochk [Dynamic assessment of the state of renal parenchyma in patients after di-station shock wave lithotripsy of kidney stones]. *Vestnik urologii = Bulletin of Urology*, 2014, no. 2, pp. 3–12.

10. Borzunova N. S., Zhdanova T. V., Borzunov I. V., Tutunina M. M. Analiz pokazatelej perifericheskoy renal'noj gemodinamiki u pacientov s hronicheskimi zabolevaniyami pochk [Analysis of peripheral renal hemodynamics in patients with chronic kidney diseases]. *Vestnik Ural'skoj medicinskoj akademicheskoy nauki = Bulletin of the Ural Medical Academic Science*, 2014, vol. 1, no. 47, pp. 36–37.

11. Lindina M. L., Shishkin A. N., Volovnikova V. A. Osobennosti vnutripochechnoj gemodinamiki u pacientov s metabolicheskim sindromom [Features of intracranial hemodynamics in patients with metabolic syndrome]. *Nefrologiya = Nephrology*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 82–88.

12. Borzunova N. S. Ul'trazvukovaya dopplerografiya kak metod diagnostiki narushenij pochechnoj gemodinamiki pri hronicheskoy bolezni pochk i arterial'noj gipertenzii [Ultrasound dopplerography as a method of diagnosing renal hemodynamic disorders in chronic kidney disease and arterial hypertension]. *Ural'skij medicinskij zhurnal = Ural Medical Journal*, 2013, vol. 7, no. 112, pp. 142–149.

13. Shipilova D. A., Nagibovich O. A., Shchukina N. A. Vozmozhnosti dopplerografii v ocenke vnutripochechnoj gemodinamiki u bol'nyh saharnym diabetom 2-go tipa i hronicheskoy boleznyu pochk [The possibilities of dopplerography in the assessment of intrarenal

hemodynamics in patients with type 2 diabetes mellitus and chronic kidney disease]. *Vestnik Rossijskoj Voenno-meditsinskoj akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*, 2020, vol. 3, no. 71, pp. 99–102.

14. Dyudin M. V., Zuev I. V., Filist S. A., Chudinov S. M. Avtomaticheskie klassifikatory slozhno strukturiruemih izobrazhenij na osnove mul'timetodnyh tekhnologij mnogokriterial'nogo vybora [Automatic classifiers of complex structured images based on multi-method technologies of multicriteria selection]. *Voprosy radioelektroniki = Questions of Radioelectronics*, 2015, no. 1, pp. 130–141.

15. Kapustin S. V., OuenR., Pimanov S. I. Ul'trazvukovoe issledovanie v urologii i nefrologii [Ultrasound examination in pathology and nephrology]. 2nd ed. Moscow, Umnyj doctor Publ., 2018. 176 p.

16. Filist S. A., Tomakova R. A., Shatalova O. V., Kuz'min A. A., Ali Kassim K. D. Metod klassifikacii slozhnostrukturiruemih izobrazhenij na osnove samoorganizuyushchihsia nejrosetevyh struktur [The method of classification of complex structured images based on self-organizing neural network structures]. *Radiopromyshlennost' = Radio Industry*, 2016, no. 4, pp. 57–65.

17. Filist S. A., Ali Kassim K. D., Kuz'min A. A., Shatalova O. V., Alyab'ev E. A. Formirovanie priznakovogo prostranstva dlya zadach klassifikacii slozhnostrukturiruemih izobrazhenij na osnove spektral'nyh okon i nejrosetevyh struktur [Formation of a feature space for classification problems of complex structured images based on spectral windows and neural network structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, vol. 4, no. 67, pp. 56–68.

18. Korenevsky N. A., Seregin S. P., Rodionova S. N., Al-Kasasbeh R. T., Siplyj G. V., Alcaralleh A. A., Holimenko I. M., Alshamasin M. S., Ilyash M. U. Biotechnical system of differential diagnosis of serous and purulent pyelonephritis in pregnant women based on fuzzy logic for decision-making. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 2021, vol. 49, no. 1, pp. 67–75.

19. Korenevskij N. A., Razumova K. V. Sintez nechetkih klassifikacionnyh pravil v mnogomernom prostranstve priznakov dlya medicinskih prilozhenij [Synthesis of fuzzy classification rules in a multidimensional feature space for medical applications]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 223–227.

20. Safronov R. I., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Starodubceva L. V., Sergeeva S. S., Titova A. V. Ispol'zovanie pokazatelej, harakterizuyushchih adaptacionnye mekhanizmy dlya ocenki urovnya zashchity organizma ot vozdejstviya vneshnih faktorov riska [The use of indicators characterizing adaptive mechanisms to assess the level of protection of

the body from the effects of external risk factors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 163–179.

21. Korenevsky N. A., Petrovich S. S., Al-Kasasbeh R. T., Alcaralleh A. A., Rodionova S. N., Shakadan A. A., Yurievich I. M., Alshamasin M. S. Development of a biotechnical scheme using a fuzzy logic model for classifying the severity of pyelonephritis. *International Journal of Medical Engineering and Computer Science*, 2021, vol. 1, p. 1.

Информация об авторах / Information about the Authors

Холименко Иван Михайлович, кандидат медицинских наук, врач-уролог, Курская областная многопрофильная клиническая больница, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Ivan M. Kholimenko, Candidate of Sciences (Medical), Urologist, Kursk Regional Multidisciplinary Clinical Hospital, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Серегин Станислав Петрович, доктор медицинских наук, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: seregin.stanislaw2011@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975, Scopus ID: 57195455825, WOS ID: Q-1060-2017

Stanislav P. Seregin, Doctor of Sciences (Medical), Head of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: seregin.stanislaw2011@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9001-8420, Scopus ID: 55924198800, WOS ID: Q-9368-2015

Родионова Софья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975, Scopus ID: 57195455825, WOS ID: Q-1060-2017

Sofia N. Rodionova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975, Scopus ID: 57195455825, WOS ID: Q-1060-2017

Пугжилис Анастасия Владимировна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: akela1301@yandex.ru

Anastasia V. Pugzhilis, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: akela1301@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-36-49>



УДК 620.169.1

Исследование воздействия концентратора механических напряжений на процессы возникновения и развития трещин в конструкционных элементах авиационной техники

И. И. Сизонов¹✉, Е. Л. Лебедев², А. Н. Попов³, И. Е. Мухин¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305000, Российская Федерация

² Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского
ул. Ждановская, д. 13, г. Санкт-Петербург 197198, Российская Федерация

³ АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова
ул. Запольная, д. 47, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – исследование закономерностей развития трещин в конструкционных элементах авиационной техники от концентратора напряжений при воздействии растягивающего вдоль главной оси усилия, симметричных знакопеременных нагрузок (вибраций) и комбинированного воздействия с целью определения критичности эксплуатации изделий авиационной техники с дефектами типа трещин, обоснование либо опровержение потребности в исследовании и эксплуатации процессов развития напряженно-деформированных состояний, предшествующих возникновению трещины, в системах и комплексах периодического, предполетного и оперативного контроля технического состояния изделий авиационной техники.

Методы. Экспериментальное исследование закономерностей развития трещин от концентратора напряжений в конструкционных элементах двух форм-факторов: цилиндрического образца (ГОСТ 25347-82), имитирующего стрингер или несущую конструкционную балку, и пластинчатого образца (ГОСТ 1497-84), имитирующего элемент обшивки летательного аппарата. Цилиндрические образцы подвергались деформированию, вызванному кинетикой вращения, пластинчатые образцы подвергались одноосному растягивающему напряжению и воздействию знакопеременных нагрузок (вибраций) по отдельности и комбинированно.

Результаты. Изучены закономерности приповерхностного и глубинного развития трещин, их связь с частотой приложения симметричных знакопеременных нагрузок. Установлены выражения для приближенного инженерного расчета предела выносливости материала, площади поверхности разрушения и постоянной выносливости с точностью аппроксимации около 0,8. Для образцов в форме плоских пластин построена диаграмма «напряжение-деформация», наглядно иллюстрирующая снижение выносливости материала к воздействию комбинированных нагрузок по отношению к воздействию только статических растягивающих напряжений. Оценено примерное количество остаточных циклов до разрушения конструктивного элемента с учетом амплитудно-частотных параметров действующей вибрации при наличии трещины в образце.

© Сизонов И. И., Лебедев Е. Л., Попов А. Н., Мухин И. Е., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(1): 36–49

Приведена методика оценки с применением коэффициента интенсивности нагрузок и математическими выражениями для его расчета.

Заключение. Сделан вывод о необходимости анализа динамики развития напряженно-деформированных состояний (усталости) материала как состояний, предшествующих появлению трещин, для осуществления достаточного контроля технического состояния конструктивных элементов изделий авиационной техники.

Ключевые слова: сплав Д16А; знакопеременная симметричная нагрузка; трещина; поверхность разрушения; концентратор механических напряжений; коэффициент интенсивности нагрузок.

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

Для цитирования: Исследование воздействия концентратора механических напряжений на процессы возникновения и развития трещин в конструктивных элементах авиационной техники / И. И. Сизонов, Е. Л. Лебедев, А. Н. Попов, И. Е. Мухин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 1. С. 36–49. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-36-49>.

Поступила в редакцию 18.01.2024

Подписана в печать 15.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Investigation of the Effect of a Mechanical Stress Concentrator on the Processes of Occurrence and Development of Cracks in Structural Elements of Aviation Equipment

Ivan I. Sizonov^{1✉}, Evgeny L. Lebedev¹, Alexander N. Popov¹, Ivan E. Mukhin¹

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

² Mozhaisky Military Space Academy
13 Zhdanovskaya Str., St. Petersburg 197198, Russian Federation

³ JSC "Aviaautomatiks" named after V. V. Tarasov"
47 Zapolnaya Str., Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is investigation of the patterns of crack development in structural elements of aviation equipment from a stress concentrator under the influence of a force stretching along the main axis, symmetrical alternating loads (vibrations) and combined effects in order to determine the criticality of operation of aircraft products with crack-type defects, substantiation or refutation of the need for research and operation of the processes of development of stress-strain states preceding the occurrence of a crack, in systems and complexes of periodic, preflight and operational control of the technical condition of aircraft products.

Methods. Experimental study of the patterns of crack development from a stress concentrator in structural elements of two form factors: a cylindrical sample (GOST 25347-82) simulating a stringer or a load-bearing structural beam, and a plate sample (GOST 1497-84), simulating an aircraft skin element. Cylindrical samples were subjected to deformation caused by the kinetics of rotation, plate samples were subjected to uniaxial tensile stress and the effects of alternating loads (vibrations) individually and in combination.

Results. The patterns of near-surface and deep crack development, their relationship with the frequency of application of symmetric alternating loads, have been studied. Expressions are established for the approximate engineering calculation of the material endurance limit, fracture surface area and constant endurance with an approximation accuracy

of about 0.8. For samples in the form of flat plates, a stress-strain diagram is constructed, clearly illustrating the decrease in the endurance of the material to the effects of combined loads in relation to the effects of static tensile stresses only. The approximate number of residual cycles before the structural element is destroyed is estimated, taking into account the amplitude-frequency parameters of the acting vibration in the presence of a crack in the sample. The estimation method using the load intensity coefficient and mathematical expressions for its calculation is given.

Conclusion. It is concluded that it is necessary to analyze the dynamics of the development of stress-strain states (fatigue) of the material as states preceding the appearance of cracks in order to carry out sufficient control of the technical condition of structural elements of aircraft products.

Keywords: alloy D16A; alternating symmetrical load; crack; fracture surface; mechanical stress concentrator; load intensity coefficient.

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

For citation: Sizonov I. I., Lebedev E. L., Popov A. N., Mukhin I. E. Investigation of the Effect of a Mechanical Stress Concentrator on the Processes of Occurrence and Development of Cracks in Structural Elements of Aviation Equipment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024; 14(1): 36–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-36-49>.

Received 18.01.2024

Accepted 15.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

Современная авиационная промышленность вынуждена решать непростую задачу разработки системного подхода к оценке остаточного ресурса парка летательных аппаратов (далее – ЛА) гражданского и военного назначения [1]. С одной стороны, сложность ситуации обусловлена необходимостью контроля стремительно изнашивающегося парка изделий советского периода [2], с другой – прогрессом научно-технической мысли [3], охватывающим область авиастроения вплоть до регионального уровня [4]. Нельзя исключать из анализа человеческий фактор [5]. С целью обеспечения потребностей более глубокого контроля воздушных средств применяется отечественный [6] и анализируется зарубежный опыт [7].

Называет необходимость апробации и внедрения альтернативных

методик оценки остаточного ресурса изделий авиационной техники [8]. Отечественные авторы анализируют и предлагают альтернативную [9], модифицированную [10] методики определения остаточного ресурса, рассматривают проблему его рационального расхода с целью повышения безопасности эксплуатации ЛА [11] или эксплуатации изделий по техническому состоянию [12]. Инновационным предложением является использование оптоволоконных технологий для построения систем контроля технического состояния ЛА [13].

Развитие отечественного [14] и зарубежного материаловедения представляет возможность использования новых [15] жаропрочных [16] или термостойких [17], облегченных алюминиевых [18] сплавов, однако процедуры их контроля ещё предстоит гармонично включить в систему комплексного

подхода к оценке технического состояния несущих конструкций ЛА.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования закономерностей деградации структуры материала несущих конструкций ЛА при воздействии симметричных знакопеременных нагрузок производились для

изготовленных из сплава Д16А (дюралюминий) образцов двух форм-факторов: цилиндрического образца (в соответствии с ГОСТ 25347-82), имитирующего стрингер или несущую конструкционную балку (см. рис. 1), и образца пластинчатой формы (по ГОСТ 1497-84), имитирующего непосредственно элемент обшивки.

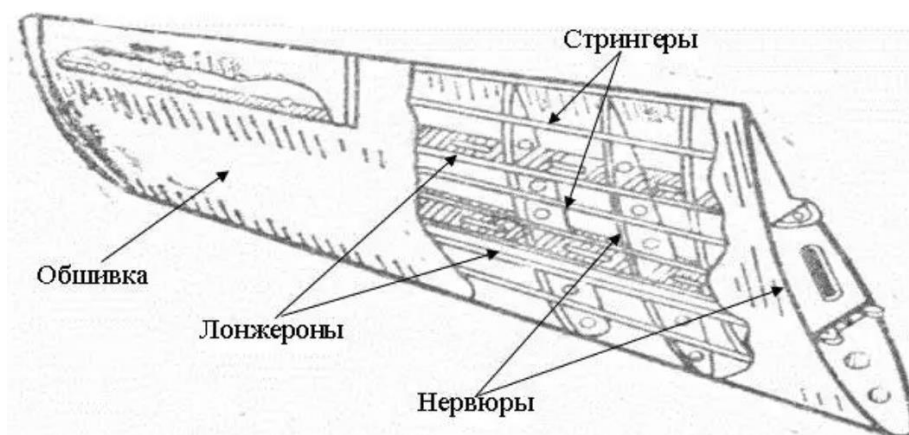


Рис. 1. Элементы конструкции ЛА

Fig. 1. Elements of the aircraft structure

В первой серии экспериментов цилиндрические образцы подвергались деформированию различной интенсив-

ности, которая обуславливалась скоростью вращения образца в захватах установки МУИ-6000 (рис. 2).



Рис. 2. Установка МУИ-6000

Fig. 2. Installation of MUI-6000

Для обеспечения испытаний указанная установка была доработана с целью обеспечения трех скоростных режимов: 6000, 60 и 6 оборотов в минуту. Амплитуда цикла составляла от 50 до 300 МПа в соответствии с данными, полученными эмпирическим путем при замерах на имитаторах и реальных ЛА, находящихся в эксплуатации.

В процессе испытаний посредством системы микровидеонаблюдения на основе микроскопа-камеры МК-13 фиксировался момент появления трещины, скорость и особенности её развития, момент разрушения образца с последующим изучением характера разрушения микрофрактографическими методами анализа.

Во второй серии экспериментов набор образцов в форме пластины подвергался сначала одноосному растяжению, а затем комбинированному воздействию одноосного растяжения и вибрации. Растяжение производилось посредством растяжной машины ИР 5113-100-11 (до 100 МПа), скорость движения активного захвата составляла от 0,4 до 5 мм/мин. Частота вибрации составляла от 5 до 40 Гц с направлением как поперек, так и вдоль оси растяжения. Контроль вибрационных нагрузок образца производился при помощи измерительного контура в составе пьезоэлектрического акселерометра ВС 110, анализатора спектра ZET 017-U4 и ПК с установленным программным пакетом ZetLab (рис. 3).



Рис. 3. Фотография испытательной установки с закрепленной пластиной

Fig. 3. Photo of a test rig with a fixed plate

Результаты и их обсуждение

По результатам первой серии экспериментов (испытания образца цилиндрической формы) выявлено следующее:

– в отличие от обычной усталостной трещины появление инициируемой трещины от концентратора напряжений (отверстий, дефектов структуры и т.д.)

происходит практически сразу (в течение первых 5...15 циклов нагружения);

– низкая скорость вращения образца (6 об/мин) допускает пластичное деформирование устья магистральной (основной) трещины, что обуславливает её рост, магистральная трещина не имеет тенденции к разветвлению. Развитие трещины происходит преимущественно по нормали к оси образца, что приводит к его разрушению за рекордно малое (в рамках серии экспериментов) количество циклов нагружения. Разрушение носит вязкий характер. Площадь поверхности разрушения составляет примерно 60 мм²;

– большая скорость вращения образца (6000 об/мин) приводит к скорейшему развитию трещины, однако устье трещины не успевает пластично деформироваться, вследствие чего магистральная трещина имеет тенденцию к разветвлению, причем в приповерхностных слоях и касательных относительно оси образца проекциях. Разрушение

носит квазихрупкий характер. Площадь поверхности разрушения составляет в среднем 300 мм²;

– для средней скорости вращения (60 об/мин) имеет место конкуренция двух процессов – приповерхностного и глубинного развития трещин. Количество циклов до разрушения в этом случае незначительно выше, чем при скорости 6 об/мин, площадь поверхности разрушения составляет примерно 100 мм².

Дополнительно выяснено, что предел выносливости образца снизился с $\sigma_{-1K} = 15$ кг/мм² без концентратора напряжения до $\sigma_{-1K} \approx 10$ кг/мм² (при 6000 об/мин) и $\sigma_{-1K} \approx 5$ кг/мм² (при 60 и 6 об/мин) при наличии концентратора напряжения.

Получен ряд эмпирических выражений для инженерного расчета величин предела выносливости (1), площади поверхности разрушения (2) и постоянной выносливости (3) с точностью аппроксимации около 0,8:

$$\sigma_{-1}^K = 2^{-7} \left(\frac{V_{\text{ДЕФ}} E}{2\pi \sigma_a} \right)^2 + 0,009 \left(\frac{V_{\text{ДЕФ}} E}{2\pi \sigma_a} \right) + 5, \quad (1)$$

$$F = 5 \cdot 10^{-6} \left(\frac{V_{\text{ДЕФ}} E}{2\pi \sigma_a} \right)^2 + 0,07 \left(\frac{V_{\text{ДЕФ}} E}{2\pi \sigma_a} \right) + 59, \quad (2)$$

$$C_{\sigma}^K = 3 \cdot 10^{-7} \left(\frac{V_{\text{ДЕФ}} E}{2\pi \sigma_a} \right)^2 + 0,003 \left(\frac{V_{\text{ДЕФ}} E}{2\pi \sigma_a} \right) + 19, \quad (3)$$

где σ_{-1}^K – предел выносливости материала, кг/мм²; F – площадь поверхностного разрушения, мм²; C_{σ}^K – постоянная выносливости (безразмерная величина); $V_{\text{ДЕФ}}$ – скорость деформирования образца, мм/с; E – модуль упругости

конструкционных алюминиевых сплавов, кг/мм²; σ_a – амплитуда цикла, кг/мм².

При анализе исходных данных и подборки источников литературы для второй серии экспериментов (испытания образца в форме пластины) с

комбинированным воздействием были отмечены проблемы:

- отсутствие системного подхода;
- отсутствие свежих исследований в указанной области;
- избыточное цитирование в новых статьях более старых положений.

Результаты испытаний только с приложением одноосного растяжения

говорят о появлении и росте иницируемой трещины (от концентратора напряжений) при растягивающем усилии вдоль основной оси от 200–350 МПа, что составляет 50–75% от $\sigma_{0,2}$ – условного предела пропорциональности материала Д16А. Графическое представление результатов испытаний приведено ниже (рис. 4–6).

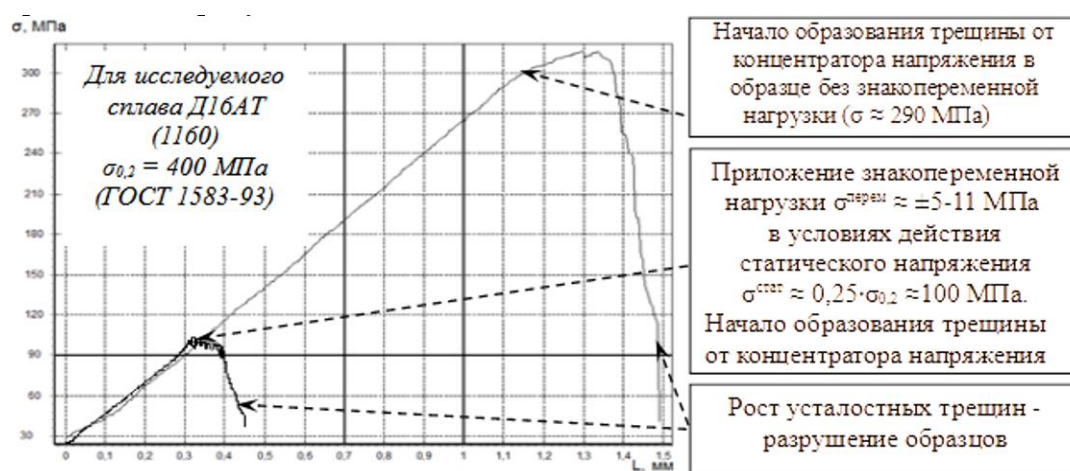


Рис. 4. Диаграмма вида «напряжение-деформация»

Fig. 4. Stress-strain diagram

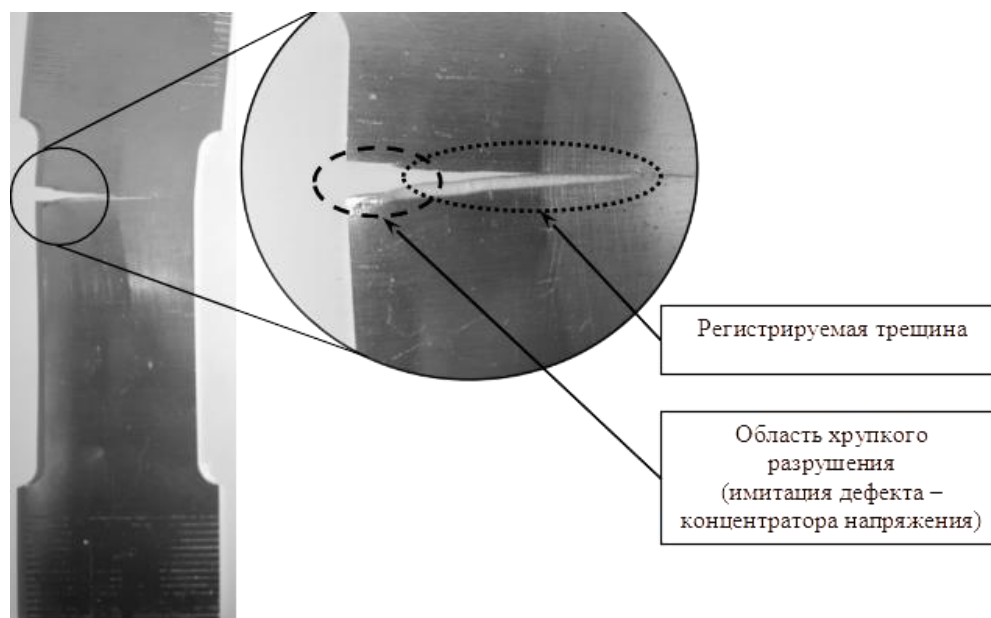


Рис. 5. Фотография образца после приложения одноосного растяжения

Fig. 5. Photo of the sample after applying uniaxial stretching

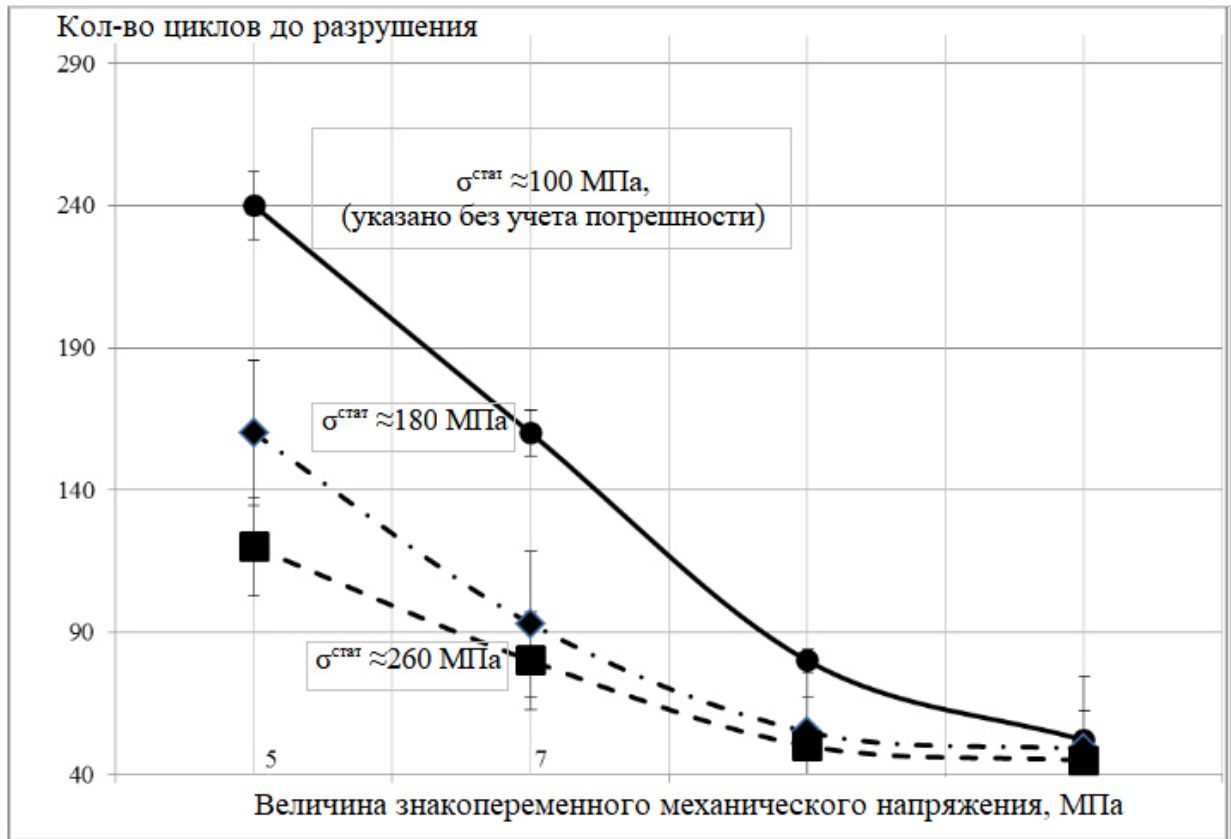


Рис. 6. Количество циклов до разрушения от величины знакопеременного механического напряжения

Fig. 6. The number of cycles to failure depends on the magnitude of alternating mechanical stress

На практике для оценки трещиностойкости конструктивных элементов используется коэффициент интенсивности напряжений K , определяющий условие роста трещины.

$$K = \sigma \sqrt{l} \cdot Y(\lambda), \quad (4)$$

где σ – величина знакопеременного механического напряжения, МПа; l – длина трещины, мм; λ , $Y(\lambda)$ – безразмерные коэффициенты [см. выражения (5) и (6)].

$$\lambda = \frac{1}{b}, \quad (5)$$

где b – ширина конструктивного элемента в направлении развития трещины, мм.

$$Y(\lambda) = 1,99 - 0,41\lambda + 18,70\lambda^2 - 38,48\lambda^3 + 53,85\lambda^4. \quad (6)$$

Из анализа динамики роста трещин от концентратора напряжений и с учетом диапазона остаточных циклов до разрушения можно говорить о том, что наличие трещины в любом случае является неприемлемым для конструктивных элементов авиации, появление подобного дефекта во время полета может привести даже к отсутствию возможности благополучной посадки (с учетом критичности дефектного элемента).

Следует отметить, что причиной разрушения может оказаться не только дефект эксплуатационного [19] рода, но и технологического [20]. Так, нарушение процесса термоупрочнения рассмотренного материала (Д16А) может привести к появлению микропор и трещин внутри его структуры, причем длина этих трещин может варьироваться от микрон до миллиметров. Опасность этих трещин высока еще и с учетом того факта, что их вершины являются острыми, а значит, способствуют скорейшему росту дефекта.

Выводы

Помимо выводов, касающихся закономерностей развития и разрушения

элементов авиационных несущих конструкций, следует сделать вывод о ключевой роли в обеспечении безопасности эксплуатации изделий авиационной техники именно прогнозирования появления трещин, поскольку факт её появления уже сам по себе является критичным событием. С другой стороны, прогноз и оценка остаточного ресурса изделий до появления дефектов данного рода позволяют осуществлять выборочный полный или углубленный контроль уязвимых элементов конструкций, делают возможным составление предпочтительного плана эксплуатации с целью равномерного расхода остаточного ресурса и, конечно, повышения безопасности авиаперевозок.

Список литературы

1. Куртаев С. Ж. Теория и практика контроля и диагностики систем воздушных судов гражданской авиации // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. Т. 2. С. 242–244.
2. Чапенко А. А. Российский рынок гражданской авиации на современном этапе // Экономика и бизнес. 2019. № 8. С. 186–189. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2019-11140>.
3. Бодрова Е. В. Эволюция отечественного авиастроения в постсоветский период // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 2-6. С. 29–31.
4. Васильцова А. Динамика гражданского авиастроения на советском и постсоветском пространстве: региональный аспект // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2019. № 4. С. 72–83. <https://doi.org/10.18384/2310-7189-2019-4-72-83>.
5. Ступаков В. Я. Проблемы обеспечения летной годности воздушных судов: экономические аспекты // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12, № 9А. С. 667–673. <https://doi.org/10.34670/AR.2022.68.55.074>.
6. Саидумаров И. М., Умаров А. А., Закиров Р. Анализ возможностей централизованной системы встроенного контроля и диагностики для дистанционного контроля

7. Зарубежный опыт создания и применения систем FIS (Fight Inspection Systems) для контроля характеристик и сертификации авионики и аэронавигационного обеспечения воздушных судов с использованием DGPS-подсистем / В. П. Харченко, А. А. Жалило, В. В. Конин, В. М. Кондратюк // Аэрокосмические системы мониторинга и управления: материалы VI Международной научно-технической конференции. Киев: Национальный авиационный университет, 2004. Т. 2. С. 21–29.

8. Фейгенбаум Ю. М., Соколов Ю. С. Анализ современного состояния и перспектив развития отечественной системы мониторинга эксплуатации силовой конструкции гражданских ВС // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 7 (318). С. 14–23.

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

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

11. Определение остаточного ресурса и методы повышения уровня безопасности при эксплуатировании конструкционных материалов в авиации / А. В. Котелкин, И. Г. Роберов, Д. Б. Матвеев, И. С. Леднев // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 1 (4). С. 104–113.

12. Вараксина Я. М., Бухаров А. Е. Порядок перевода авиационных радиовысотомеров на техническую эксплуатацию по состоянию // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. Т. 2. С. 244–251.

13. Сизонов И. И., Барабушка А. С., Мухин И. Е. Двухэтапная математическая модель оценки режимов вынужденных вибраций элемента обшивки летательного аппарата с применением оптоволоконных технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 52–64.

14. Баранов М. И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 41: композиционные материалы: их классификация, технологии изготовления, свойства и области применения в современной технике // Электротехника. Выдающиеся события. Знаменитые имена. 2017. № 6. С. 3–13.

15. Xia Q. Overview of aerospace materials and their applications // Theoretical and Natural Science. 2023. N 13. P. 115–120. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/13/20240808>.

16. Research progress on heat treatment process of superalloys / L. J. Cui, X. Y. Lin, Q. Zhu, C. J. Wang, P. Zhang // *Materials Reports*. 2016. N 4. P. 106–117.
17. Exploring gradient pathways in high temperature, functionally graded alloys a new approach aims to fabricate parts with targeted, site-specific properties for a wide range of applications in extreme environments within the aviation, space, and energy sectors / S. Nag, B. Jordan, K. An, J. Tiley, C. Zhang, F. Zhang // *Advanced Materials & Processes*. 2022. Vol. 180, N 2. P. 16–20.
18. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry / S. S. Li, X. Yue, Q. Y. Li, H. L. Peng, B. X. Dong, T. S. Liu, H. Y. Yang, J. Fan, S. L. Shu, F. Qiu, Q. C. Jiang // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. N 2. P. 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.274>.
19. Карташова Е. Д. Исследование влияния технологических дефектов на формирование статистических полей напряжений в композиционных материалах лопастей квадрокоптеров // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2023. № 3(67). С. 173–185. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-3-13>. EDN QHDUBI.
20. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Технологические дефекты слоистых полимерных материалов // *Технические науки. Машиностроение и машиноведение*. 2017. № 2 (42). С. 79–89.

References

1. Kurtaev S. J. Teoriya i praktika kontrolya i diagnostiki sistem vozdushnyh sudov grazhdanskoj aviacii [Theory and practice of control and diagnostics of civil aviation aircraft systems]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo" = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2016, vol. 2, pp. 242–244.
2. Chapenko A. A. Rossijskij rynek grazhdanskoj aviacii na sovremennom etape [The Russian civil aviation market at the present stage]. *Ekonomika i biznes = Economics and Business*, 2019, no. 8, pp. 186–189. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2019-11140>
3. Bodrova E. V. Evolyuciya otechestvennogo aviastroeniya v postsovetskij period [Evolution of domestic aircraft industry in the post-Soviet period]. *Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk = Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences*, 2016, no. 2-6, pp. 29–31.
4. Vasil'tsova A. Dinamika grazhdanskogo aviastroeniya na sovetskom i postsovetskom prostranstve: regional'nyj aspekt [Dynamics of civil aviation in the Soviet and post-Soviet space: a regional aspect]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki = Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*, 2019, no. 4, pp. 72–83. <https://doi.org/10.18384/2310-7189-2019-4-72-83>

5. Stupakov V. Ya. Problemy obespecheniya letnoj godnosti vozdushnyh sudov: ekonomicheskie aspekty [Problems of ensuring the airworthiness of aircraft: economic aspects]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra = Economics: Yesterday, Today, Tomorrow*, 2022, vol. 12, no. 9A, pp. 667–673. <https://doi.org/10.34670/AR.2022.68.55.074>
6. Saidumarov I. M., Umarov A. A., Zakirov R. Analiz vozmozhnostej centralizovannoj sistemy vstroennogo kontrolya i diagnostiki dlya distancionnogo kontrolya parametrov vozdushnyh sudov [Analysis of the capabilities of a centralized integrated monitoring and diagnostics system for remote control of aircraft parameters]. *International Scientific and Practical Conference World Science*, 2016, vol. 1, no. 5(9), pp. 79–82. EDN VWANML
7. Kharchenko V. P., Zhalilo A. A., Konin V. V., Kondratyuk V. M. [Foreign experience in the creation and application of FIS (Fight Inspection Systems) systems for the control of characteristics and certification of avionics and aeronautical support of aircraft using DGPS (DGNSS) subsystems]. *Aerokosmicheskie sistemy monitoringa i upravleniya. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Aerospace monitoring systems and management. Materials of the VI International Scientific and Technical Conference]. Kiev, National Aviation University, 2020, vol. 2, pp. 21–29. (In Russ.)
8. Feigenbaum Yu. M., Sokolov Yu. S. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya otechestvennoj sistemy monitoringa ekspluatatsii silovoj konstrukcii grazhdanskih VS [Analysis of the current state and prospects of development of the domestic monitoring system for the operation of the power structure of civil aircraft]. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin GosNII GA*, 2015, no. 7 (318), pp. 14–23.
9. Sizonov I. I., Mukhin I. E., Barabushka A. S. Podhody k opredeleniyu ostatochnogo resursa osnovnyh uzlov vertolyota s uchyotom vypolnennyh profilej polyota [Approaches to determining the residual life of the main components of the helicopter, taking into account the completed flight profiles]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 61–73.
10. Gavril'yev I. M., Korolkov D. I., Gravit M. V. Modificirovannaya metoda rascheta ostatochnogo resursa s ispol'zovaniem eksponencial'nogo raspredeleniya [Modified method of calculating the residual resource using exponential distribution]. *Vestnik Evrazijskoj nauki = Bulletin of Eurasian Science*, 2019, no. 2, pp. 89–103.
11. Kotelkin A. V., Roberov I. G., Matveev D. B., Lednev I. S. Opredelenie ostatochnogo resursa i metody povysheniya urovnya bezopasnosti pri ekspluatirovanii konstrukcionnykh materialov v aviatsii [Determination of the residual resource and methods of increasing the level of safety in the operation of structural materials in aviation]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern Materials, Equipment and Technologies*, 2016, no. 1 (4), pp. 104–113.

12. Varaksina Ya. M., Bukharov A. E. Poryadok perevoda aviacionnyh radiovyso-tomerov na tekhnicheskuyu ekspluatatsiyu po sostoyaniyu [The procedure for transferring aviation radio altimeters to technical operation according to the state]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo" = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2016, vol. 2, pp. 244–251.

13. Sizonov I. I., Barabushka A. S., Mukhin I. E. Dvuhetapnaya matematicheskaya model' ocenki rezhimov vynuzhdenykh vibracij elementa obshivki letatel'nogo apparata s primeneniem optovolokonnykh tekhnologij [A two-stage mathematical model for evaluating the modes of forced vibrations of an aircraft skin element using fiber-optic technologies]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 52–64.

14. Baranov M. I. Antologiya vydayushchihsya dostizhenij v nauke i tekhnike. Chast' 41: kompozicionnye materialy: ih klassifikaciya, tekhnologii izgotovleniya, svoystva i oblasti primeneniya v sovremennoj tekhnike [Anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 41: composite materials: their classification, manufacturing technologies, properties and applications in modern technology]. *Elektrotekhnika. Vydayushchiesya sobytiya. Znamenitye imena = Electrical Engineering. Outstanding Events. Famous Names*, 2017, no. 6, pp. 3–13.

15. Xia Q. Overview of aerospace materials and their applications. *Theoretical and Natural Science*, 2023, no. 13, pp. 115–120. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/13/202408>

16. Cui L. J., Lin X. Y., Zhu Q., Wang C. J., Zhang P. Research progress on heat treatment process of superalloys. *Materials Reports*, 2016, no. 4, pp. 106–117.

17. Nag S., Jordan B., An K., Tiley J., Zhang C., Zhang F. Exploring gradient pathways in high temperature, functionally graded alloys a new approach aims to fabricate parts with targeted, site-specific properties for a wide range of applications in extreme environments within the aviation, space, and energy sectors. *Advanced Materials & Processes*, 2022, vol. 180, no. 2, pp. 16–20.

18. Li S. S., Yue X., Li Q. Y., Peng H. L., Dong B. X., Liu T. S., Yang H. Y., Fan J., Shu S. L., Qiu F., Jiang Q. C. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, no. 2, pp. 112–119. <https://doi.org/10.1016/J.jmrt.2023.09.274>

19. Kartashova E. D. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh defektov na for-mirovanie statisticheskikh polej napryazhenij v kompozicionnykh materialah lopastej kvadrokoptero-rov [Investigation of the influence of technological defects on the formation of statistical stress fields in composite materials of quadrocopter blades]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Higher Educational Institutions. The Volga*

20. Kartashova E. D., Muyzemnek A. Yu. Tekhnologicheskie defekty sloistyh polimernykh materialov [Technological defects of layered polymer materials]. *Tekhnicheskie nauki. Mashinostroenie i mashinovedenie = Technical Sciences. Mechanical Engineering and Machine Science*, 2017, no. 2 (42), pp. 79–89.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Ivan I. Sizonov, Student of the Departments of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-0697-091X

Лебедев Евгений Леонидович, доктор технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: zlebedev@yandex.ru

Evgeny L. Lebedev, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: zlebedev@yandex.ru

Попов Александр Николаевич, генеральный директор, АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru

Alexander N. Popov, General Director, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: MukhinI@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: MukhinI@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Автоматическое распознавание частиц на цифровых изображениях

Е. С. Опарин¹, М. А. Дзус¹✉, Н. Н. Давыдов¹, К. С. Хорьков¹

¹ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых
ул. Горького, д. 87, г. Владимир 600026, Российская Федерация

✉ e-mail: dzus00@mail.ru

Резюме

Цель исследования – разработка и сравнение различных методов и алгоритмов для эффективного анализа частиц на основе их визуальных характеристик. Автоматическое распознавание частиц на цифровых изображениях является актуальной проблемой в области научных исследований. В работе рассматриваются два принципиально разных подхода – анализ градиентов оттенков серого и метод машинного обучения.

Методы. Методология исследования включает анализ изображений частиц, полученных осаждением из коллоидных растворов после лазерной абляции и изображений частиц порошка для селективного лазерного плавления. Материалы получены на электронном микроскопе Quanta 200 3D (FEI). Для анализа применяется бинаризация по пороговой яркости, методы распознавания контуров оператором Кенни и алгоритм Хафа для объединения точек границы в связанные контуры. Для сравнения использовано нейросетевое решение U-Net, для обучения нейросети был создан генератор датасета. В качестве данных для генерации используются вырезанные вручную изображения частиц порошка алюмелевого сплава и микро- и наночастиц различных металлов.

Результаты исследования показывают, что метод Хафа обеспечивает распознавание количества частиц на уровне 80%, а метод машинного обучения достигает 95%-ной точности распознавания формы частиц. Оба метода могут быть применены для анализа микро- и наночастиц, включая частицы неправильной формы.

Заключение. Выводы работы подтверждают, что нейронные сети являются оптимальным решением для автоматического распознавания частиц на цифровых изображениях. Однако для создания датасета достаточного объема необходимо разработать генератор размеченных изображений, что требует детального исследования предметной области.

Ключевые слова: автоматическое распознавание; микро- и наночастицы; цифровые изображения; обработка изображений; машинное обучение; алгоритмы распознавания.

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

Для цитирования: Автоматическое распознавание частиц на цифровых изображениях / Е. С. Опарин, М. А. Дзус, Н. Н. Давыдов, К. С. Хорьков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 50–66. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-14-1-50-66>.

Поступила в редакцию 17.01.2024

Подписана в печать 14.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Automatic Particle Recognition Based on Digital Image Processing

Egor S. Oparin, Maria A. Dzus, Nikolay N. Davydov, Kirill S. Khorkov

¹ Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs
87 Gorky Str., Vladimir 600026, Russian Federation

✉ e-mail: dzus00@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop and compare various methods and algorithms for effective particle analysis based on their visual characteristics. The purpose of this article is to develop and compare various methods and algorithms for effective particle analysis based on their visual characteristics. The paper considers two fundamentally different approaches: the analysis of grayscale gradients and the machine learning method.

Methods. The research methodology includes the analysis of particle images obtained by precipitation from colloidal solutions after laser ablation and images of powder particles for selective laser melting. The materials were obtained using a Quanta 200 3D electron microscope (FEI). For the analysis, threshold brightness binarization, contour recognition methods by the Kenny operator and the Hough algorithm are used to combine boundary points into connected contours. For comparison, the U-Net neural network solution was used, and a dataset generator was created to train the neural network. Hand-cut images of aluminum alloy powder particles and micro and nanoparticles of various metals are used as data for generation.

Results. The results of the study show that the Hough method provides recognition of the number of particles at the level of 80%, and the machine learning method achieves 95% accuracy in recognizing the shape of particles. Both methods can be used to analyze micro- and nanoparticles, including irregularly shaped particles.

Conclusion. The findings of the work confirm that neural networks are the optimal solution for automatic particle recognition in digital images. However, in order to create a dataset of sufficient volume, it is necessary to develop a generator of labeled images, which requires a detailed study of the subject area.

Keywords: automatic recognition; micro- and nanoparticles; digital images; image processing; machine learning; recognition algorithms.

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

For citation: Oparin E. S., Dzus, M. A. Davydov N. N., Khorkov K. S. Automatic Particle Recognition Based on Digital Image Processing. *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(1): 50–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-50-66>.

Received 17.01.2024

Accepted 14.02.2024

Published 29.03.2024

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2024; 14(1): 50–66

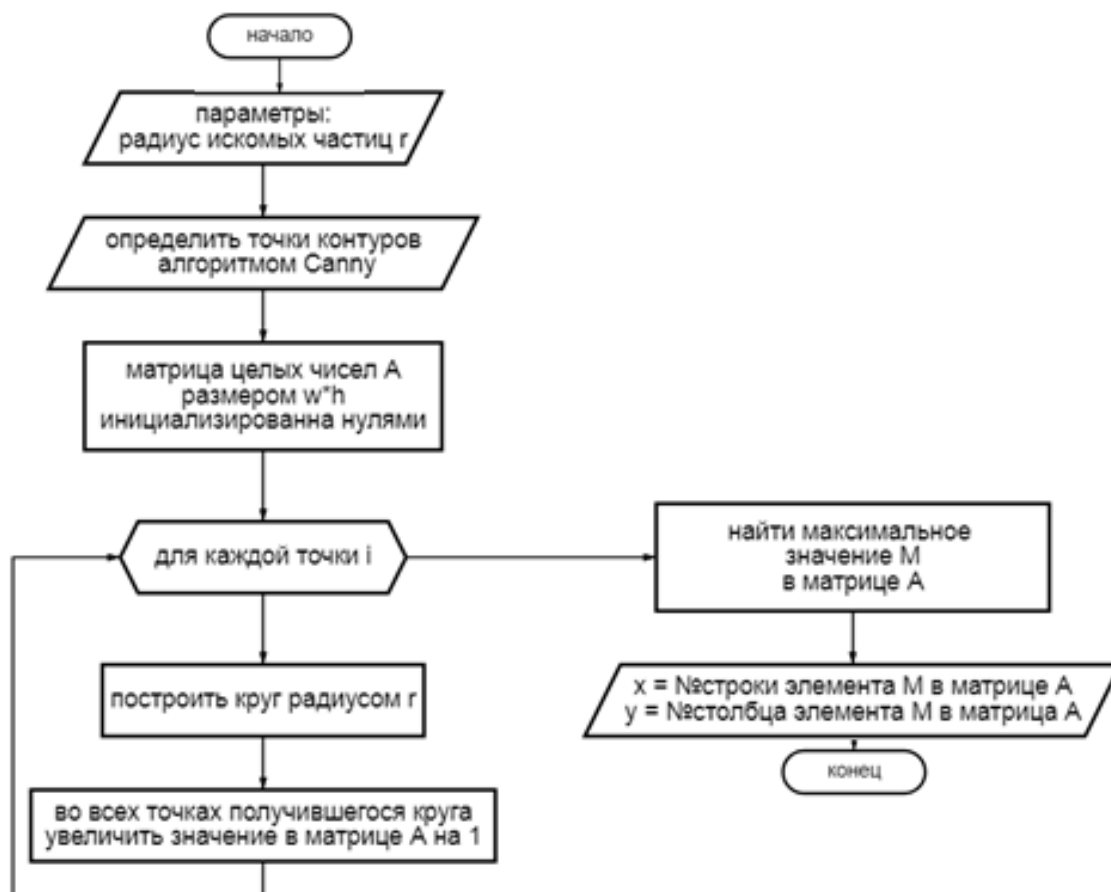


Рис. 2. Блок-схема алгоритма преобразования Хафа для объектов на изображении

Fig. 2. The block diagram of the Hough transform algorithm for objects in the image

Данный метод эффективен для объектов определенных форм, таких как линии, круги или эллипсы, при этом объекты должны иметь четкие границы перепада пикселей для точного выделения краев.

Также классическим является метод препарирования сложных многосвязных плоских изображений (рис. 3). В качестве исходной информации предполагается массив контурных точек, полученных при минимизации изображения. Наиболее простыми и эффективными при реализации препарирования сложных изображений являются

принципы формирования односвязных контуров, основанные на сравнении по ряду критериев элементов дискретизации, описывающих исходную многосвязную геометрическую систему. Блок-схема данного метода представлена на картинке. Для реализации данного метода необходимо выполнить несколько этапов: 1) выбор опорной точки; 2) нахождение точки в поле поиска, ближайшей к опорной; 3) пересылка найденного в поле поиска элемента контура и массив точек формируемого односвязного контура.

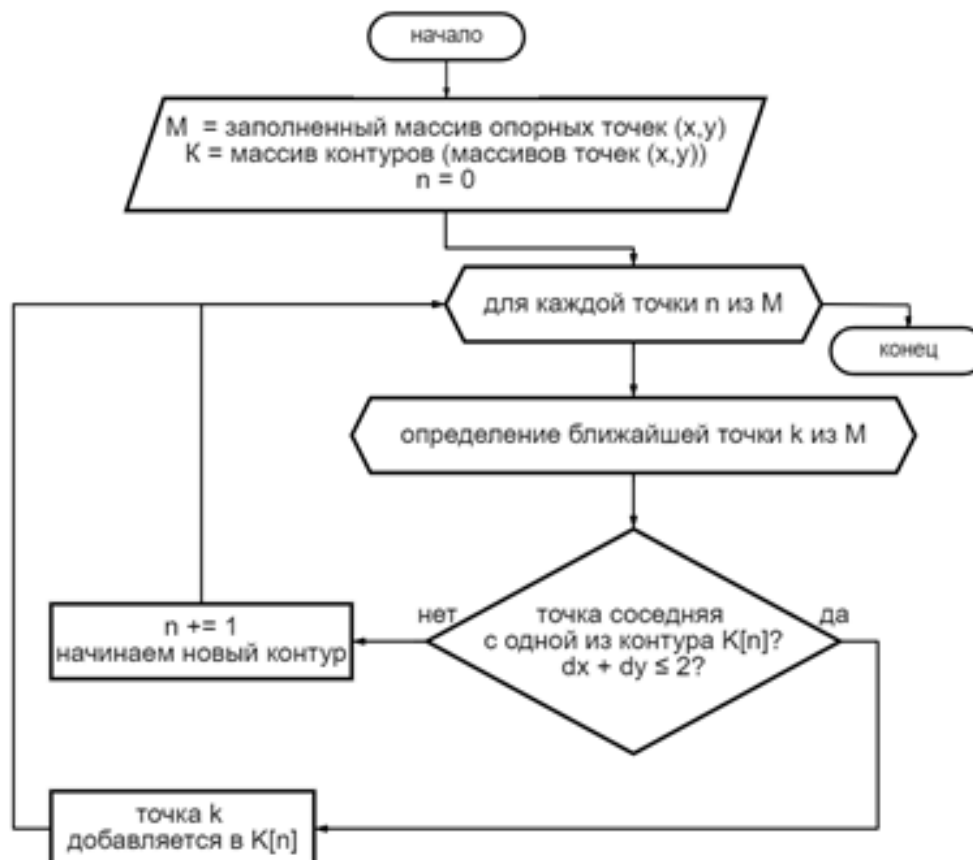


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обработки многосвязных плоских изображений

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for processing multi-connected flat images

Для достижения лучших результатов зачастую изображения подвергаются предобработке различными фильтрами [10], производится бинаризация изображений [11]. При распознавании символов либо букв применяют поиск опорных точек либо разбиение области интереса на зоны фиксированным шагом [12]. Оба эти способа не применимы при распознавании частиц случайной формы.

В работе [13] представлены подходы к автоматическому распознаванию наложенных объектов с использованием сверточных нейронных сетей. Большинство задач распознавания решаются с

использованием языка Python и различных библиотек этого языка [14].

В статье [15] исследуется применение методов машинного обучения для автоматического распознавания и классификации различных объектов. Авторы предлагают использовать сверточные нейронные сети архитектуры U-Net для извлечения признаков и классификации объектов на основе изображений. Создается база данных (датасет), состоящая из пар изображений – оригинальное изображение и маска (рис. 4). Матрица размером ширины и высоты изображения, где элементы матрицы, – это 0, если пиксель относится к фону, или целое число n , если этот пиксель относится к объекту класса с номером n .

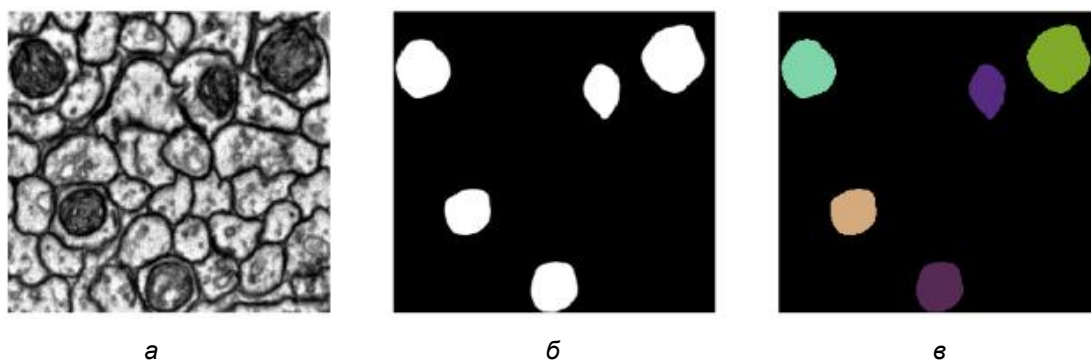


Рис. 4. Изображения, полученные методом машинного обучения: а – оригинальное; б – бинаризация; в – маска для датасета

Fig. 4. Images obtained by machine learning: а – original; б – binarization; в – mask for the data set

После создания датасета с выделенными классами по этой базе происходит обучение нейронной сети, т. е. составляется матрица весов, которая впоследствии будет использована при анализе нового входного изображения уже без маски. Это метод эффективен для распознавания простых объектов, в противном случае появляется необходимость в создании огромной базы данных, учитывающей все возможные классы и формы частиц, содержащей много тысяч изображений для классификации. Использование датасетов требуется при применении любого нейросетевого решения [16].

Также существуют и другие архитектуры нейронных сетей, для которых изображения в датасете не имеют масок, а размечаются текстовыми метками – названиями классов [17]. Практически в каждой для обучения используется метод обратного распространения ошибки [18].

Таким образом, рассмотренные источники показывают, что в данной области существует несколько подходов и методов для распознавания и классификации различных объектов. Приведенные методы чаще включают в себя использование нейронных сетей для целей классификации и анализ текстур, градиентов яркости для целей подсчета

объектов по контурам. Вторые имеют меньшую вычислительную сложность и чаще используются для распознавания в видеопотоке [19].

Одним из примененных методов являлся анализ текстур. Данный метод имеет наименьшую применимость для изображений, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, так как они уже имеют градиенты серых оттенков. Распознавание частиц происходит неправильно.

На рисунке 5 каждый цвет контура показывает границы объектов. Видно, что границы пикселей не совпадают с контурами объектов.

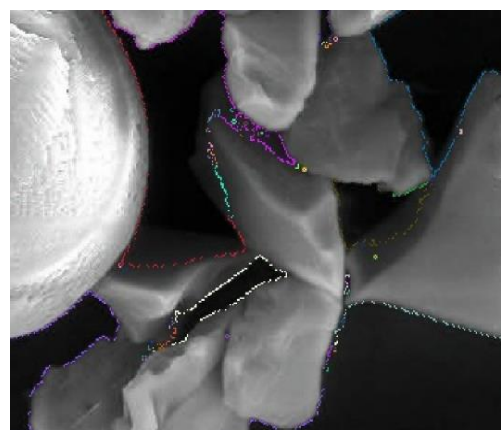


Рис. 5. Реализация метода анализа текстур и градиентов серого

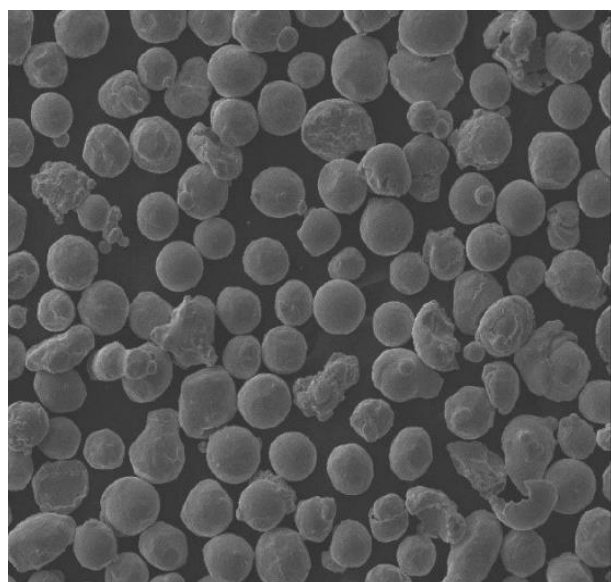
Fig. 5. Implementation of the method for analyzing textures and gray gradients

Для оптимизации был использован алгоритм объединения (рис. 3). Необходимо выполнить несколько этапов для формирования односвязного контура из контуров, которые представлены выше (рис. 5). С этой целью были использованы параметры, представленные в таблице 1, необходимые для реализации алгоритма Хафа.

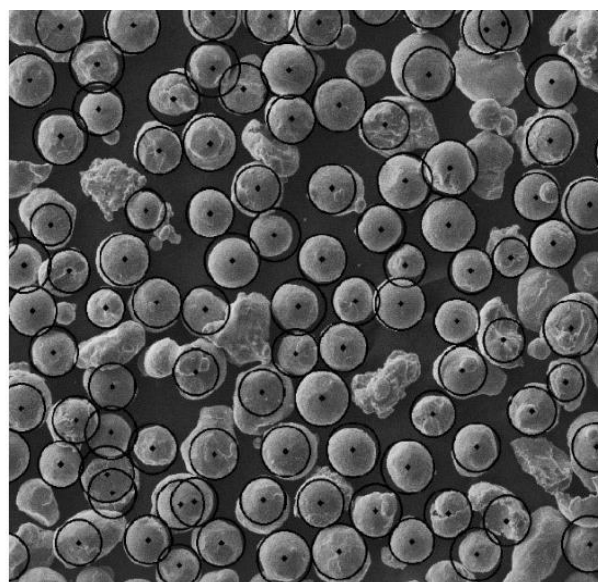
Таблица 1. Параметры алгоритма Хафа

Table 1. Parameters of the Hough algorithm

Параметр	Значение
Пикселей между центрами кругов	1
Минимальное расстояние между центрами	20
Минимальный порог	10
Максимальный порог	30
Минимальный радиус частиц	25
Максимальный радиус частиц	40



а



б

Рис. 6. Результат распознавания алгоритмом Хафа с изменяемыми параметрами:
а – исходное изображение; б – результат программы, определено 115 частиц

Fig. 6. The result of recognition by the Hough algorithm with variable parameters:
а – the original image; б – the result of the program, 115 particles are determined

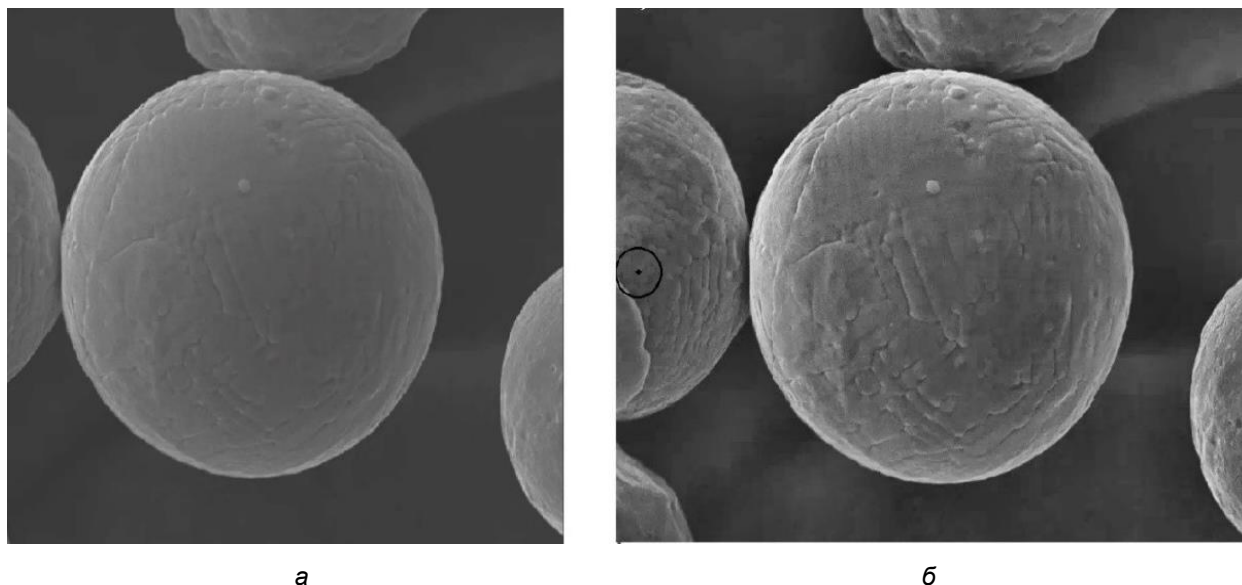


Рис. 7. Результат распознавания одиночной частицы на изображении с помощью алгоритма Хафа с изменяемыми параметрами: *а* – исходное изображение; *б* – результат программы, определена 1 частица

Fig. 7. The result of recognizing a single particle in the image using Hough's algorithm with variable parameters: *a* – the original image; *b* – the result of the program, 1 particle is determined

Выявлены недостатки метода сложных многосвязных плоских изображений: требуется тщательное изучение структуры изображения, оценка возможных образующихся форм. Для каждой формы необходим алгоритм ее определения. В показанном случае был использован только алгоритм Хафа для поиска исключительно сферических частиц. В общем случае для каждого изображения необходимо подбирать изменяемые параметры для эффективного распознавания. В показанном на рисунке 6, б случае удовлетворительно определено только количество частиц с точностью около 80%, многие частицы несферической

формы были классифицированы алгоритмом Хафа как круги.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера использования метода машинного обучения была использована архитектура нейронной сети, разработанная для сегментации изображений U-Net [20]. Она применяется для задач сегментации, когда требуется выделить определенный объект или область изображения. При ручной разметке датасета выделялись границы искоемых частиц и осуществлялось обучение нейронной сети по нескольким изображениям, результаты распознавания представлены ниже (рис. 8).

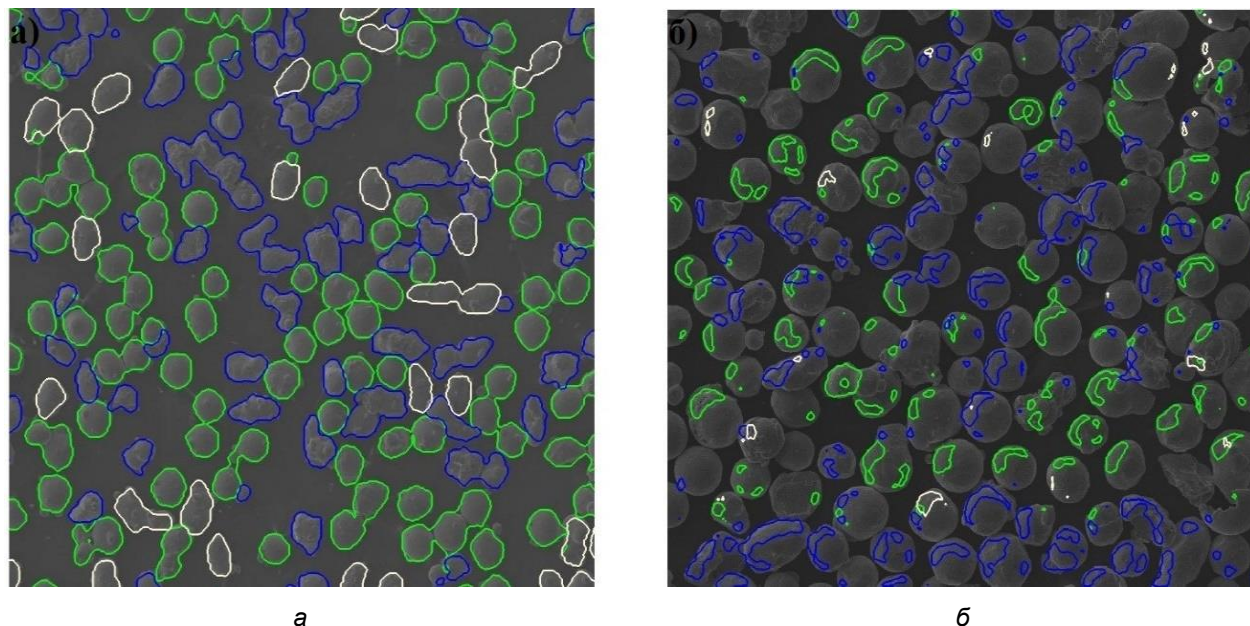


Рис. 8. Результат распознавания с ручной разметкой для архитектуры U-Net:
а – изображение, на котором происходило обучение;
б – изображение, не участвовавшее в обучении

Fig. 8. The result of recognition with manual markup for the U-Net architecture:
а – the image on which the training took place;
б – an image that was not involved in the training

На рисунке 8 показано, что при первичном использовании датасета из 2 изображений размером 1000x1000 пикселей и примерно 50 размеченных частиц каждого класса (круг, овал, бесформенная частица) нейронная сеть частично может выполнить поставленную задачу – с удовлетворительной точностью посчитано количество частиц. Определение формы частиц оценивается как неудовлетворительное, и дальнейший анализ на основе выявленных контуров невозможен.

Выявленные недостатки нейронной сети U-Net: зависимость от наличия большого объема размеченных данных, создание которого является сложным и затратным процессом; неэффективность в случае сильного несоответствия размеров объектов.

В качестве оптимизации использования нейронной сети был создан генератор обучающего датасета. Генератор представляет собой необходимый инструмент, который автоматически создает синтетические данные для использования в машинном обучении на основе реализации алгоритма, представленного на рисунке 9. Из входных данных, вырезанных «вручную» отдельных частиц разных форм (рис. 10), генерируются изображения 1000×1000 пикселей с разным количеством частиц. Объекты располагаются в случайных местах изображения с применением операций поворота и масштаба (рис. 11). Также генератор автоматически создает маску для каждого изображения.

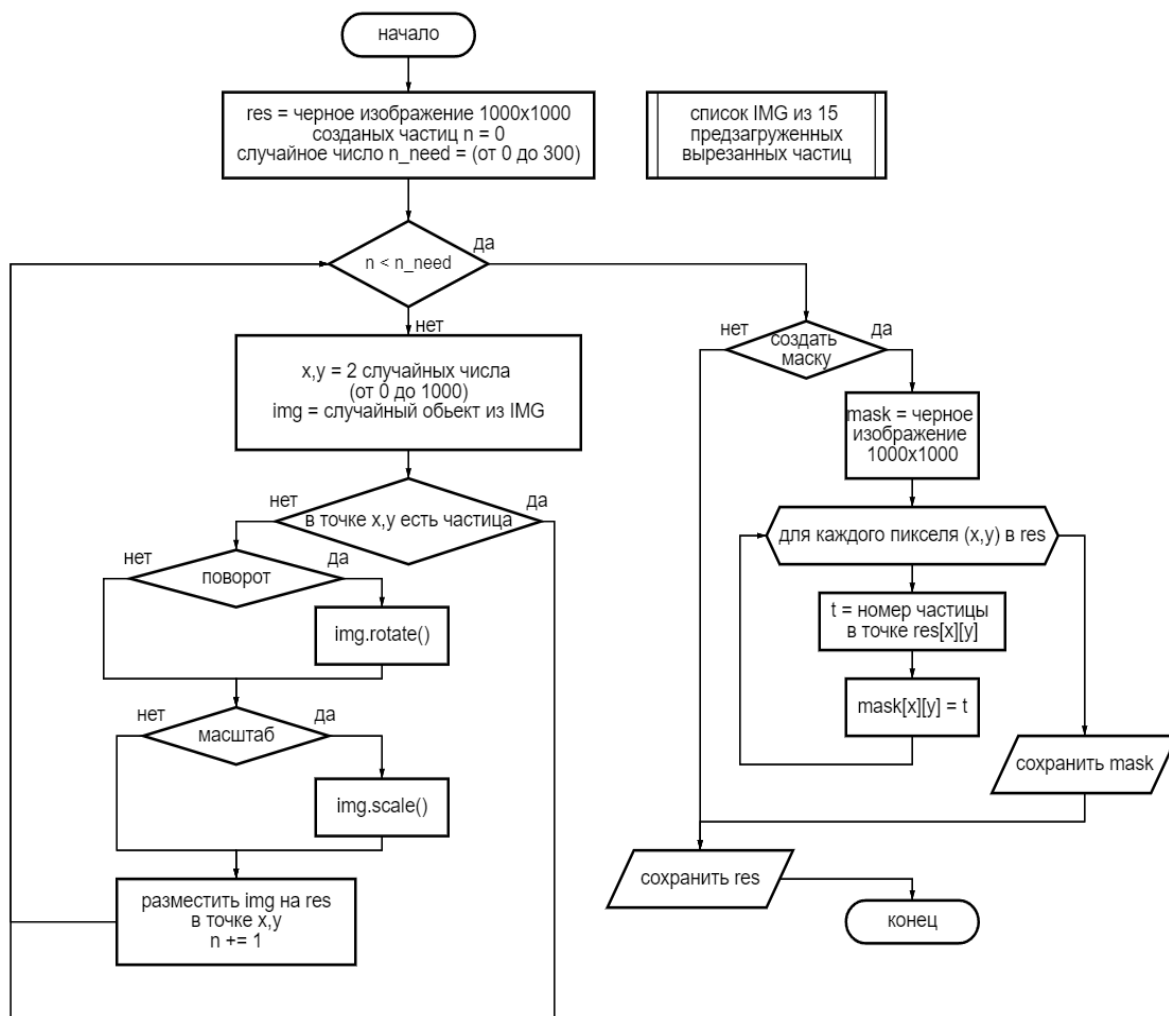


Рис. 9. Блок-схема алгоритма генератора обучающего датасета

Fig. 9. Block diagram of the algorithm of the training dataset generator

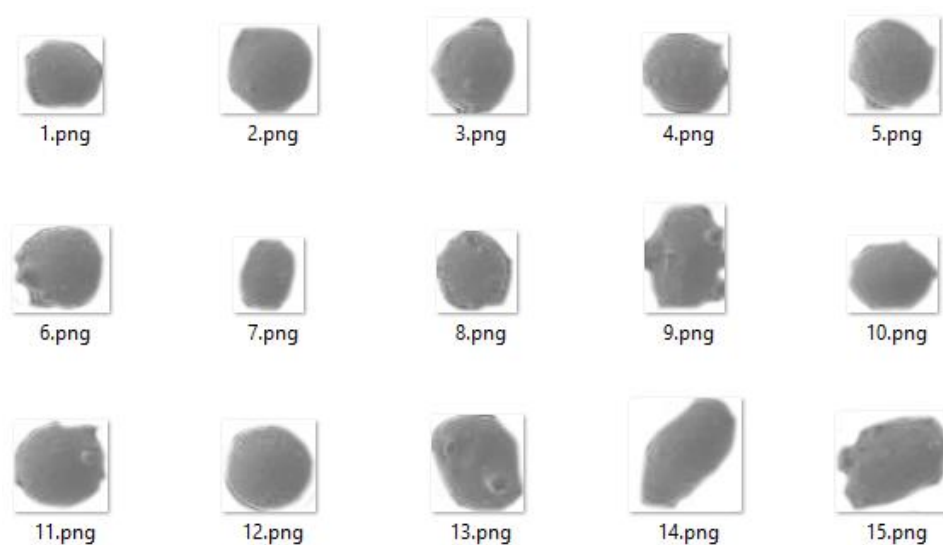


Рис. 10. Частицы, использованные в генераторе датасета

Fig. 10. Particles used in the dataset generator

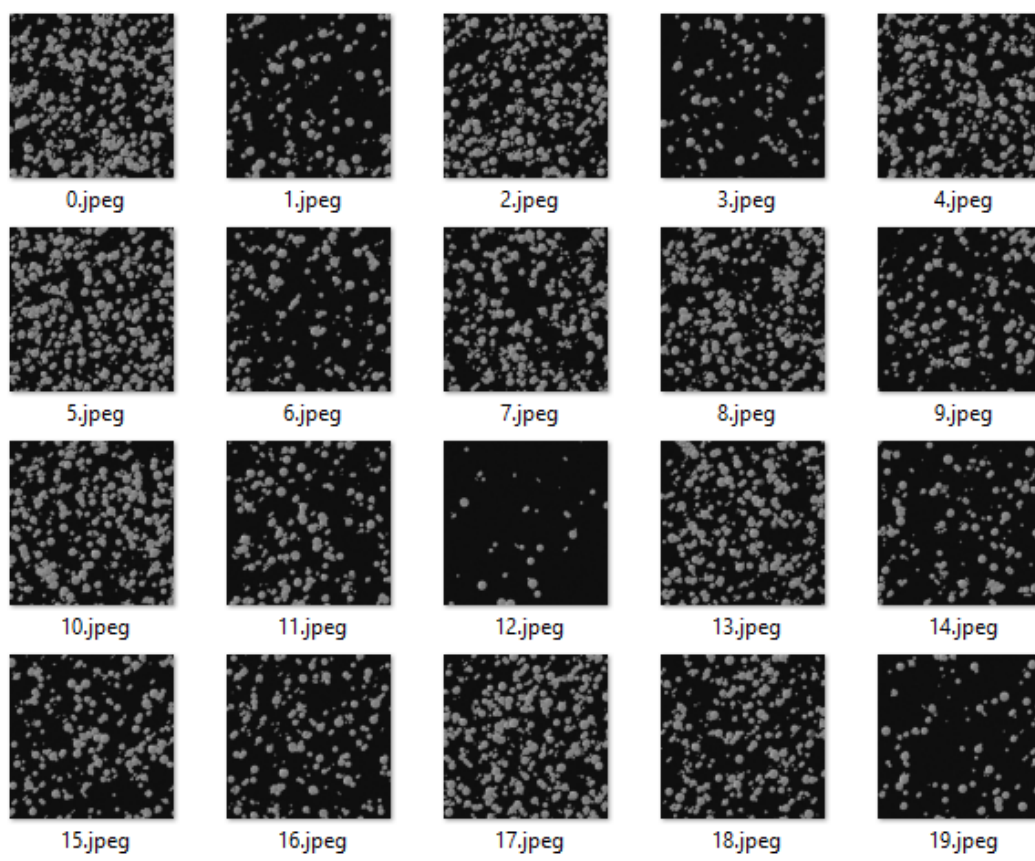


Рис. 11. Создаваемые генератором изображения

Fig. 11. Images created by the generator

Преимущества использования генератора обучающего датасета:

1. Экономия времени и ресурсов. Генератор датасета автоматически создает данные, что позволяет избежать необходимости собирать или размечать данные вручную.

2. Увеличение разнообразия данных. Генератор позволяет создавать данные с различными характеристиками, что помогает повысить разнообразие и состав датасета. Это особенно полезно, когда требуется обучить модель на данных разных типов или различных вариаций определенных параметров.

3. Контроль над параметрами данных. Генератор дает возможность

настраивать параметры создаваемых данных, такие как распределение, шум, корреляция.

Однако следует учитывать главный недостаток генераторов – возможная неправдоподобность данных. Генераторы обучающих датасетов могут создавать данные, которые не всегда соответствуют реальным объектам. Важно тщательно проверять создаваемые данные и удостовериться в их достоверности и применимости для конкретной задачи. Результат распознавания после обучения нейронной сети на сгенерированных синтетических данных показан ниже (рис. 12).

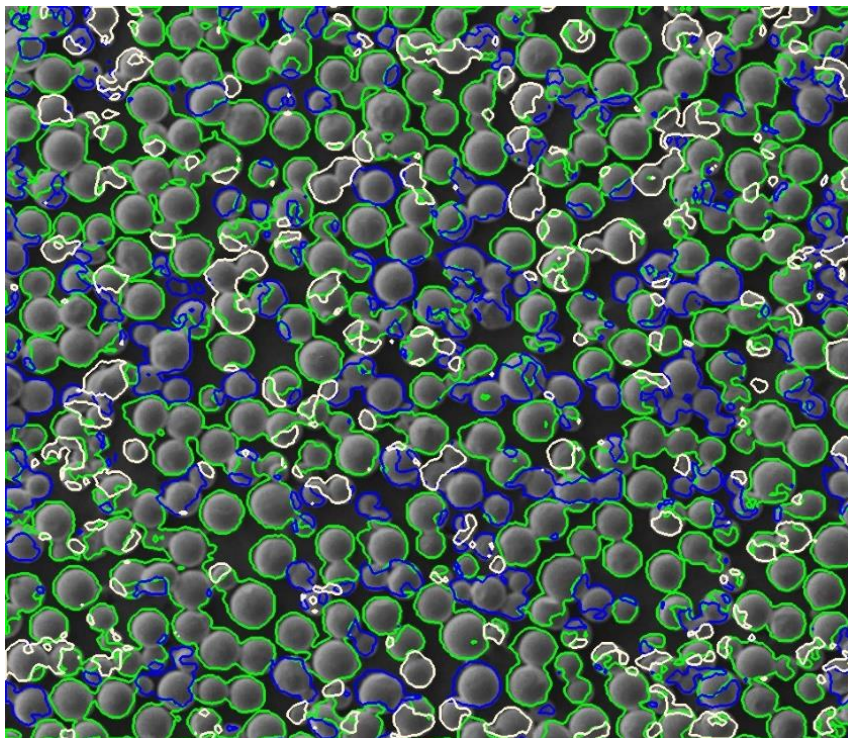


Рис. 12. Результат распознавания на реальном изображении после обучения только на синтетических данных

Fig. 12. Recognition result on a real image after training only on synthetic data

Выводы

Разработаны методы анализа изображений на основе распознавания контуров и алгоритма Хафа, на основе нейросетевого решения U-Net. В качестве исходных данных взяты изображения с растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D (FEI) – частицы порошка алюминия для селективного лазерного плавления, а также частицы, образованные осаждением коллоидных растворов после абляции лазерным излучением различных металлов. Оптимальным способом

признаются нейронные сети, но для создания датасета достаточного объема требуется создать правдоподобный генератор размеченных изображений, что требует тщательного анализа предметной области.

Результатом получилось распознавание количества частиц методом Хафа на 80% и 95% распознавания форм методом машинного обучения. Оба приведенных метода могут применяться для анализа микро- и наночастиц, в т. ч. неправильной формы.

Список литературы

1. Гуляев П. В., Шелковников Е. Ю., Ермолин К. С. Обработка и распознавание изображений реперных отметок для локализации зонда в сканирующем туннельном микроскопе // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 3. С. 437–445.

2. Многопоточная архитектура программного обеспечения обработки многоканальных медицинских сигналов / М. Б. Мяснянкин, А. А. Кузьмин, В. В. Серебровский, Е. А. Алдохин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 76–97.
3. Аллаберганов А. А. Метод распознавания текстовой информации из цифровой формы (изображение), определение очередности нанесения реквизитов // Закон и право. 2020. № 4. С. 187–193.
4. Гундин А. А., Гундина М. А., Чешкин А. Н. Обработка цифровых изображений при дефектоскопии поверхностей промышленных объектов // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 3. С. 225–232.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы оценивания состояний природных объектов // Автометрия. 2018. Т. 54, № 5. С. 33–38. <https://doi.org/10.15372/AUT20180504>.
6. Арлазаров В. В., Булатов К. Б., Усков А. Б. Модель системы распознавания объектов в видеопотоке мобильного устройства // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2018. Спецвыпуск. С. 73–82.
7. Борзов С. М., Потатуркин О. И. Исследование эффективности спектрально-пространственной классификации данных гиперспектральных наблюдений // Автометрия. 2017. Т. 53, № 1. С. 32–42.
8. Inception-v4, Inception-Resnet and the impact of residual connections on learning / C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. San Francisco, California, USA: AAAI Press, 2017. P. 4278–4284.
9. Automatic Detection and Counting of Circular Shaped Overlapped Objects Using Circular Hough Transform and Contour Detection / Jianjun Ni, Zubair Khan, Shihao Wang, Kang Wang, Syed Kamran Haider // 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, China: IEEE, 2016. P. 2902–2906.
10. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстросействующей обработке символьной информации // Известия Юго-Западного государственного университета Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–116.
11. Местецкий Л. Непрерывная морфология бинарных изображений. Фигуры, скелеты, циркуляры. М.: Физматлит, 2009. 286 с.
12. Распознавание символьной информации для автоматизации производственных процессов / В. С. Панищев, М. И. Труфанов, О. Г. Добросердов, О. О. Хомяков //

Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 1. С. 122–137. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-122-137>.

13. Hybrid Neural Network Architecture for Multi-Label Object Recognition using Feature Fusion / Divya Meena S., Veeramachaneni Gayathri Siva Sameeraja, Nagineni Sai Lasya, Mada Sathvika, Veluru Harshitha, J. Sheela // *Procedia Computer Science*. 2022. N 215. P. 78–90.

14. Manaswi N. K. *Deep Learning with Applications Using Python*. New York, USA: Springer Science – Business Media, 2018. 219 p.

15. PDAtt-Unet: Pyramid Dual-Decoder Attention Unet for COVID-19 infection segmentation from CT-scans / F. Bougourzi, C. Distant, F. Dornaika, A. Taleb-Ahmed // *Medical Image Analysis*. 2023. N 86 (17). P. 102797.

16. Low-cost automated whole smear microscopy screening system for detection of acid fast bacilli / Y. N. Law, H. Jian, N. W. S. Lo [et al.] // *PLoS One*. 2018. N 1 (13). P. 1–8.

17. Полковникова Н. А. Нейросетевые системы автоматического распознавания морских объектов // *Эксплуатация морского транспорта*. 2019. № 4. С. 207–219. <https://doi.org/10.34046/aumsuomt94/29>.

18. Абдулкадиров Р. И., Ляхов П. А. Новый подход к обучению нейронных сетей с помощью натурального градиентного спуска с импульсом на основе распределений дирихле // *Компьютерная оптика*. 2023. № 1. С. 160–170.

19. Попов Г. А., Попова Т. А. Сравнение алгоритмов распознавания объектов // *Инновация в информатике*. 2020. Т. 14, № 2. С. 21–25.

20. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Cham: Springer, 2015. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.

References

1. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Ermolin K. S. Obrabotka i raspoznavanie izobrazhenij reперnyh otmetok dlya lokalizacii zonda v skaniruyushchem tunnel'nom mikroskope [Image processing and recognition of reference marks for probe localization in a scanning tunneling microscope]. *Himicheskaya fizika i mezoskopiya = Chemical Physics and Mesoscopy*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 437–445.

2. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Serebrovskiy V. V., Aldokhin E. A. Mnogopotochnaya arhitektura programmnogo obespecheniya obrabotki mnogokanal'nyh medicinskih signalov [Multithreaded software architecture for processing multicameral medical signals]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest*

State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 76–97.

3. Allaberganov A. A. Metod raspoznavaniya tekstovoj informacii iz cifro-voj formy (izobrazhenie), opredelenie ocherednosti naneseniya rekvizitov [The method of recognizing textual information from a digital form (image), determining the order of application of details]. *Zakon i pravo = Law and Law*, 2020, no. 4, pp. 187–193.

4. Gundin A. A., Gundina M. A., Cheshkin A. N. Obrabotka cifrovyyh izobrazhenij pri defektoskopii poverhnostej promyshlennykh ob"ektov [Processing of digital images during flaw detection of surfaces of industrial objects]. *Nauka i tekhnika = Science and Technology*, 2016, vol. 15, no. 3, pp. 225–232.

5. Lapko A. V., Lapko V. A. Neparametricheskie algoritmy ocenivaniya sostoyanij prirodnkh ob"ektov [Nonparametric algorithms for determining the position of primary objects]. *Avtometriya = Autometry*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 33–38. <https://doi.org/10.15372/AUT20180504>

6. Arlazarov V. V., Bulatov K. B., Uskov A. B. Model' sistemy raspoznavaniya ob"ektov v videopotoke mobil'nogo ustrojstva [Model of the object recognition system in the video stream of mobile device]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossijskoj akademii nauk = Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*, 2018, special is., pp. 73–82.

7. Borzov S. M., Potaturkin O. I. Issledovanie effektivnosti spektral'no-prostranstvennoj klassifikacii dannykh giperspektral'nykh nablyudenij [Investigation of the effectiveness of spectral-spatial classification of hyperspectral observation data]. *Avtometriya = Autometry*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 32–42.

8. Segedi S., Ioffe S., Vanhoek V., eds. Inception-v4, Inception-Resnet and the influence of residual connections on learning. Proceedings of the AAAI conference on Artificial intelligence. San Francisco, California, USA, AAAI Press Publ., 2017, pp. 4278–4284.

9. Jianjun Ni, Zubair Khan, Shihao Wang, Kang Wang and Syed Kamran Haider. Automatic detection and counting of overlapping circular objects using circular Hough transform and contour detection. 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, China, IEEE Publ., 2016. pp. 2902–2906.

10. Konanykhin A. Yu., Konanykhina T. N., Panishchev V. S. Metody uluchsheniya vydelennoj oblasti izobrazheniya pri bystrodejstvuyushchej obrabotke simvol'noj informacii [Methods of improving the divided image area with high-speed processing of symbolic information]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 106–116.

11. Mestetsky L. Nepreryvnaya morfologiya binarnykh izobrazhenij. Figury, skelety, sirkulyary [Continuous morphology of binary images. Figures, skeletons, circulars]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 286 p.
12. Panishchev V. S., Trufanov M. I., Dobroserdov O. G., Khomyakov O. O. Raspoznavanie simvol'noj informacii dlya avtomatizacii proizvodstvennykh processov [Recognition of symbolic information for automation of production processes]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2021, no. 25(1), pp. 122–137. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-122-137>
13. Divya Meena S., Viramachaneni Gayatri Shiva Samiraja, Nagineni Sai Lasya, Mada Satvika, Veluru Harshita, J. Shila. Architecture of a hybrid neural network for recognizing objects with multiple labels using feature fusion. *Procedia Computer Science*, 2022, no. 215, pp. 78–90.
14. Manasvi N. K. Deep learning using Python applications. New York, USA, Springer Science – Business Media Publ., 2018. 219 p.
15. Bougourzi F., Distant C., Dornaika F., Taleb-Ahmed A. PDAtt-Unet: Pyramid Dual-Decoder Attention Unet for COVID-19 infection segmentation from CT-scans. *Medical Image Analysis*, 2024, no. 86(17), p. 102797.
16. Law Y. N., Jian H., Lo N. W. S., eds. Low-cost automated whole smear microscopy screening system for detection of acid fast bacilli. *PLoS One*, 2018, no. 1 (13), pp. 1–8.
17. Polkovnikova N. A. Nejrosetevye sistemy avtomaticheskogo raspoznavaniya morskikh ob"ektov [Neural network systems for automated recognition of marine objects]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta = Encyclopedia of Marine Transport*, 2019, no. 4, pp. 207–219. <https://doi.org/10.34046/aumsuomt94/29>
18. Abdulkadirov R. I., Lyakhov P. A. Novyj podhod k obucheniyu nejronnykh setej s pomoshch'yu natural'nogo gradientnogo spuska s impul'som na osnove raspredelenij dirihle [A new approach to training neural networks using natural gradient descent with an impulse based on Dirichlet distributions]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2023, no. 1, pp. 160–170.
19. Popov G. A., Popova T. A. Sravnenie algoritmov raspoznavaniya ob"ektov [Comparison of object recognition algorithms]. *Innovatsiya v informatike = Innovation in Computer Science*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 21–25.
20. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for segmentation of biomedical images. Medical image processing and computer intervention – MICCAI 2015. Cham, Springer Publ., 2015, pp. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Информация об авторах / Information about the Authors

Опарин Егор Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры физики и прикладной математики, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: oparines@vlsu.ru, ORCID: 0009-0001-6154-906X

Egor S. Oparin, Post-Graduate Student, Assistant of the Department of Physics and Applied Mathematics, Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, e-mail: oparines@vlsu.ru, ORCID: 0009-0001-6154-906X

Дзус Мария Александровна, аспирант, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: dzus00@mail.ru, ORCID: 0009-0003-8071-8150

Maria A. Dzus, Post-Graduate Student, Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, e-mail: dzus00@mail.ru, ORCID: 0009-0003-8071-8150

Давыдов Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: n.n.davydov@mail.ru, ORCID: 0009-0003-3392-818X

Nikolay N. Davydov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, e-mail: n.n.davydov@mail.ru, ORCID: 0009-0003-3392-818X

Хорьков Кирилл Сергеевич, кандидат физико-математических наук, директор Института прикладной математики, физики и информатики, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: khorkov@vlsu.ru, ORCID: 0000-0002-5402-0846

Kirill S. Khorkov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Director of the Institute of Applied Mathematics, Physics and Computer Science, Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, e-mail: khorkov@vlsu.ru, ORCID: 0000-0002-5402-0846

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-67-87>



УДК 004.89

Автоматизированная классификация абдоминальных ультразвуковых изображений поджелудочной железы на основе спектрального представления контуров ее границы

А. А. Кузьмин¹ ✉, А. Ю. Сухомлинов¹, Часиб Хасан Аль-Дарраджи²,
Р. А. Томакова¹, С. Д. Долженков³, Л. В. Шульга¹

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

² Университет Дияла, г. Баакубу, Республика Ирак

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

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Резюме

Цель исследования – развитие методологии классификации сложноструктурируемых полутонковых изображений на основе мультимодального подхода с использованием методов морфологического анализа, спектрального анализа и нейросетевого моделирования.

Методы. Описан метод классификации контуров границ сегментов сложноструктурируемых изображений применительно к изображениям поджелудочной железы, полученных с экрана УЗИ-монитора. Метод основан на том положении, что при хронических заболеваниях поджелудочной железы наблюдается нарушение целостности контура ее границы и увеличивается его волнистость за счет втяжений и выпуклостей, обусловленных альтеративно-воспалительным процессом. Метод включает этапы нормализации ультразвуковых изображений и сегментации изображения с выделением контура объекта интереса. Для классификации контура границы сегмента предложено использовать анализ Фурье и нейросетевые технологии. Метод проиллюстрирован на примере классификации контура границы поджелудочной железы на ее акустическом изображении.

Результаты. Экспериментальные исследования предложенных методов и средств классификации медицинского риска были осуществлены на задачах диагностики по классам «хронический панкреатит» и «без патологии». Для экспериментальных исследований использовались видеопоследовательности УЗИ-снимков поджелудочной железы, предоставленные врачом-эндоскопистом. Целью экспериментальных исследований был анализ показателей качества классификации классификаторов изображений с сегментами класса «хронический панкреатит» и «без патологии». Обучающая выборка видеоизображений (кадров видеопоследовательностей) включала в себя 200 примеров по сто из каждого класса. Показатель качества «чувствительность» классификации по двум классам – 85,7%, показатель «специфичность» – 87,1%.

Заключение. Использование метода контурного анализа в классификаторах УЗИ-изображений поджелудочной железы открывает новые возможности для доступной и объективной диагностики заболеваний поджелудочной железы, расширяя возможности интеллектуальных систем поддержки принятия клинических решений.

Ключевые слова: морфологический анализ; контурный спектральный анализ; дескрипторы; поджелудочная железа; акустическое изображение; нейронные сети.

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

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

Для цитирования: Автоматизированная классификация абдоминальных ультразвуковых изображений поджелудочной железы на основе спектрального представления контуров ее границы / А. А. Кузьмин, А. Ю. Сухомлинов, Часиб Хасан Аль-Дарраджи, Р. А. Томакова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 67–87. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-67-87>

Поступила в редакцию 09.01.2024

Подписана в печать 08.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Automated Classification of Abdominal Ultrasound Images of the Pancreas Based on the Spectral Representation of the Border's Contours

Alexander A. Kuzmin¹ ✉, Artem Yu. Sukhomlinov¹, Chasib Hasan Al-Darraj², Rimma A. Tomakova¹, Sergey D. Dolzhenkov³, Leonid V. Shulga¹

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

² Diyala University, Ba'qubu, Republic of Iraq

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

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is to develop a methodology for classifying complexly structured halftone images based on a multimodal approach using methods of morphological analysis, spectral analysis and neural network modeling.

Methods. A method for classifying the contours of the boundaries of segments of a complexly structured image is described. The method is based on the fact that in chronic diseases of the pancreas, there is a violation of the integrity of the contour of its border and its waviness increases due to retractions and bulges caused by an alterative inflammatory process. The method includes the stages of normalization of ultrasound images and image segmentation with the selection of the contour of the object of interest. To classify the contour of a segment boundary, it is proposed to use Fourier analysis and neural network technologies. The method is illustrated using the example of classifying the contour of the border of the pancreas on its transcutaneous acoustic image.

Results. Experimental studies of the proposed methods and means for classifying medical risk were carried out on diagnostic tasks according to the following classes: "chronic pancreatitis" – "without pathology". For experimental studies, video sequences of ultrasound images of the pancreas provided by an endoscopist were used. The purpose of the experimental studies was to analyze the classification quality indicators of image classifiers with class segments "Chronic pancreatitis" and "Without pathology". The training sample of video images (frames of video sequences) included 200 examples, one hundred from each class. The quality indicator "Sensitivity" of classification for two classes is 85,7%, the indicator "Specificity" is 87,1%.

Conclusion. *The use of the contour analysis method in classifiers of ultrasound images of the pancreas opens up new opportunities for accessible and objective diagnosis of pancreatic diseases, expanding the capabilities of intelligent clinical decision support systems.*

Keywords: *morphological analysis; contour spectral analysis; descriptors; pancreas; acoustic image; neural networks.*

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

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

For citation: Kuzmin A. A., Sukhomlinov A. Yu., Chasib Hasan Al-Darraj, Tomakova R. A. Automated Classification of Abdominal Ultrasound Images of the Pancreas Based on the Spectral Representation of the Border's Contours. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravljenje, vychislitel'naja tehnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024; 14(1): 67–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-67-87>.

Received 09.01.2024

Accepted 08.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

Анализ медицинских изображений, полученных посредством использования различных физических полей, широко используется в медицинской практике [1]. Как правило, это либо рентгенологические [2], либо УЗИ-изображения [3], которые широко используются в диагностической практике оценки риска заболеваний различных внутренних органов. Рентгенологические и акустические исследования взаимно дополняют друг друга, и для их описания требуются специалисты высокой квалификации. Несмотря на это, по результатам анализа этих изображений имеет место высокий процент ложноположительных результатов, что вызывает необходимость в подключении систем

искусственного интеллекта [4], построенных на различных парадигмах машинного обучения [5].

Заболевания органов панкреатобилиарной зоны являются сложной проблемой для комплексной диагностики и лечения¹. В настоящее время ультразвуковое исследование (УЗИ) является неинвазивным методом, доступным и широко применяемым при диспансеризации, который предоставляет исследователю большие информационные возможности для диагностики заболеваний [6]. Выполняя УЗИ, врач оценивает несколько параметров, основными из которых являются эхогенность, структура и контуры органа.

Следует отметить, что обрабатываемые УЗИ-изображения представляют

¹ Солоднина Е. Н. Эндоскопическое ультразвуковое исследование в диагностике хирургических заболеваний органов

панкреатобилиарной зоны: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2016. 38 с.

собой матрицу интенсивностей значений полутоновых пикселей. При этом интенсивность окраса каждого анализируемого пикселя изображения зависит от многих характеристик, таких как величина амплитуды отраженного сигнала, значение плотности тканей. Результаты исследования, проведенные в [7], показали, что размер ПЖ при хроническом панкреатите (ХП) изменялся в зависимости от стадии и фазы заболевания [8].

Ультразвуковой датчик излучает ультразвуковые волны, которые распространяются в исследуемой области. При пересечении границ сред ультразвуковые волны частично отражаются, а также частично поглощаются. В современных ультразвуковых аппаратах интенсивность отраженного сигнала обычно отображается в градациях серого (1 – полное отражение; 0 – полное поглощение) [9]. Полученная таким образом информация дает возможность анализировать различные ткани и органы по их плотности.

Поглощение ультразвукового сигнала является одним из основных ограничений ультразвуковой диагностики. Оно приводит к тому, что с увеличением глубины сканирования интенсивность отраженного сигнала снижается, что приводит к уменьшению количества информации о глубоких структурах исследуемых органов.

Для уменьшения поглощения ультразвукового сигнала в ультразвуковой диагностике выполняются различные

методы, такие как: применение более низкочастотных ультразвуковых волн, реализация более мощных ультразвуковых излучателей, использование специальных режимов сканирования, таких как режим с цветовым доплеровским картированием [9].

Развитие методов медицинской визуализации существенно повысило точность диагностики заболеваний ПЖ. Чувствительность УЗИ в диагностике ХП составила 81%, специфичность – 75%, точность – 73%. В исследованиях, проведенных в [8], было установлено, что увеличение размеров ПЖ отмечается при обострении панкреатита, а уменьшение – прогрессирующим фиброзом.

Таким образом, цель работы заключается в разработке классификаторов, построенных на дескрипторах, которые получены на основе анализа контура границы поджелудочной железы [10], предназначенных для определения функционального состояния ПЖ.

Материалы и методы

Процедура нормализации обрабатываемых УЗИ-изображений ПЖ является первым важным этапом для реализации автоматизированного контурного анализа.

Как уже отмечалось выше, для сканирования более глубоких структур требуется более мощный сканирующий сигнал и более чувствительные датчики, так как внутренние органы, по сути, находятся в акустической тени от

наружных органов. Также в поле зрения датчика могут попасть пузырьки газов (например, в кишечнике), которые интенсивно поглощают ультразвук и оставляют заметную тень. В результате на больших глубинах сканирующий сигнал заметно затухает и датчик фиксирует меньший амплитудный ответ даже при значительном акустическом

отражении среды внутренних органов. На предельной глубине сканирования у некоторых аппаратов УЗИ всегда темная картина вне зависимости от типа сканируемой ткани. Это зависит от типа аппарата, типа и частоты датчика, от состояния датчика и т. п. На рисунке 1 приведены различные изображения ПЖ, полученные с помощью разных аппаратов.

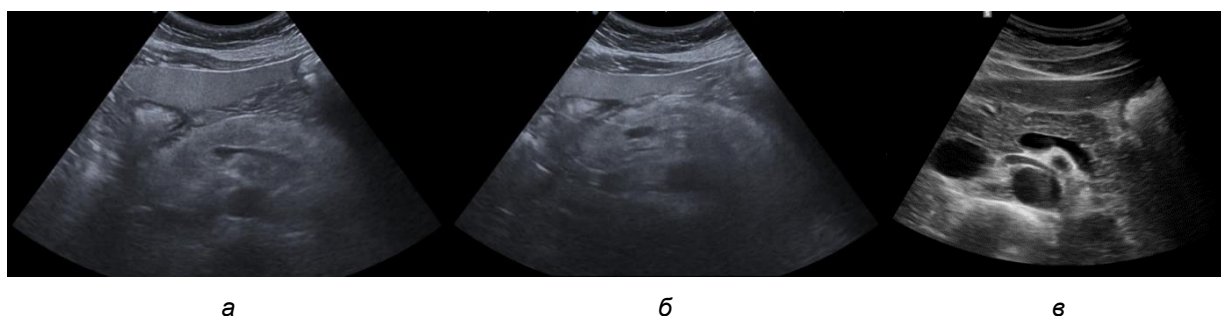


Рис. 1. УЗИ-изображения поджелудочной железы: а – изображение 1 ПЖ, полученное с монитора аппарата Hitachi Aloka ProSound Alpha 6 с помощью двух датчиков; б – изображение 2 ПЖ, полученное с монитора аппарата Hitachi Aloka ProSound Alpha 6 с помощью двух датчиков; в – изображение ПЖ, полученное с монитора аппарата HS60 (Samsung Medison) с постобработкой

Fig. 1. Ultrasound images of the pancreas: а – image of 1 pancreas obtained from the monitor of the Hitachi Aloka ProSound Alpha 6 device using two sensors; б – image 2 of the pancreas obtained from the monitor of the Hitachi Aloka ProSound Alpha 6 device using two sensors; в – image of the pancreas obtained from the monitor of the HS60 device (Samsung Medison) with post-processing

В случае исследования ПЖ проблема поглощения ультразвукового сигнала приводит к тому, что дистальная часть органа исследуется при высокой интенсивности сканирующего сигнала, а проксимальная часть находится в собственной тени и формирует изображение при существенно более низкой интенсивности сканирующего сигнала.

Эту проблему необходимо учитывать при определении степени эхогенности пикселя ультразвукового изображения при автоматическом анализе

(пониженная, повышенная, средняя). Например, при попытке классификации интенсивностей пикселей по их абсолютному значению методом сравнения с пороговым значением (для поиска, например, границ внутренних органов) мы приходим к ситуации, когда подавляющее число проксимальных (верхних на изображении) пикселей классифицируются как повышено эхогенные, а дистальные пиксели (нижние на УЗИ-картине) классифицируются как понижено-эхогенные (рис. 2).

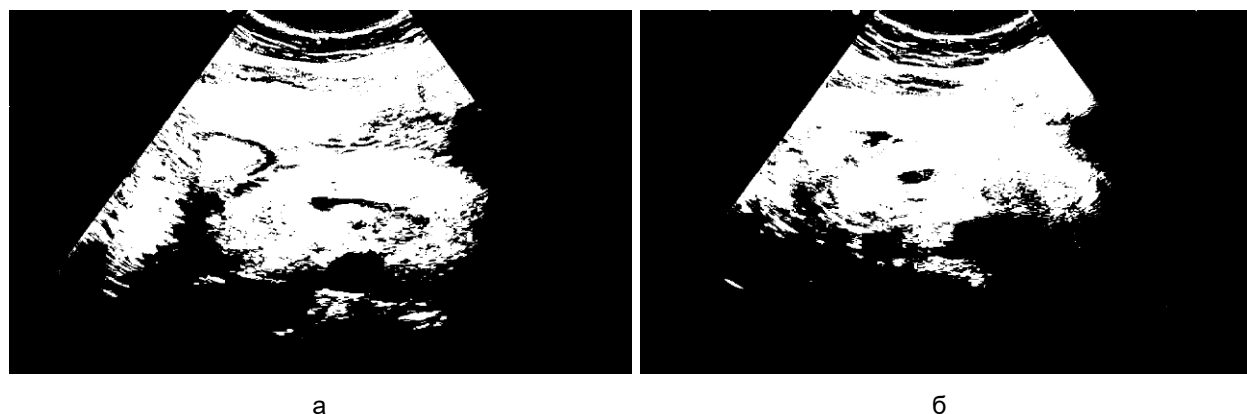


Рис. 2. Обработанные УЗИ-изображения ПЖ на основе пороговых методов соответственно:
 а – результат пороговой обработки УЗИ-изображения ПЖ, которое продемонстрировано на рис. 1, а; б – результат пороговой обработки УЗИ-изображения ПЖ, которое показано на рис.1, б

Fig. 2. Processed ultrasound images of the pancreas on the basis of threshold methods, respectively:
 а – the result of threshold processing of the pancreas image, which is shown in Fig. 1, а;
 б – the result of threshold processing of the pancreas image, which is shown in Fig. 1, б

На рисунке 2 продемонстрировано, что выбор порогового значения подбирался таким образом, чтобы различать проксимальный контур ПЖ. Так как ПЖ имеет среднюю эхогенность, то ткани, лежащие на большей глубине, чем ПЖ, будут иметь меньшую эхогенность. Изображения, представленные на рис. 1, б, получены с помощью аппарата HS60 Samsung Medison с использованием методов компенсации затухания сканирующего сигнала на глубине.

На этой основе возможно строить автоматизированную систему распознавания проксимального края контура ПЖ [11]. Так как дистальная часть контура ПЖ практически неотличима по яркости от других тканей, то для ее распознавания необходимо использовать другие методы [12]. Для автоматизированного

поиска пикселей с пониженной эхогенностью, например для поиска контуров вен и артерий на ультразвуковом снимке, а также для улучшения визуализации проксимальных тканей, необходимо компенсировать эффект затухания сканирующего сигнала в тканях. Для этого исследуется изображение, называемое как область видимости сканера (рис. 3, а). В области видимости сканера пиксели изображения задаются единицами, а вне области видимости – нулями. Расчет суммы яркостей пикселей S по строкам этого изображения реализуется по формуле

$$S(j) = \sum_{i=0}^{N-1} F_{i,j}^2, \quad (1)$$

где F – функция яркости пикселей исходного полутонного ультразвукового изображения; N – количество столбцов.

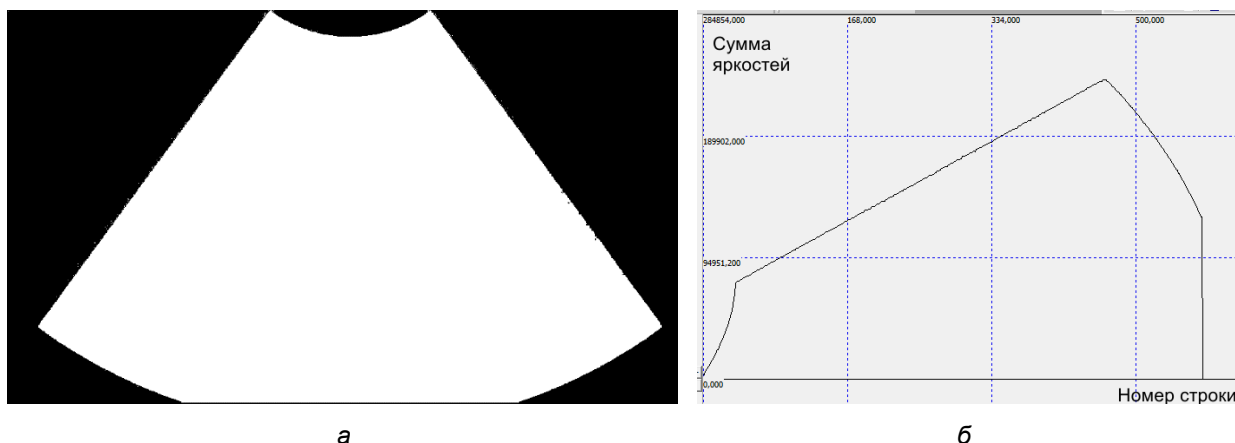


Рис. 3. Анализ изображения области видимости сканера:
 а – пример анализируемой области видимого сканера;
 б – график суммы яркости строк этого изображения

Fig. 3. Image analysis of the scanner's field of view:
 а – an example of the analyzed area of the visible scanner;
 б – a graph of the sum of the brightness of the lines of this image

Результат расчета приведен на рисунке 3, б. Кривую можно разделить на три сегмента: первый – показывает нелинейный быстрый подъем, который образуется округлой формой датчика сканера и занимает всего 7% от количества строк ультразвукового изображения данного сканера; второй – представляет линейный подъем, который образуется из-за расходящегося угла сканирования датчиков и занимает около 74% от количества строк; третий – демонстрирует практически линейный спад из-за полуокруглого окончания области видимости, который занимает оставшиеся 19% строк изображения используемого сканера.

Если бы в реальном изображении яркость пикселей была бы распределена примерно равномерно, то график суммы яркостей получался бы схожей формы (как на рис. 4, б). Рассчитанное распределение суммы яркостей по строкам реальных изображений ПЖ (рис. 1, а и 1, б),

приведено ниже (рис. 4). Анализ показывает, что распределение суммы яркостей по строкам напоминает модельный рисунок 3, б только примерно до половины, далее наблюдается затухание графика, связанное с поглощением сканирующего сигнала в глубинных тканях.

Поэтому с целью улучшения визуализации, а также для правильного распознавания степени экзогенности отдельного пикселя предлагается использовать нормализацию проксимальной части ультразвукового изображения F_n (например, в нижней трети снимка) согласно формуле

$$Fn_{i,j} = \frac{F_{i,j} S_m}{S_j}, \quad (2)$$

где S_j – сумма яркостей пикселей строки j ; S_m – сумма яркостей пикселей строки с индексом $j/2$.

Рассмотрим результат расчета нормализованного изображения по формуле (2) (рис. 5).

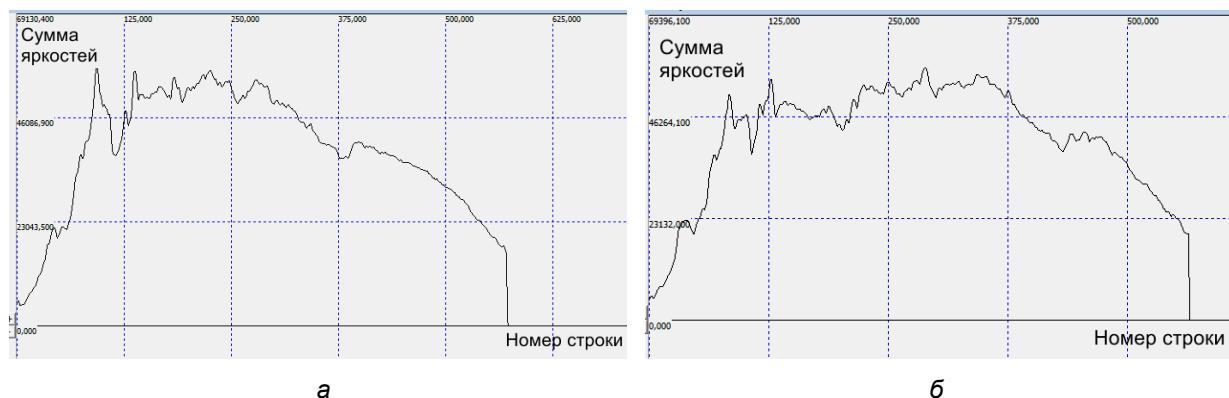


Рис. 4. Графики суммы яркости пикселей строк обработанных изображений соответственно:
 а – для изображения, представленного на рис. 2, а;
 б – для изображения, представленного на рис. 2, б

Fig. 4. Graphs of the sum of the pixel brightness of the rows of processed images, respectively:
 а – for the image shown in Fig. 2, а; б – for the image shown in Fig. 2, б

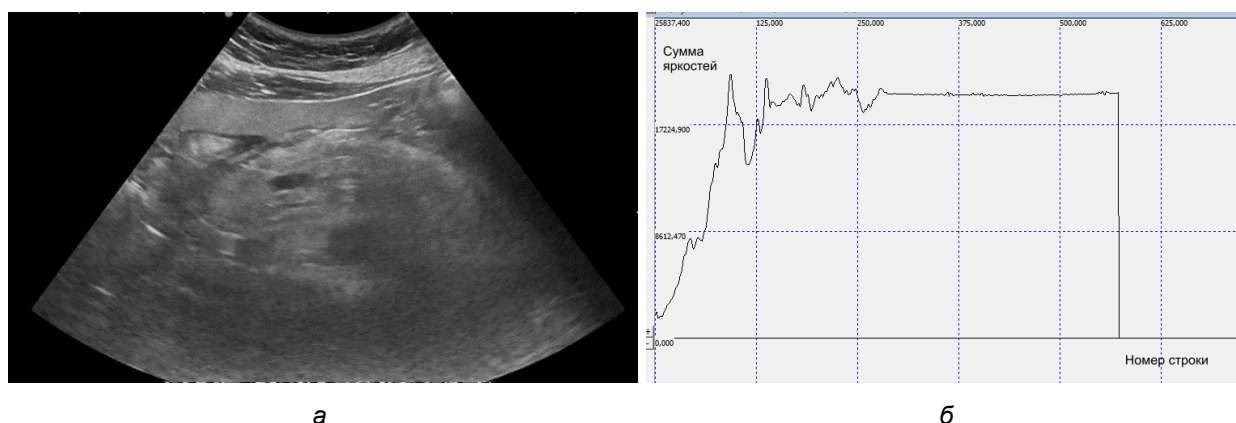


Рис. 5. Анализ нормализованного изображение ПЖ: а – изображение, построенное на основе нормализации яркости строк пикселей изображения, показанного на рис. 2, б; б – график суммы яркости пикселей строк построенного нормализованного изображения

Fig. 5. Analysis of the normalized image of the pancreas: а – is an image based on the normalization of the brightness of the rows of pixels of the image shown in Fig. 2, б; б – is a graph of the sum of the brightness of the pixels of the rows of the constructed normalized image

На ультразвуковых изображениях ПЖ имеет овальную или треугольную форму. Она расположена в верхнем отделе брюшной полости, позади желудка или печени и перед позвоночником. Контур ПЖ на ультразвуковых изображениях обычно бывает ровным и четким. Однако он может быть несколько волнистым, особенно в области головки ПЖ.

На ультразвуковых изображениях поджелудочная железа имеет неоднородную эхоструктуру. Она состоит из паренхимы, которая имеет эхогенность, близкую к эхогенности печени, и железистого вещества, которое имеет более низкую эхогенность.

На ультразвуковых изображениях ПЖ можно выделить следующие части:

– головка ПЖ – самая верхняя часть поджелудочной железы, расположенная в воротах селезенки;

– тело ПЖ – средняя часть ПЖ, расположенная между головкой и хвостом ПЖ;

– хвост ПЖ – самая нижняя часть ПЖ, расположенная в левом подреберье.

На ультразвуковых изображениях головка ПЖ обычно имеет более четкий контур, чем тело и хвост ПЖ. Это связано с тем, что головка окружена желчными протоками и сосудами, которые имеют более высокую эхогенность, чем паренхима ПЖ.

На ультразвуковых изображениях ПЖ можно также выделить следующие структуры:

– желчный проток – узкий канал, который проходит через головку ПЖ;

– воротной сосуд – крупный сосуд, который проходит через ворота ПЖ;

– селезеночная вена – крупный сосуд, который проходит вдоль тела ПЖ.

Контур ПЖ на ультразвуковых изображениях может быть изменен при различных патологических состояниях, таких как:

– острый панкреатит, который характеризует воспаление ПЖ. При остром панкреатите контур ПЖ может быть неровным, размытым или прерывистым;

– хронический панкреатит (ХП) – хроническое воспаление ПЖ. При ХП контур ПЖ может быть неровным, размытым или уплотненным;

– злокачественные опухоли ПЖ – могут вызывать деформацию контура ПЖ.

Изменение контура ПЖ на ультразвуковых изображениях является значи-

мым диагностическим признаком различных патологических состояний. Поэтому выделение контура ПЖ на ультразвуковых снимках представляет важный этап при проведении ультразвуковой диагностики этого органа. Контур здоровой ПЖ должен быть четким и ровным. При наличии патологических изменений контур ПЖ в большинстве случаев нарушен. Например, при панкреатите контур ПЖ может быть неровным, прерывистым или бугристым. При опухоли ПЖ контур органа может быть также нарушен.

Кроме того, размеры ПЖ, которые определяются по контуру, являются важными диагностическими параметрами и, собственно, очень часто являются целью всего ультразвукового исследования.

Для улучшения выделения контура ПЖ на ультразвуковых снимках используются различные методы, такие как:

– реализация более высокочастотных ультразвуковых волн;

– использование специальных режимов сканирования, таких как режим с цветовым доплеровским картированием;

– применение контрастных веществ.

Высокочастотные ультразвуковые волны обеспечивают более высокое разрешение изображения, что облегчает выделение контура ПЖ. Режим с цветовым доплеровским картированием позволяет визуализировать кровоток в ПЖ, что также способствует выделению контура органа на изображении.

Существует несколько стандартных положений точек сканирования, кото-

рые используются для визуализации ПЖ. Эти точки сканирования обеспечивают наилучшее выделение контура исследуемого органа.

Аортальная точка: эта точка сканирования находится на уровне аорты, в проекции на ПЖ.

Срединная точка: эта точка сканирования находится на срединной линии живота, в проекции на ПЖ.

Ретроренальная точка: эта точка сканирования находится в заднем отделе брюшной полости, в проекции на ПЖ.

При сканировании ПЖ в этих точках необходимо использовать различные углы сканирования для получения наиболее полного изображения ПЖ.

Как уже отмечалось, проксимальная (задняя) и дистальная (передняя) часть контура ПЖ находятся в существенно разных условиях сканирования: дистальная часть находится в зоне сильного сканирующего сигнала ближе к регистрирующим датчикам, тогда как

проксимальная часть находится в собственной тени и дальше от датчиков. В дистальной части стоит задача отделить ПЖ от печени или желудка, в то время как паренхима печени и ПЖ имеют практически одинаковую эхогенность. В проксимальной части необходимо отделить паренхиму ПЖ от хорошо различимых вен и артерий (селезеночная вена, аорта, нижняя полая вена).

Результаты и их обсуждение

В данной работе были использованы первые частоты преобразования Уолша [13], которые совпадают с вейвлетами Хаара и эффективно используются для распознавания объектов, контуров на изображениях лиц, пешеходов и т. п. [14]. Поэтому в предлагаемом методе акустическое УЗИ-изображение ПЖ и его контур декомпозируется на четыре части: левая, правая, дистальная (передняя) и проксимальная (задняя) части (рис. 6).

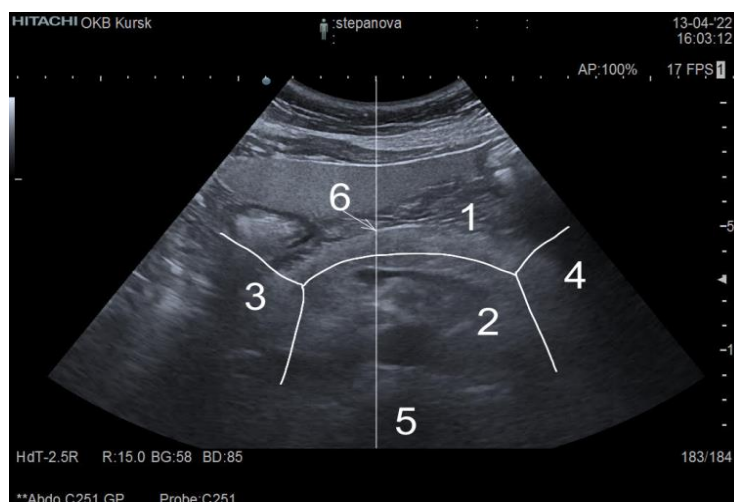


Рис. 6. Условное деление изображения поджелудочной железы: 1 – дистальная (передняя) часть; 2 – проксимальная (задняя) часть; 3 – левая часть; 4 – правая часть; 5 – срединная линия; 6 – реперная точка

Fig. 6. Conditional division of the image of the pancreas: 1 – distal (anterior) part; 2 – proximal (posterior) part; 3 – left part; 4 – right part; 5 – midline; 6 – reference point

По отношению к названиям «левая» и «правая» существует двусмысленность, так как снимок УЗИ является сечением с направлением взгляда от ног к голове, то по отношению к пациенту правые его части на изображении будут слева, а левые части – справа. Это вносит путаницу в терминологию. В связи с тем, что обрабатываются именно изображения ПЖ, полученные с экрана монитора, то в дальнейшем части слева на изображении будем называть левыми, а части справа – правыми.

После декомпозиции задачи поиска контура изображения ПЖ на четыре подзадачи устанавливается методика нахождения признаков автоматического обнаружения контура [15].

Установлено, что в передней дистальной части 1, в месте соприкосновения передней поверхности ПЖ с висцеральной поверхностью доли печени, часто детектируется гиперэхогенная капсула печени, которая помогает установить границу. При этом выявлено, что искомый контур имеет в данной части горизонтальный характер. Поэтому для автоматизированной классификации целесообразно использовать первичные признаки, построенные с помощью горизонтального вейвлета Хаара (или на частоте Уолша с координатами 1,0) [16].

Для задней проксимальной части поиск контура усложняется наличием закругления головки ПЖ, где характер границы не такой строго горизонтальный. В этом случае придется

комбинировать информацию как с горизонтальных вейвлетов, так и с вертикальных и диагональных [17]. При этом дальняя граница ПЖ в этой части соприкасается с хорошо различимыми венами и артериями, что позволяет в таких местах определять контур с меньшими ошибками и с большей уверенностью [18].

В левой и правой части контур ПЖ, как правило, выглядит достаточно размытым, но имеет вертикальный характер. Эта особенность дает возможность применения детектирования границ с помощью вертикальных вейвлетов Хаара (или с помощью частоты Уолша с координатами 0,1).

Так как контур железы должен быть непрерывным и не иметь явных разрывов, то перед процедурой выделения контура для фильтрации помех рекомендуется производить сглаживание (низкочастотную фильтрацию) изображения. На рисунке 7 приведены результаты фильтрации разными фильтрами рисунка 1, а.

Следует учитывать тот факт, что фильтрация изображений с помощью фильтров высоких порядков позволяет убрать многочисленные помехи, что приводит к уменьшению количества ошибок распознавания контура. Вместе с тем применение фильтров высоких порядков может привести к сглаживанию неровного патологического контура и способствует уменьшению чувствительности обнаружения патологий.

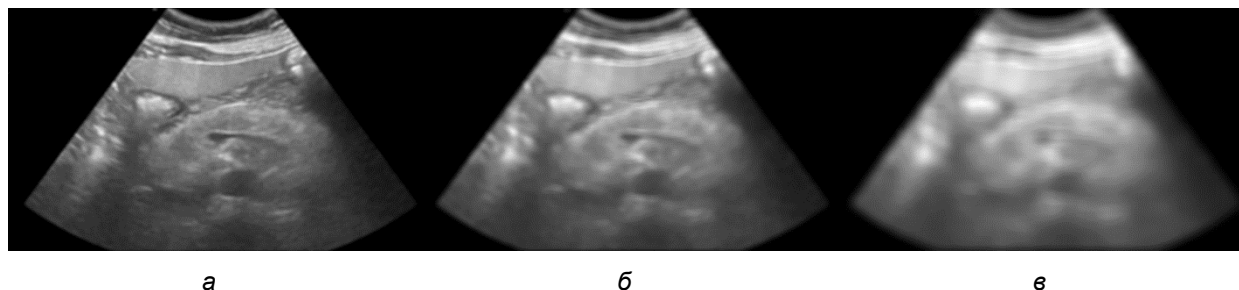


Рис. 7. Результаты фильтрации изображения, представленного на рисунке 2а:
а – применение фильтра с ядром 8х8; б – использование фильтра с ядром 16х16;
в – реализация фильтра с ядром 32х32

Fig. 7. The results of filtering the image shown in Figure 2а: а – the use of a filter with a core of 8х8; б – the use of a filter with a core of 16х16; в – the implementation of a filter with a core of 32х32

В качестве детектора края ПЖ используем модифицированный вейвлет Хаара [19], как описано в [20] или в [21]. Результат работы программы,

реализующей алгоритм построения контура границы ПЖ для левой и правой части ПЖ, основанный на вышеприведенных положениях, приведен ниже (рис. 8).

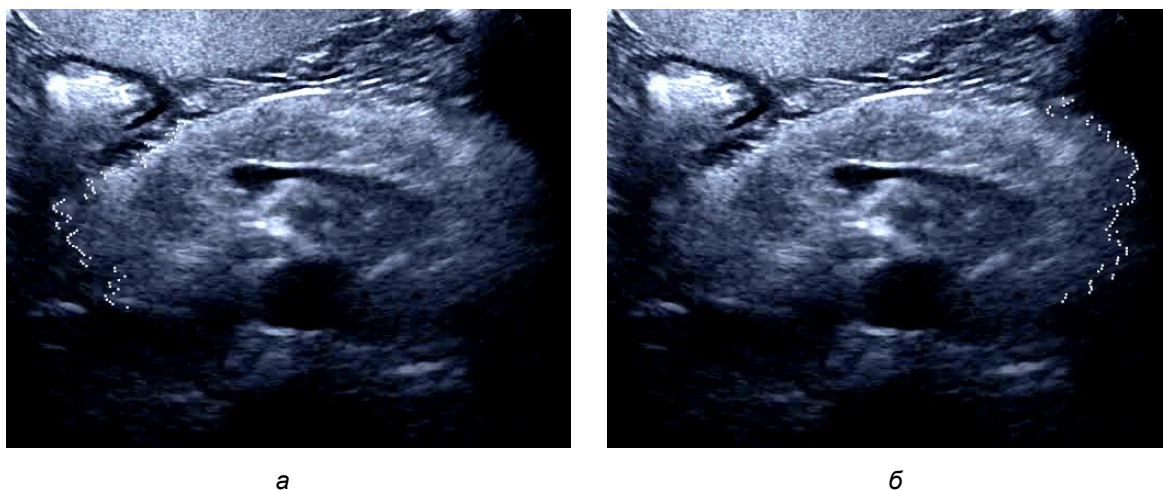


Рис. 8. Результат применения разработанного алгоритма построения контура границы поджелудочной железы: а – для левой части; б – для правой части изображения

Fig. 8. The result of the application of the developed algorithm for constructing the contour of the pancreatic border: а – for the left part; б – for the right part of the image

После выделения контура границы ПЖ определяются дескрипторы, необходимые для классификации анализируемого изображения [22]. При классификации контура границы объекта, представленного на полутоновом изображении, использовалось преобразование Фурье.

Контур границы сегмента описывается двумя непрерывными параметрическими кривыми $x(p)$ и $y(p)$, которые объединяются в одну кривую с помощью комплексной функции. В дискретной форме уравнение кривой запишется

$$\dot{z}_n = x_n + jy_n, \quad (3)$$

где n – номер точки на кривой; j – мнимая единица.

Это кривая является циклической с периодом L , и ее можно представить спектром Фурье, воспользовавшись дискретным преобразованием Фурье:

$$\dot{Z}_\ell = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} \dot{z}_n \exp\left(-j \frac{2\pi n \ell}{L}\right), \quad (4)$$

где L – число отсчетов на кривой (6); n – номер точки на кривой (3); ℓ – номер спектральной составляющей кривой (3), определяемой по формуле (4).

Так как разлагаемая на спектральные составляющие функция комплексная, то каждому номеру отсчета n , начиная с первого, соответствует две частоты $-\ell$ и ℓ , которые позволяют сформировать эллипс. Эллипсы более высокого порядка добавляют все больше и больше деталей к граничной кривой. Примеры спектров Фурье контура границы ПЖ, полученные в декартовой системе координат, приведены ниже (рис. 9).

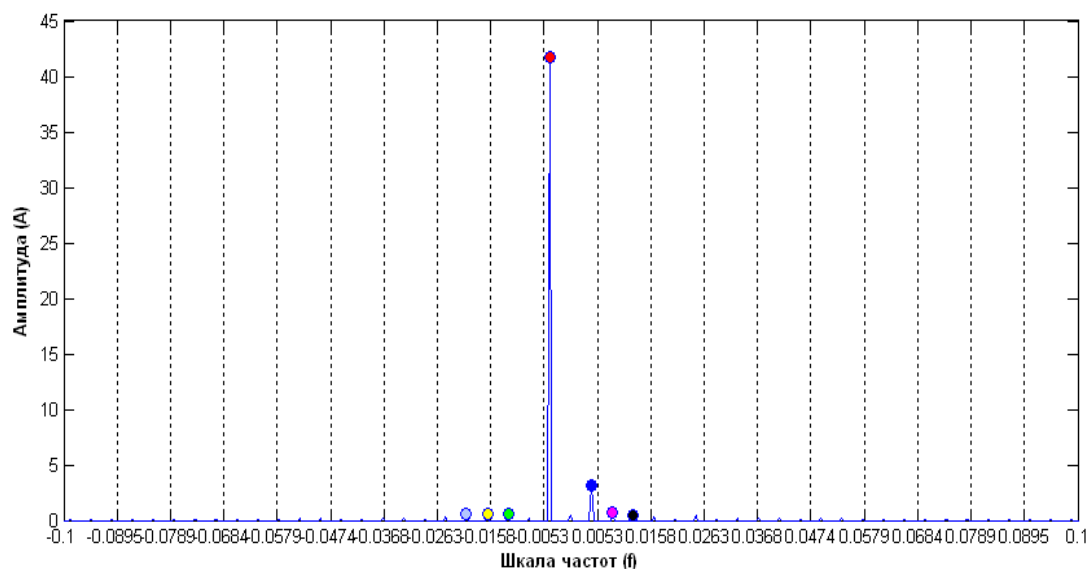


Рис. 9. Амплитудные спектры Фурье, полученные в декартовых координатах с подавлением нулевой гармоники (отстройки от «сдвига»)

Fig. 9. Fourier amplitude spectra obtained in Cartesian coordinates with suppression of the zero harmonic (detuning from the “shift”)

Обратное преобразование Фурье, примененное к этим коэффициентам, позволяет восстановить границу (3):

$$\dot{z}(n) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \dot{Z}(\ell) \cdot \exp(j 2\pi \ell n / N), \quad (5)$$

для $n = \overline{0, N-1}$.

Используя преобразование (5), устанавливаются наиболее релевантные

спектральные коэффициенты, а также их чувствительность к различным преобразованиям. Анализ показал, что нечувствительным к преобразованию типа «сдвиг» / «поворот» является только модуль комплексных коэффициентов (4). Для обеспечения инвариантности дескрипторов к этим преобразованиям сегмент границы ПЖ вписывается в

прямоугольник, и центр описанного прямоугольника переносится в начало координат.

Процесс классификации начинается с ввода координат соответствующей границы контура сегмента «изображения» (рис. 8). Цель классификации – отнести «изображение» к классу «хронический панкреатит» (ХП) или «без патологии» (БП) (по результатам анализа комплексного числового ряда, элементами которого являются координаты границ ПЖ). Классификатор строим в предположении, что имеется только два разделяемых класса – ХП и БП. Граница сегмента формируется путем последовательного просмотра координат пикселей границы ПЖ, что позволяет обеспечить практически равномерный шаг дискретизации по обеим осям координат [23].

Принцип формирования дескрипторов основан на том, что не все спектральные составляющие, входящие в множество $A = \{\dot{Z}(\ell)\}$, $\ell = \overline{1, L}$, равнозначны по информативности. Поэтому формирователь информативных признаков осуществляет переход от множества к множеству $B = \{\dot{Z}(\ell_1)\}$, $\ell_1 \in L_1$, причем $b_i \in A \quad \forall i \in L_1$.

Задача формирователя информативных признаков состоит в определении множества, формируемого в результате

исключения из спектра элементов с номерами, попавшими во множество:

$$\ell \in L/L_1. \quad (5)$$

Блок принятия решений реализован на основе реализации нейронной сети (НС) прямого распространения. НС имеет два выхода, которые соответствуют двум разделяемым классам – ХП и БП. На выходах НС присутствуют числа в диапазоне от нуля до единицы, которые интерпретируются как коэффициенты уверенности в принадлежности анализируемого контура к вышеперечисленным классам¹.

Выводы

На основе данного метода разработана автоматизированная система для классификации снимков УЗИ ПЖ. Автоматизированная система содержит модули для выполнения процедур распознавания и классификации объектов на изображениях, полученных с помощью УЗИ ПЖ, а также базу изображений УЗИ ПЖ без патологических изменений и с патологическими изменениями с установленными врачами диагнозами «панкреатит». Также представлено разработанное программное обеспечение для процедур обучения нейросетевых классификаторов и для выполнения этапов контурного спектрального анализа.

¹ Томакова Р. А. Гибридные методы и алгоритмы для интеллектуальных систем классификации сложноструктурируемых

изображений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2013. 42 с.

Для проведения экспериментальных исследований применялась видеопоследовательности УЗИ ПЖ, предоставленные врачом-эндоскопистом. Целью экспериментальных исследований был автоматизированный анализ показателей качества классификации классификаторов изображений с сегментами класса «хронический панкреатит» (ХП) и «без

патологии» (БП). При этом была сформирована обучающая выборка анализируемых изображений из 300 вариантов. Каждый анализируемый класс содержал 150 примеров изображений. Рассчитан показатель качества «чувствительность» классификации, который по двум исследуемым классам составил 85,7%, а показатель «специфичность» – 87,1%.

Список литературы

1. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа Зар До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. Т. 43, № 4, Ч. 2. С. 44–50.
2. Дабагов А. Р., Малютина И. А., Кондрашов Д. С. Автоматизированная система для классификации заболеваний молочной железы по рентгеновским маммографическим снимкам // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. Т. 4, № 48. С. 10–24.
3. Автоматизированная система классификации снимков УЗИ поджелудочной железы на основе метода посегментного спектрального анализа / С. А. Филист, Д. С. Кондрашов, А. Ю. Сухомлинов, Л. В. Шульга, Ч. Х. Аль-Дарраджи, В. А. Белозёров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11, № 1. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.021>.
4. Автоматизированная система классификации рентгенограмм молочной железы / А. Р. Дабагов, В. А. Горбунов, С. А. Филист, И. А. Малютина, Д. С. Кондрашов // Медицинская техника. 2019. Т. 6, № 318. С. 39–41.
5. Алгоритмы метаанализа эффективности диагностических и терапевтических решений на основе мониторинга суррогатных маркеров, получаемых по результатам анализа сложноструктурируемых изображений / А. Г. Курочкин, А. А. Кузьмин, Е. А. Старцев, С. А. Филист // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 4 (21). С. 41–55.
6. Махов В. М. Этиологические аспекты диагностики и лечение хронического панкреатита // Российский медицинский журнал. 2006. № 3. С. 3–8.
7. The role of endoscopy in patients with chronic pancreatitis / D. G. Adler, D. Lichtenstein, T. H. Baron [et al.] // Gastrointest Endosc. 2006. Vol. 63, N 7. P. 933–937.

8. Дусмухамедова З. Т., Фазилов А. А., Абзалова М. Я. Характерные особенности ультразвуковой картины хронического панкреатита // Молодой учёный. 2017. Т. 10, № 144. С. 133–136.
9. Two-Dimensional Walsh Spectral Transform in Problems of Automated Analysis of Ultrasound Images / A. Kuzmin, H. C. Al-Darraj, A. Sukhomlinov, S. Filist // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2023. Communications in Computer and Information Science / A. G. Kravets, M. V. Shcherbakov, P. P. Groumpos [et. al.]. Cham: Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44615-3_32.
10. Томакова Р. А., Филист С. А., Горбатенко С. А. Анализ гистологических изображений посредством морфологических операторов, синтезированных на основе преобразования Фурье и нейросетевого моделирования // Биотехносфера. 2010. № 3(9). С. 54–60.
11. Малютина И. А., Кузьмин А. А., Шаталова О. В. Методы и алгоритмы анализа рентгенограмм грудной клетки, использующие локальные окна в задачах обнаружения патологий // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. Т. 3, № 39. С. 131–138.
12. Viola P., Jones M. Robust real-time face detection // Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001. Vancouver, Canada: BC, 2001. P. 747. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2001.937709>.
13. Классификация медицинских изображений на основе анализа спектров локальных окон / С. А. Филист, Д. С. Кондрашов, А. А. Кузьмин, А. Ю. Сухомлинов, Ч. Х. Аль-Дарраджи // Медицинская техника. 2023. № 5. С. 18–20.
14. Papageorgiou C., Oren M., Poggio T. A general framework for object detection // Sixth International Conference on Computer Vision. Bombay, India, 1998. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710772>.
15. Многослойные морфологические операторы для сегментации сложноструктурируемых растровых полутоновых изображений / С. А. Филист, А. Р. Дабагов, Р. А. Томакова, И. А. Малютина, Д. С. Кондрашов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3. С. 44–63.
16. Томакова Р. А., Филист С. А. Метод обработки и анализа сложноструктурируемых изображений на основе встроенных функций среды MATLAB // Вестник Читинского государственного университета. 2012. Т. 1, № 80. С. 3–9.
17. Томакова Р. А., Филист С. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 43–49.

18. Томакова Р. А., Филист С. А., Руденко В. В. Нечеткая сетевая модель интеллектуального морфологического оператора для формирования границ сегментов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2011. Т. 1, № 96. С. 188–195.
19. Pedestrian detection using wavelet templates / M. Oren, C. Papageorgiou, P. Sinha, E. Osuna, T. Poggio // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan, PR, USA, 1997. P. 193–199.
20. Freund Y., Schapire R. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting // Journal of computer and system sciences. 1997. N 55. P. 119–139.
21. Polikar R. Ensemble based systems in decision making // IEEE Circuit Syst. Mag. 2006. N 6. P. 21–45.
22. Метод каскадной сегментации рентгенограмм молочной железы / С. А. Филист, А. Р. Дабагов, Р. А. Томакова, И. А. Малютина, Д. С. Кондрашов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1. С. 49–61.
23. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макро-слоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.

References

1. Filist S. A., Tomakova R. A., Yaa Zar Do. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskih dannyh [Universal network models for classification tasks of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, vol. 43, no. 4, pt. 2, pp. 44–50.
2. Dabagov A. R., Malyutina I. A., Kondrashov D. S. Avtomatizirovannaya sistema dlya klassifikatsii zabolevanij molochnoj zhelezy po rentgenovskim mammograficheskim snimkam [Automated system for the classification of breast diseases by X-ray mammographic images]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2019, vol. 4, no. 48, pp. 10–24.
3. Filist S. A., Kondrashov D. S., Sukhomlinov A. Yu., Shulga L. V., Al-Darraj Ch. H., Belozarov V. A. Avtomatizirovannaya sistema klassifikatsii snimkov UZI podzheludochnoj zhelezy na osnove metoda posegmentnogo spektral'nogo analiza [An automated system for classifying ultrasound images of the pancreas based on the segment-by-segment spectral analysis method]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*, 2023, vol. 11, no. 1. [https://doi.org/ 10.26102/2310-6018/2023.40.1.021](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.021)
4. Dabagov A. R., Gorbunov V. A., Filist S. A., Malyutina I. A., Kondrashov D. S. Avtomatizirovannaya sistema klassifikatsii rentgenogramm molochnoj zhelezy [Automated

classification system of breast radiographs]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2019, vol. 6, no. 318, pp. 39–41.

5. Kurochkin A. G., Kuzmin A. A., Startsev E. A., Filist S. A. Algoritmy metaanaliza effektivnosti diagnosticheskikh i terapevticheskikh reshenij na osnove monitoringa surrogatnykh markerov, poluchaemykh po rezul'ta-tam analiza slozhnostrukturiruemyykh izobrazhenij [Algorithms for meta-analysis of the effectiveness of diagnostic and therapeutic decisions based on monitoring of surrogate markers obtained from the analysis of complexly structured images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 4 (21), pp. 41–55.

6. Makhov V. M. Etiologicheskie aspekty diagnostiki i lechenie hronicheskogo pankreatita [Etiological aspects of diagnosis and treatment of chronic pancreatitis]. *Rossiyskij medicinskij zhurnal = Russian Medical Journal*, 2006, no. 3, pp. 3–8.

7. Adler D. G., Lichtenstein D., Baron T. H., eds. The role of endoscopy in patients with chronic pancreatitis. *Gastrointest Endosc*, 2006, vol. 63, no. 7, p. 933–937.

8. Dismukhamedova Z. T., Fazilov A. A., Abzalova M. Ya. Harakternye osobennosti ul'trazvukovoy kartiny hronicheskogo pankreatita [Characteristic especially the ultrasound picture of chronic pancreatitis]. *Molodoj uchyonyj = Young Scientist*, 2017, vol. 10, no. 144, pp. 133–136.

9. Kuzmin A., Al-Darraj H. C., Sukhomlinov A., Filist S. Two-Dimensional Walsh Spectral Transform in Problems of Automated Analysis of Ultrasound Images. Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2023. Communications in Computer and Information Science; A. G. Kravets, M. V. Shcherbakov, P. P. Groumpos, eds. Cham, Springer Publ., 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44615-3_32

10. Tomakova R. A., Filist S. A., Gorbatenko S. A. Analiz gistologicheskikh izobrazhenij posredstvom morfologicheskikh operatorov, sintezirovannykh na osnove preobrazovaniya Fur'e i nejrosetevogo modelirovaniya [Analysis of histological images by means of morphological operators synthesized on the basis of Fourier transform and neural network modeling]. *Bio-tekhnosfera = Biotechnosphere*, 2010, no. 3(9), pp. 54–60.

11. Malyutina I. A., Kuzmin A. A., Shatalova O. V. Metody i algoritmy analiza rentgenogrammi grudnoj kletki, ispol'zuyushchie lokal'nye okna v zadachah obnaruzheniya patologij [Methods and algorithms of chest X-ray analysis using local windows in pathology detection tasks]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2017, vol. 3, no. 39, pp. 131–138.

12. Viola P., Jones M. Robust real-time face detection. Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001. Vancouver, Canada, BC Publ., 2001, p. 747. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2001.937709>

13. Filist S. A., Kondrashov D. S., Kuzmin A. A., Sukhomlinov A. Yu., Al-Darraj Ch. Kh. Klassifikaciya medicinskih izobrazhenij na osnove analiza spektrov lokal'nyh okon [Classification of medical images based on the analysis of the spectra of horizontal windows]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2023, no. 5, pp. 18–20.
14. Papageorgiou C., Oren M., Poggio T. A general framework for object detection. Sixth International Conference on Computer Vision. Bombay, India, 1998. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710772>
15. Filist S. A., Dabagov A. R., Tomakova R. A., Malyutina I. A., Kondrashov D. S. Mnogoslojnye morfologicheskie operatory dlya segmentacii slozhnostruk-turiruemyh rastrovyyh polutonovyh izobrazhenij [Multilayer morphological operators for segmentation of complexly structured raster halftone images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priboro-stroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engi-neering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 44–63.
16. Tomakova R. A., Filist S. A. Metod obrabotki i analiza slozhnostrukturiruemyh izo-brazhenij na osnove vstroennyh funkcij sredy MATLAB [Method of processing and analysis of complex structured images based on the built-in functions of the MATLAB environment]. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Chita State University*, 2012, vol. 1, no. 80, pp. 3–9.
17. Tomakova R. A., Filist S. A., Nasser A. A. Nechetkie nejrosetevye tekhnologii dlya vydeleniya segmentov s patologicheskimi obrazovaniyami i morfologicheskimi strukturami na medicinskih izobrazheniyah [Fuzzy neural network technologies for isolating segments with pathological formations and morphological structures in medical images]. *Biomedicin-skaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 43–49.
18. Tomakova R. A., Filist S. A., Rudenko V. V. Nechetkaya setevaya model' intel-lektual'nogo morfologicheskogo operatora dlya formirovaniya granic segmentov [Fuzzy net-work model of an intellectual morphological operator for the formation of segment bounda-ries]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific Bulletin of Belgorod State University*, 2011, vol. 1, no. 96, pp. 188–195.
19. Oren M., Papageorgiou C., Sinha P., Osuna E., Poggio T. Pedestrian detection using wavelet templates. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan, PR, USA, 1997, pp. 193–199.
20. Freund Y., Schapire R. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, 1997, no. 55, pp. 119–139.
21. Polikar R. Ensemble based systems in decision making. *IEEE Circuit Syst. Mag.*, 2006, no. 6, pp. 21–45.

22. Filist S. A., Dabagov A. R., Tomakova R. A., Malyutina I. A., Kondrashov D. S. Metod kaskadnoj segmentacii rentgenogramm molochnoj zhelezy [The method of cascade segmentation of breast radiographs]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, infor-matika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 49–61.

23. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya nejronnaya set' s makrosloyami dlya medicinskih prilozhenij [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Nejrokompyutery. Razrabotka i primenenie = Neurocomputers. Development and Application*, 2014, no. 6, pp. 35–39.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьмин Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ku3bmin@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7980-0673

Сухомлинов Артем Юрьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ar.sykhomlinov@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6552-2558

Аль-Дарраджи Часиб Хасан, сотрудник Университета Дияла, г. Баакубу, Республика Ирак, e-mail: chasibaboody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7444-0039

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

Alexander A. Kuzmin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ku3bmin@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7980-0673

Artem Yu. Sukhomlinov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ar.sykhomlinov@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6552-2558

Al-Darraji Chasib Hasan, Employee of Diyala University, Baqubah, Republic of Iraq, e-mail: chasibaboody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7444-0039

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

Долженков Сергей Дмитриевич, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры урологии, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sfilist@gmail.com

Sergey D. Dolzhenkov, Candidate of Sciences (Medical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urology, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kursk, Russian Federation, e-mail: sfilist@gmail.com

Шульга Леонид Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sfilist@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6793-7362

Leonid V. Shulga, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Professor of the Department of Occupational and Environmental Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sfilist@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6793-7362

Система учета и мониторинга расходов электроэнергии на основе геопространственных данных расположения потребителей

Т. И. Лапина¹ ✉, В. С. Малыхина¹, Р. А. Крупчатников²

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

² Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова
ул. К. Маркса, д. 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке системы учета и мониторинга расходов электроэнергии с визуализацией геопространственных данных расположения потребителей, которая обеспечивает технический учет и анализ структуры потребления электроэнергии, оценку расхода электроэнергии для задач планирования объемов производства и закупки электроэнергии у производящих компаний на основе статистики расходов потребителей, профилактику потерь, связанных с несанкционированным отбором электроэнергии.

Методы. При создании разработки проекта и программной реализации системы мониторинга и контроля расходов электроэнергии использованы методы системного анализа, методы проектирования программных средств информационных систем, унифицированный язык объектно-ориентированного моделирования Unified Modeling Language (UML), СУБД SQLServer, среда разработки Microsoft VisualStudioCode (VS Code.)

Результаты. В ходе выполнения проекта разработано и реализовано программное обеспечение системы мониторинга и контроля расходов электроэнергии с визуализацией геопространственных данных расположения потребителей.

Проект реализован, протестирован и внедрен в деятельность АО «АтомЭнергоСбыт» при планировании и учете поставок электроэнергии потребителям.

Результаты тестирования показали, что программная система полностью удовлетворяет функциональным требованиям, готова к использованию и была продемонстрирована в выставочном центре «Коренная ярмарка».

Заключение. Разработана система учета данных расхода энергоресурсов с визуализацией территориального расположения потребителей с целью контроля расхода и оплат. Разработанная система позволит решить проблему задержки получения показаний приборов учета в системе сбора данных. Визуализация данных потребления энергоресурсов по объектам и их территориальному расположению с привязанными лицевыми счетами, счетчиками и объемами потребления позволит оперативно выполнять контроль объемов поставок, потребителей энергоресурсов, наличие оплаты, что позволит сократить непроизводительные потери и несанкционированные подключения.

Для компании АО «АтомЭнергоСбыт» оперативная визуализация данных потребителей позволяет выполнить анализ охвата потребителей по территориальному признаку и планирование новых подключений.

Ключевые слова: система мониторинга; контроль расходов электроэнергии; визуализация; геопространственные данные расположения потребителей.

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

Для цитирования: Лапина Т. И., Малихина В. С., Крупчатников Р. А. Система учета и мониторинга расходов электроэнергии на основе геопространственных данных расположения потребителей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 88–103. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-88-103>.

Поступила в редакцию 20.01.2024

Подписана в печать 19.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Accounting and Monitoring System of Electricity Expenditures Based on Geospatial Data Consumers Location

Tatyana I. Lapina¹ ✉, Victoria S. Malykhina, Roman A. Krupchatnikov

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

² Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 Karl Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is considers the development and implementation of a system of accounting and monitoring of electricity costs with visualization of geospatial location data by consumers, which provides technical accounting and analysis of the structure of electricity consumption, estimation of electricity consumption for the tasks of planning production volumes and purchasing electricity from producing companies based on consumer expenditure statistics, prevention of losses associated with unauthorized electricity extraction.

Methods. When creating a project and software implementation of a system for monitoring and controlling energy consumption, methods of system analysis, methods of designing software for information systems, a unified object-oriented modeling language Unified Modeling Language (UML), DBMS SQLServer, development environment Microsoft Visual Studio Code (VS Code.) were used.

Results. During the project, software for a monitoring and control system for electricity consumption with visualization of geospatial data on the location of consumers was developed and implemented.

The project was implemented, tested and introduced into the activities of JSC AtomEnergoSbyt when planning and accounting for electricity supplies to consumers.

The testing results showed that the software system fully satisfies the functional requirements, is ready for use and was demonstrated at the exhibition center.

Conclusion. A system for recording energy consumption data with visualization of the territorial location of consumers has been developed in order to control consumption and payments. The developed system will solve the problem of delay in receiving readings from metering devices in the data collection system. Visualization of energy resource consumption data by objects and their territorial location with linked personal accounts, meters and consumption volumes will allow you to quickly control the volume of supplies and energy consumers. availability of payment, which will reduce unproductive losses and unauthorized connections.

For the company JSC Atomenergobyty, operational visualization of consumer data makes it possible to analyze the coverage of consumers by territorial basis and plan new connections.

Keywords: monitoring system; control of electricity consumption; visualization; geospatial data of consumer location.

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

For citation: Lapina T. I., Malykhina V. S., Krupchatnikov R. A. Accounting and Monitoring System of Electricity Expenditures Based on Geospatial Data Consumers Location. *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(1): 88–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-88-103>.

Received 20.01.2024

Accepted 19.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

В настоящее время повышение энергоэффективности экономики является одним из приоритетных направлений государственной политики в Российской Федерации, которое охватывает различные сферы деятельности, в том числе и электроэнергетику. Решение задач обеспечения энергоэффективности в области электроэнергетики связано с решением проблем не столько производящих предприятия, сколько энергосбытовых организаций [1].

Энергосбытовая компания в электроэнергетике – коммерческая организация независимо от организационно-правовой формы, осуществляющая продажу произведенной или купленной электрической энергии с целью обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей [2].

Как коммерческие организации энергосбытовые компании обязаны вести учет и анализ потребностей потребителей электроэнергии, планирования производства или закупки требуемых объемов у производящих компаний и достоверный учет расхода энергоресурсов,

что должно обеспечить безубыточную работу и получение прибыли от продажи электроэнергии.

Однако в настоящее время возникает противоречие. С одной стороны, активная застройка городских территорий, создание новых предприятий – все это ведет к росту числа потребителей, резкому увеличению объемов потребления электроэнергии, увеличению нагрузок на подстанции (ТП) и линии электропередач (ЛЭП), что, в свою очередь, должно способствовать и росту эффективности деятельности энергосбытовых компаний [3].

С другой – резкий рост потребления энергоресурсов ведет к массовому несанкционированному отбору электроэнергии, растет и количество неучтенных (несанкционированных) потребителей. Так, по энергосистеме допустимый уровень потерь составляет 9–10%, по распределительным сетям удовлетворительный уровень потерь – 4–4,5% и максимально допустимый – 10% [4].

По энергосистемам России фактические потери имеют величину от 6,7% до 33,6%, а в распределительных сетях

потери доходят до 40–50% от электроэнергии, поступившей в сеть [5].

Все это требует разработки мер по обеспечению учета и контроля за потреблением электроэнергии для обеспечения энергоэффективности технологических процессов учета и распределения электроэнергии.

Сокращение и профилактика потерь электроэнергии в распределительных компаниях в первую очередь определяются методами сбора и обработки информации, достоверностью учетных данных, средствами обнаружения небалансов оперативностью принятия решений при планировании объемов потребления и расхода электроэнергии [6].

Коммерческий учет – процесс измерения объемов электрической энергии произведенной и потребленной в соответствующих точках поставки.

Формализации и автоматизации технологического процесса планирования, учета и контроля распределения электроэнергии позволят внести необходимые дополнения для обеспечения контроля энергоресурсов, наладить оперативное реагирование на нештатные ситуации, разработать методику профилактики потерь, связанных с несанкционированным отбором электроэнергии, разработать и внедрить экономически эффективную систему контроля и учета электроэнергии [7].

Кроме того, для электроэнергетических распределительных компаний характерно расположение потребителей на больших территориях. Для оперативного

реагирования и принятия решений требуется визуализация объектов – потребителей электроэнергии. Конкретное расположение сосредоточенных и распределенных объектов потребления на местности представляет интерес не только для выполнения оценки объемов расхода и планирования объемов закупки, но и также является значимым для решения целого ряда задач управления [8].

Геоинформационные технологии предоставляют возможность выполнить информационное моделирование расположения потребителей, зонирование территорий, анализировать и прогнозировать экстремальные ситуации в соответствии с геоданными потребителей [9].

Таким образом, автоматизированное построение на плане местности зон по различным критериям, с визуализацией потребителей с привязанными к ним лицевыми счетами, счетчиками и их данными является актуальным направлением автоматизации управления энергосбытовыми компаниями.

Материалы и методы

В рамках данной статьи рассмотрен подход к реализации проекта разработки системы учета и мониторинга расходов электроэнергии с визуализацией геопространственных данных территориального расположения потребителей.

Разработка автоматизированной системы учета поставок электроэнергии выполнена на основе анализа деятельности энергосбытовой компании АО

«АтомЭнергоСбыт» при обслуживании потребителей.

Организация может получать данные разными способами: от потребителей с помощью мобильного приложения на сайте компании (через личный кабинет); используя электронную почту

компании; при оплате в центре обслуживания населения; с использованием автоматических средств коммерческого учета электроэнергии.

Рассмотрим схему сбора показаний с приборов учета (рис. 1).



Рис. 1. Способы сбора показаний с приборов учета

Fig. 1. Methods for collecting readings from metering devices

Собранные показания попадают в программный комплекс для автоматического учета электроэнергии, который обрабатывает полученные данные показаний приборов учета; рассчитывает объем и стоимость отпущенной электроэнергии; ведет учет оплат потребителей; формирует квитанции для оплаты и отчеты о расходе электроэнергии [10].

Для того чтобы оперативно отследить исправность работы приборов, выявить незаконное присоединение к

энергосетям, обнаружить утечку энергии и перерасход, устанавливаются «умные приборы учета». Главным отличием этих устройств является формирование измерительных импульсов на основе величины проходящего через них тока. Это позволяет с высокой точностью определить, сколько электричества было израсходовано. При потере связи с системой данные о потреблении электроэнергии сохраняются как на самих приборах учета, так и в устройствах сбора и

передачи данных и могут быть переданы после восстановления связи [11].

Таким образом, «умные счетчики» производят измерение объемов потребляемого электричества и передают

полученную информацию по каналам передачи на сервер сборки и обработки информации системе учета.

Рассмотрим схему передачи данных в систему учета (рис. 2).



Рис. 2. Схема передачи данных в систему учета

Fig. 2. Scheme of data transfer to the accounting system

В АО «АтомЭнергоСбыте» в качестве источника данных используют технические средства автоматизированных систем учета и контроля электроэнергии АСКУЭ «Пирамида» и АСКУЭ «Лартех» [12].

В схеме передачи данных в систему учета АСД – это дополнительный программой модуль, позволяющий орга-

низовать отдельную интегрированную базу данных приборов учета и разграничить транспортный уровень и расчетные модули комплекса. В АСД в качестве источников данных могут выступать как системы, имеющие свой протокол, так и источники с прямым обращением к базам данным или файлам [13].

С помощью специализированного программного комплекса «Стек» выполняется учет и обработка данных приборов учета, производится начисление платы за услуги энергоснабжения и расчет потерь.

Анализ организации сбора данных в АО «АтомЭнергоСбыте» позволил разработать модели проекта системы учета и мониторинга расходов электроэнергии

с возможностью визуализации геопространственных данных потребителей [14].

На рисунке 3 приведена диаграмма вариантов использования системы пользователями (Use case diagram) в процессе учета расхода электроэнергии, определяющая функции проектируемой системы [15].

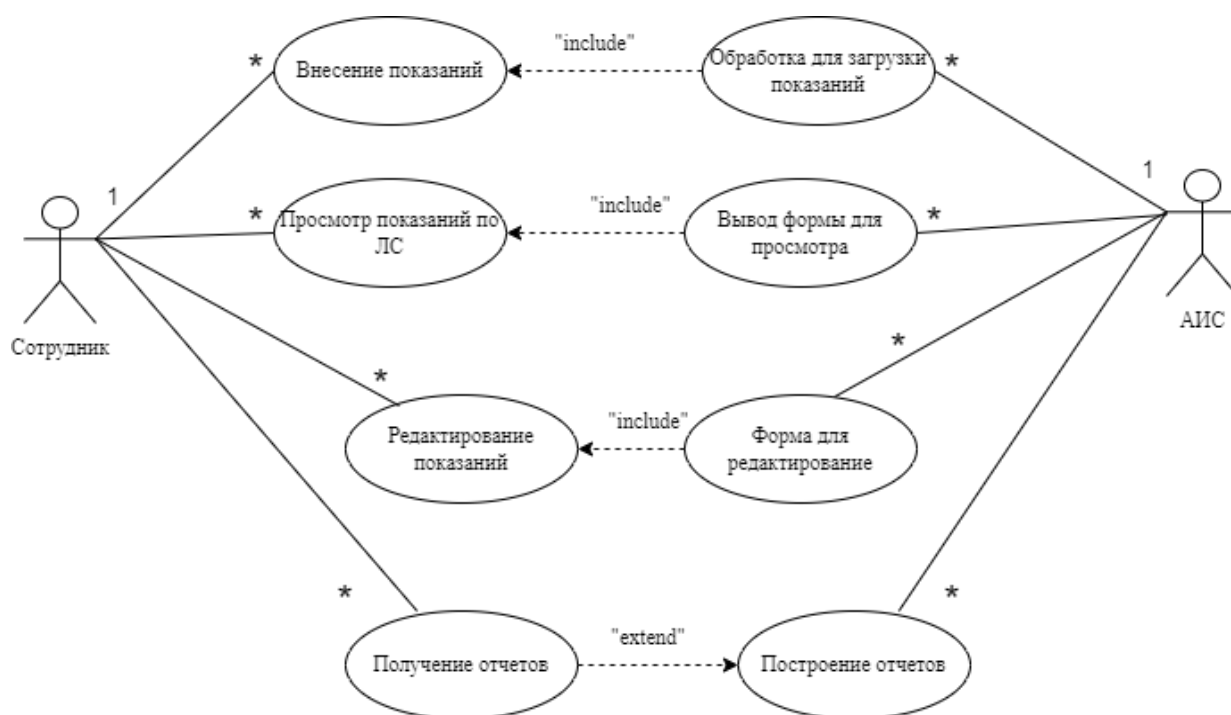


Рис. 3. Диаграмма вариантов использования системы учета электроэнергии

Fig. 3. Diagram of system use cases electricity metering

Порядок взаимодействия объектов при учете расхода электроэнергии в программной системе учета и мониторинга расхода электроэнергии при загрузке показаний приборов учета приведен в виде диаграммы деятельности (Activity diagram) (рис. 4).

Для получения показаний от потребителей в АО «АтомЭнергоСбыт» разработаны цифровые сервисы в виде

мобильного приложения и личного кабинета. Данные, переданные потребителями, попадают в базу, а в дальнейшем их можно просмотреть и обработать в программном комплексе, который выполняет следующие функции: расчет объемов и стоимости отпущенной электроэнергии; прием платежей от населения и юридических лиц; формирование и печать платежных документов;

обработка показаний приборов учета; современные сервисы для качественной работы с обращениями от абонентов; самообслуживание абонентов (возможность распечатать и оплатить квитанцию за электроэнергию, доступ к информации по лицевому счету) [16].

На рисунке 5 проведен пример использования мобильного приложения для сбора показаний расхода электроэнергии по идентификаторам пользователей [15].

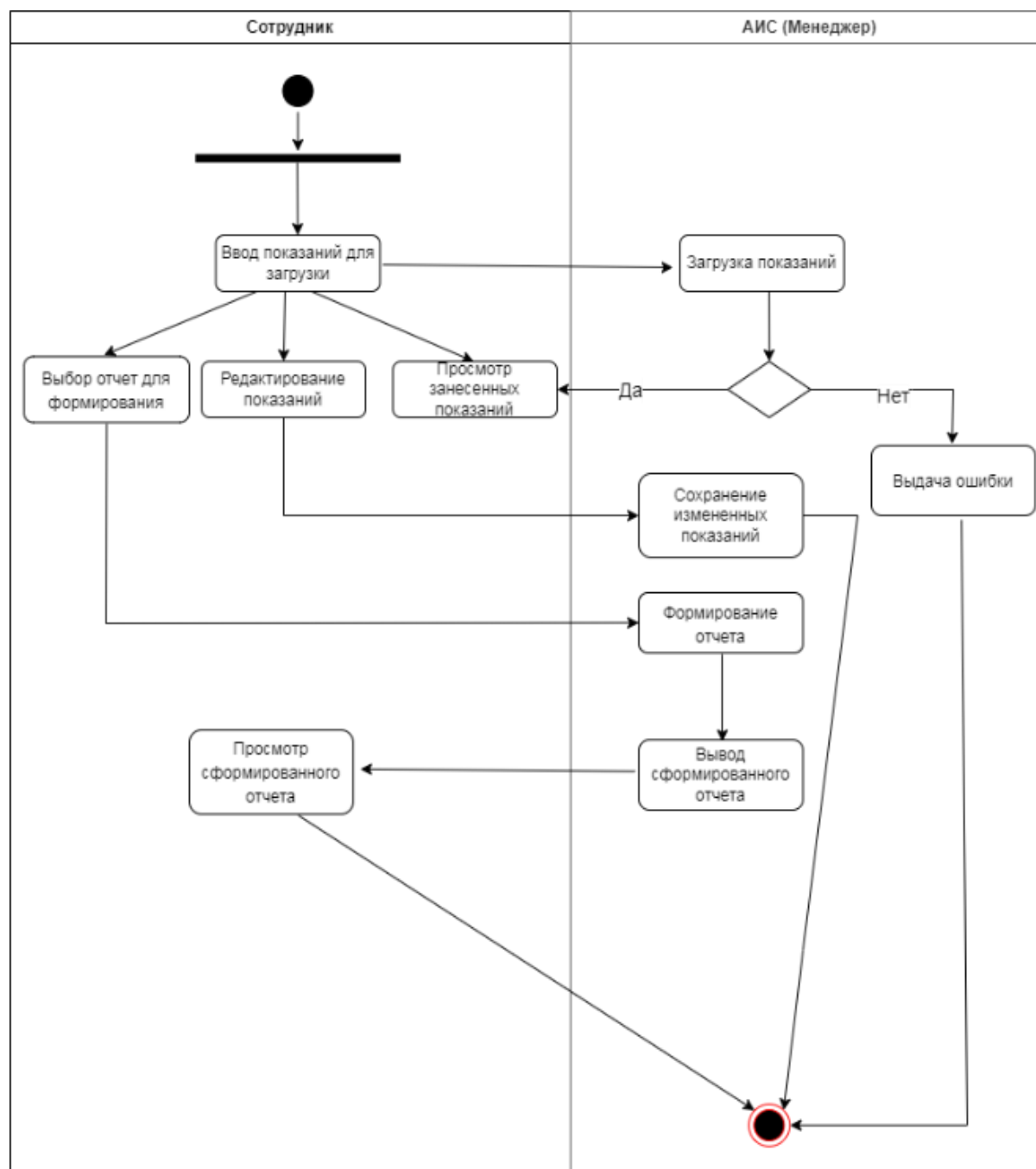


Рис. 4. Диаграмма Activity для системы учета при загрузке показаний приборов учета

Fig. 4. Activity diagram for the metering system when loading meter readings

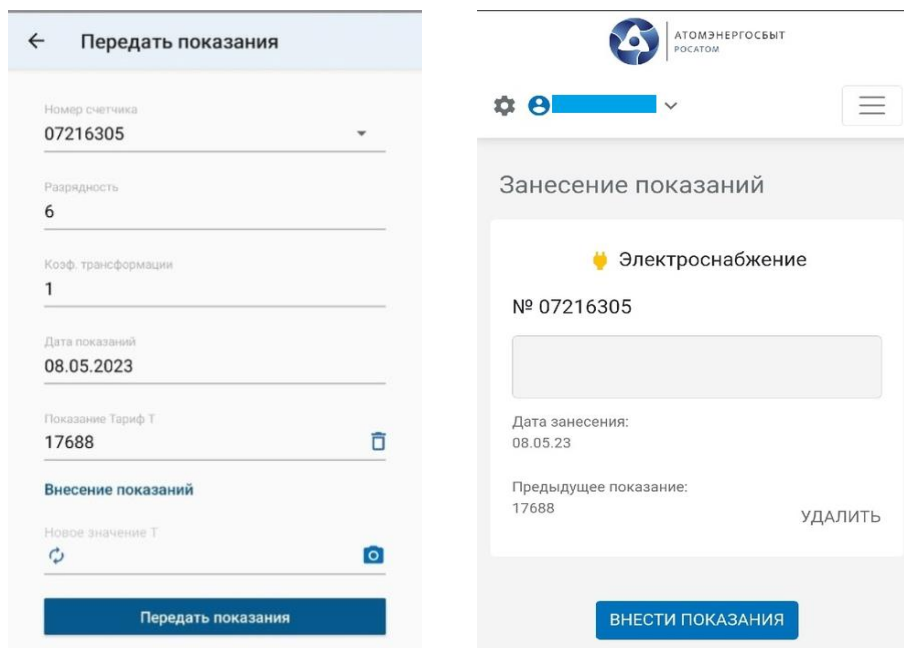


Рис. 5. Мобильное приложение АО «АтомЭнергоСбыт»

Fig. 5. Mobile application AO AtomEnergoSbyt

Результаты и их обсуждение

Система учета и мониторинга расходов электроэнергии с возможностью визуализации геопространственных данных потребителей предназначена для агрегации, актуализации, хранения и визуализации данных о производстве, передаче, распределении и потреблении электрической энергии на оптовом и розничном рынках электроэнергии [17].

Данные электросбытовые организации могут получать от потребителей, от представителей сетевых организаций и с использование автоматических средств коммерческого учета электроэнергии, которые агрегируют данные от «умных приборов» учета, специальных приборов, которые измеряет объем потребляемой электроэнергии и передают данные в интегрированную базу данных приборов учета системы сбора и обработки информации [18].

Рассмотрим пример работы системы учета (рис. 6).

Формализации и автоматизации технологического процесса учета и мониторинга распределения электроэнергии позволяет обеспечить контроль энергоресурсов, разработать методику профилактики потерь, связанных с несанкционированным отбором электроэнергии, планировать объемы закупки у производящих компаний на основе статистики расходов потребителей, обеспечить оперативное реагирование на нештатные ситуации [19].

Программная реализация системы учета и мониторинга расходов электроэнергии для АО «АтомЭнергоСбыт» выполнена на платформе «Стек энерго».

Рассмотрим примеры работы системы учета расхода электроэнергии (рис. 7).

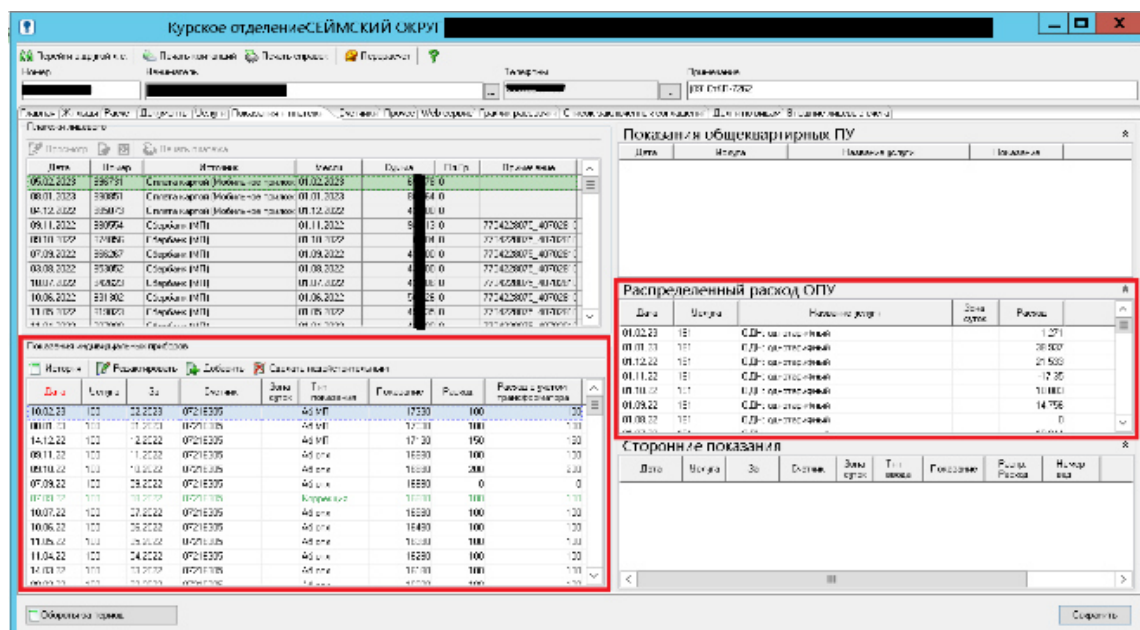


Рис. 6. Показания счетчиков

Fig. 6. Meter readings

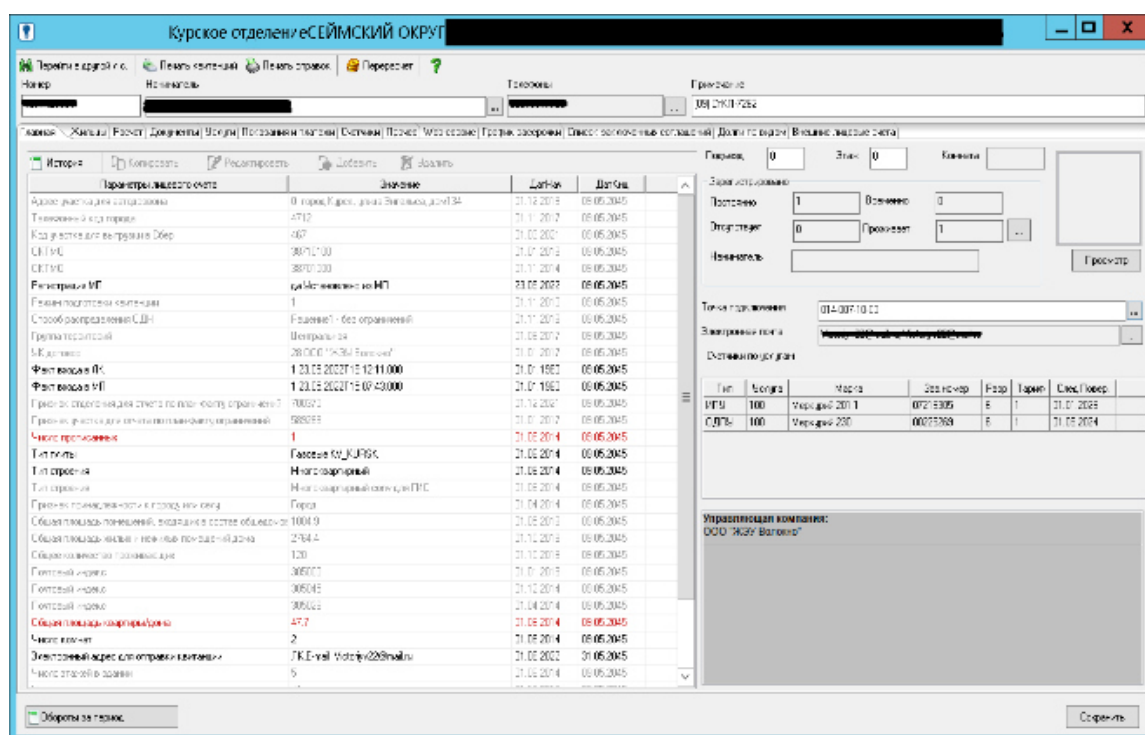


Рис. 7. Карточка лицевого счета

Fig. 7. Personal account card

Разработанная система учета позволяют решить проблему задержки получения показаний «умных приборов учета»

в системе сбора данных «Пирамида» и «Лартех» в систему учета данных базы данных АСД [20].

Кроме того, для системы учета актуальной является задача визуализации данных потребителей с учетом их территориального расположения с привязанными к ним лицевыми счетами, счетчиками и объемами потребления.

Для реализации этой задачи разработана база данных в Microsoft SQL Server management Studio и программное

средство визуализации геопространственных данных потребителей [17].

При открытии страницы выводится карта с маркерами, отмечающими адреса. Красными выделены адреса, у которых показания не передавались больше 10 дней. Пример приведен ниже (рис. 8).

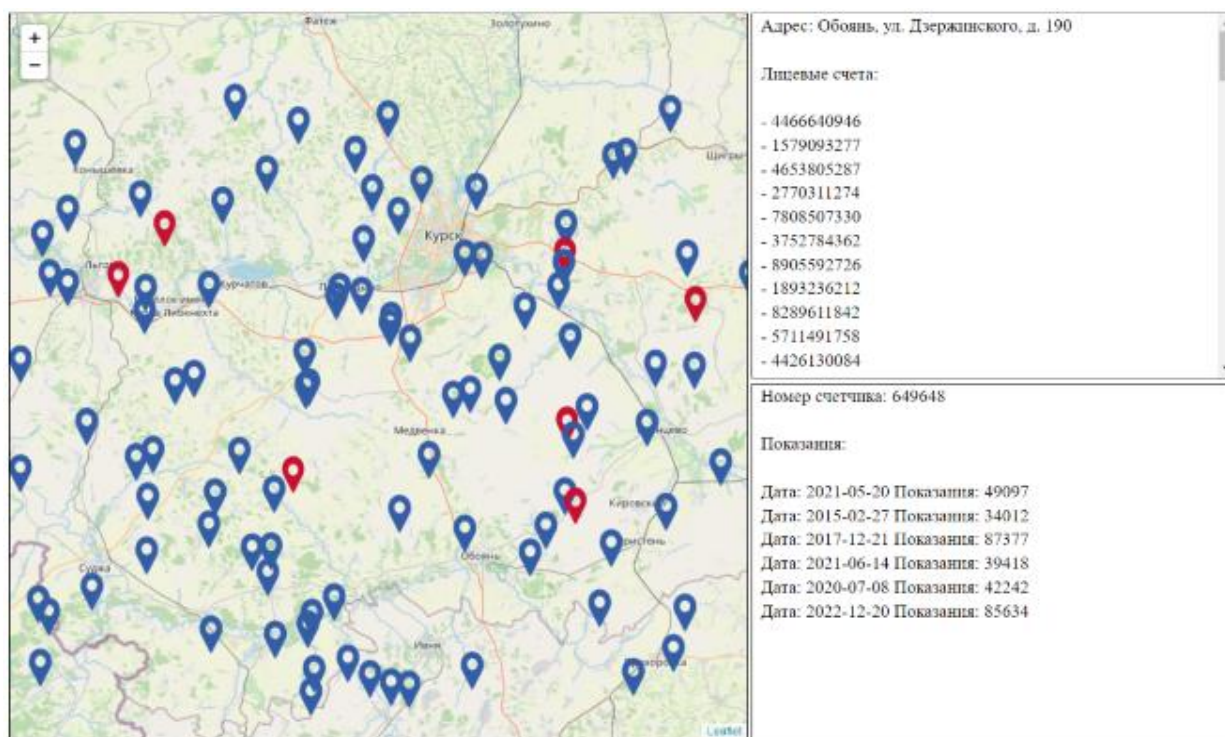


Рис. 8. Визуализация данных в системе учета

Fig. 8. Visualization of data in the accounting system

При нажатии на маркер выводится информация с адресом и списком лицевого счета, находящихся по этому адресу. При выборе лицевого счета снизу выводятся данные с номером счетчика и списком показаний и данных оплаты, что позволяет визуально контролировать поступление денежных средств и задержки оплаты поставленной электроэнергии [20].

Выводы

Для коммерческих энергосбытовых организаций, обеспечивающих поставки электроэнергии потребителям, требуется решать задачи анализа потребностей в электроэнергии, планирования производства или закупки требуемых объемов у производящих компаний, ведения учет расхода энергоресурсов для исключения несанкционированного

отбора электроэнергии и несанкционированных подключений потребителей.

Разработанная система системы мониторинга и контроля расходов электроэнергии с возможностью визуализации геопространственных данных потребителей позволит решить проблему задержки получения показаний «умных приборов» учета в системе сбора данных.

Визуализация данных потребления энергоресурсов по объектам и их территориальному расположению дает возможность руководству компании оперативно выполнять контроль объемов поставок, потребителей энергоресурсов, наличие оплаты, позволяет сократить непроизводительные потери и несанкционированные подключения.

Кроме того, для руководства компании АО «АтомЭнергоСбыт» оперативная визуализация данных потребителей позволяет выполнить анализ охвата потребителей по территориальному признаку и планирование новых подключений.

Разработанная система системы мониторинга и контроля расходов электроэнергии с возможностью визуализации геопространственных данных потребителей протестирована и внедрена в деятельность энергосбытовой компании АО «АтомЭнергоСбыт» при обслуживании потребителей.

Результаты работы системы были продемонстрированы в выставочном центре «Коренная ярмарка».

Список литературы

1. Корнюхова А. В. Состояние, проблемы и перспективы развития электроэнергетики России // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2013. № 2. С. 48–60.
2. Соловьева И. А., Дзюба А. П. Стратегия управления электропотреблением промышленного предприятия // Проблемы обеспечения безопасного развития современного общества: материалы IV Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2014. С. 47–57.
3. Сендеров С. М., Смирнова Е. М., Воробьев С. В. Анализ уровня энергетической безопасности в Центральном и Южном федеральных округах России с применением нормированных индикативных оценок // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. № 2. С. 16–30.
4. Папков Б. В., Куликов А. Л., Осокин В. Л. Вероятности редких случайных событий в электроэнергетике // Электричество. 2019. № 2. С. 4–9.
5. Соловьев И. А. Интеллектуальное ценозависимое управление затратами на электропотребление промышленного предприятия // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2017. Т. 16, № 1. С. 27–45.
6. Лапина Т. И., Вань Л. Анализ задач АИС управления энергоресурсами региона // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: материалы докладов IV Региональной заочной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2017. С. 111–116.

7. Лапина Т. И., Вань Л. Методы и алгоритмы автоматизации управления основной деятельностью электросбытовой компании // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: материалы докладов IV Региональной заочной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2019. С. 13–17.
8. Шипулина К. В., Добринова Т. В. Особенности формирования амортизационных затрат энергетических предприятий // Структурные преобразования экономики территорий: в поиске социального и экономического равновесия: сборник научных статей II Всероссийской научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2019. С. 327–329.
9. Методика управления спросом на электро- и тепловую энергию в интегрированной энергосистеме с активными потребителями / Н. И. Воропай, В. А. Стенников, Е. А. Барахтенко, О. Н. Войтов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 4. С. 11–23.
10. Беляев Н. А., Коровкин Н. В., Чудный В. С. Многокритериальная оптимизация при планировании развития энергосистем // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2021. № 2. С. 3–11.
11. Гительман Л. Д., Ратников Б. Е., Кожевников М. В. Управление спросом на энергию в регионе // Экономика региона. 2013. № 2. С. 71–78.
12. Науменко В. И. Развитие автоматизации распределительных сетей цифровой РЭС // Актуальные проблемы энергетики. 2020. С. 451–544.
13. Лапина Т. И., Акульшина М. А. Информационная система управления рисками планирования производственной деятельности предприятия // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: материалы докладов IV Региональной заочной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2017. С. 116–122.
14. Построение систем мониторинга параметров случайных процессов / Т. И. Лапина, Д. В. Лапин, Е. А. Петрик, Е. А. Криушин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4 (23). С. 484–493.
15. Управление доступом к информационным ресурсам в информационных системах / Т. И. Лапина, Э. М. Димов, Д. В. Лапин, Е. А. Петрик // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4 (23). С. 523–534.
16. Чукреев Ю. Я., Чукреев М. Ю. Конкурентный отбор мощности: особенности, нормативное и информационное обеспечение // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2021. № 2. С. 12–24.
17. Лапина Т. И., Лапин Д. В., Желанов А. Л. Подход к идентификации пользователей информационных ресурсов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Распознавание – 2019: сборник материалов XV Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск: Университетская книга, 2019. С. 100–102.
18. Гительман Л. Д., Ратников Б. Е., Кожевников М. В. Управление спросом на энергию: адаптация зарубежного опыта в России // Эффективное антикризисное управление. 2013. № 1. С. 84–89.

19. Лоскутов А. А., Пелевин П. С., Митрович М. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты // *Электричество*. 2020. № 5. С. 12–18.

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

References

1. Korniyukhova A. V. Sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki Rossii [The state, problems and prospects of development of the Russian electric power industry]. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekonomika = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Economics*, 2013, no. 2, pp. 48–60.

2. Solovyova I. A., Dzyuba A. P. [Power consumption management strategy of an industrial enterprise]. *Problemy obespecheniya bezopasnogo razvitiya sovremennogo obshchestva. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Problems of ensuring the safe development of modern society. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference]. Yekaterinburg, UMTS UPI Publ., 2014, pp. 47–57. (In Russ.)

3. Senderov S. M., Smirnova E. M., Vorobyov S. V. Analiz urovnya energeticheskoy bezopasnosti v Central'nom i Yuzhnom federal'nyh okrugah Rossii s primeneniem normirovannyh indikativnyh ocenok [Analysis of the level of energy security in the central and southern federal districts of Russia using standardized indicative estimates]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2023, no. 2, pp. 16–30.

4. Papkov B. V., Kulikov A. L., Osokin V. L. Veroyatnosti redkih sluchajnyh sobytij v elektroenergetike [Probabilities of rare random events in the electric power industry]. *Elektrichestvo = Electricity*, 2019, no. 2, pp. 4–9.

5. Solovyov I. A. Intellektual'noe ceno-zavisimoe upravlenie zatratami na elektropotreblenie promyshlennogo predpriyatiya [Intelligent price-dependent cost management for power consumption of an industrial enterprise]. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of the UrFU. Series: Economics and Management*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 27–45.

6. Lapina T. I., Wan L. [Analysis of the tasks of AIS management of regional energy resources]. *Intellektual'nye informacionnye sistemy: tendencii, problemy, perspektivy. Materialy dokladov IV regional'noj zaochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Intelligent information systems: trends, problems, prospects. Materials of the reports of the IV regional correspondence scientific and practical conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 111–116. (In Russ.)

7. Lapina T. I., Wan L. [Methods and algorithms for automation of management of the main activity of an electric utility company]. *Intellektual'nye informacionnye sistemy: tendencii, problemy, perspektivy. Materialy dokladov IV regional'noj zaochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Intelligent information systems: trends, problems, prospects. Materials

of the reports of the IV Regional correspondence scientific and practical conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 13–17. (In Russ.)

8. Shipulina K. V., Dobrinova T. V. [Features of the formation of depreciation costs of energy enterprises]. *Strukturnye preobrazovaniya ekonomiki territorij: v poiske social'nogo i ekonomicheskogo ravnovesiya. Sbornik nauchnykh statej II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Structural transformations of the economy of territories: in search of social and economic equilibrium. Collection of scientific articles of the II All-Russian scientific and practical conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 327–329. (In Russ.)

9. Voropai N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Voitov O. N. Metodika upravleniya sprosom na elektro- i teploenergiyu v integrirovannoj energosisteme s aktivnymi potrebitelyami [Methods of demand management for electric and thermal energy in an integrated energy system with active consumers]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2020, no. 4, pp. 11–23.

10. Belyaev N. A., Korovkin N. V., Chudny V. S. Mnogokriterial'naya optimizaciya pri planirovanii razvitiya energosistem [Multicriteria optimization in planning the development of energy systems]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2021, no. 2, pp. 3–11.

11. Gitelman L. D., Ratnikov B. E., Kozhevnikov M. V. Upravlenie sprosom na energiyu v regione [Energy demand management in the region]. *Ekonomika regiona = Economics of the Region*, 2013, no. 2, pp. 71–78.

12. Naumenko V. I. Razvitie avtomatizacii raspredelitel'nyh setej cifrovoj RES [Development of automation of distribution networks of digital RES]. *Aktual'nye problemy energetiki = Actual Problems of Energy*, 2020, pp. 451–544.

13. Lapina T. I., Akulshina M. A. [Information management system for planning production activities of the enterprise]. *Intellektual'nye informacionnye sistemy: tendencii, problemy, perspektivy. Materialy dokladov IV regional'noj zaochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Intelligent information systems: trends, problems, prospects. Materials of the proceedings of the IV regional correspondence scientific and practical conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 116–122. (In Russ.)

14. Lapina T. I., Lapin D. V., Petrik E. A., Kriushin E. A. Postroenie sistem monitoringa parametrov sluchajnykh processov [Building systems for monitoring parameters of random processes]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 4 (23), pp. 484–493.

15. Lapina T. I., Dimov E. M., Lapin D. V., Petrik E. A. Upravlenie dostupom k informacionnym resursam v informacionnyh sistemah [Managing access to information resources in information systems]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 4 (23), pp. 523–534.

16. Chukreev Yu. Ya., Chukreev M. Yu. Konkurentnyj otbor moshchnosti: osobennosti, normativnoe i informacionnoe obespechenie [Competitive power take-off: features, regulatory and information support]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2021, no. 2, pp. 12–24.

17. Lapina T. I., Lapin D. V., Zhelanov A. L. [An approach to the identification of information resource users]. *Optiko-elektronnye pribory i ustrojstva v sistemah raspoznavaniya obrazov i obrabotki izobrazhenij. Raspoznavanie – 2019. Sbornik materialov XV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* [Optoelectronic devices and devices in image recognition and image processing systems. Recognition – 2019. Collection of materials of the XV International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 100–102. (In Russ.)

18. Gitelman L. D., Ratnikov B. E., Kozhevnikov M. V. Upravlenie sprosom na energiyu: adaptatsiya zarubezhnogo opyta v Rossii [Energy demand management: adaptation of foreign experience in Russia]. *Effektivnoe antikrizisnoe upravlenie = Effective Anti-Crisis Management*, 2013, no. 1, pp. 84–89.

19. Loskutov A. A., Pelevin P. S., Mitrovich M. Razrabotka logicheskoy chasti intellektual'noj mnogoparametricheskoy relejnoj zashchity [Development of the logical part of intelligent multiparameter relay protection]. *Elektrichestvo = Electricity*, 2020, no. 5, pp. 12–18.

20. Lapina T. I., Bolycheva S. A. [Assessment of the economic potential of an enterprise for investment management]. *Budushchee nauki – 2019. Sbornik nauchnykh statej VII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii* [The future of science – 2019. Collection of scientific articles of the VII International Youth Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 152–156. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Лапина Татьяна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lapinati@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7959-3053

Tatyana I. Lapina, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lapinati@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7959-3053

Малыхина Виктория Сергеевна, студент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: victoriyv22@mail.ru

Victoria S. Malykhina, Student of the Departments of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: victoriyv22@mail.ru

Крупчатников Роман Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: roman0406@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4951-8607

Roman A. Krupchatnikov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: roman0406@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4951-8607

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-104-113>



УДК: 534.8+57.087.1

Аналитическое моделирование эластографии молочной железы

Д. А. Кравчук¹ ✉, Н. Н. Чернов¹, А. И. Михралиева¹

¹ Южный федеральный университет
ул. Шевченко, д. 2/Е, г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Резюме

Целью исследования – разработать аналитический метод, основанный на микромеханике, для определения местоположения, размера и модуля упругости опухолевой массы, внедренной в симметричную двумерную ткань молочной железы, и получить замкнутое решение для эластограмм деформации.

Методы изменения эластичности тканей обычно коррелируют с патологическими явлениями. Многие виды рака, такие как скirrрозная карцинома молочной железы, появляются в виде чрезвычайно твердых узелков, которые являются результатом повышенной плотности стромы. Другие заболевания включают отложения, которые увеличивают или уменьшают эластичность тканей. Сложные заполненные жидкостью кисты могут быть невидимы при стандартном ультразвуковом исследовании, но при этом быть гораздо мягче встраиваемой ткани. Модули упругости опухолей изменяются в процессе их патологической эволюции. Эластографическая визуализация обладает потенциалом для выявления и характеристики раковых заболеваний путем картирования распределения жесткости в тканях. В работе разработана модель молочной железы в виде двумерного слоя единичной толщины с круглой опухолью, с учетом граничных условий. Получены локальные упругие отклики при приложении акустического поля.

Результаты. Чтобы оценить возможности определения количественных значений упругих модулей среды, нами предложена модель процесса деформации неоднородности в условиях ультразвуковой статической эластографии и исследовано влияние упругих модулей, деформации неоднородности в направлении приложенного давления.

Заключение. Разработанная методика позволила получить аналитическое решение для поля деформаций и напряжений двумерных моделей молочных желез, содержащих неоднородности. Модель позволяет использовать разработанную методику для построения медицинских эластографических аппаратов и проведения исследований в области эластографии.

© Кравчук Д. А., Чернов Н. Н., Михралиева А. И., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(1): 104–113

Ключевые слова: эластография; молочная железа; ткань; объект; микромеханика; модуль упругости; тензор.

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

Для цитирования: Кравчук Д. А., Чернов Н. Н., Михралиева А. И. Аналитическое моделирование эластографии молочной железы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 104–113. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-104-113>.

Поступила в редакцию 14.01.2024

Подписана в печать 11.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Analytical Modeling of Breast Elastography

Denis A. Kravchuk¹ ✉, Nikolaj N. Chernov¹, Amaliya I. Mihralieva¹

¹ Southern Federal University
2 Shevchenko Str., Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for assessing the level of nonspecific protection of the body. The purpose of the research. To develop an analytical method based on micromechanics to determine the location, size and modulus of elasticity of a tumor mass embedded in symmetrical double-dimensional breast tissue and obtain a closed solution for deformation elastograms.

Methods. Changes in tissue elasticity usually correlate with pathological phenomena. Many cancers, such as scirrhous carcinoma of the breast, appear as extremely hard nodules that result from increased stromal density. Other diseases include deposits that increase or decrease tissue elasticity. Complex fluid-filled cysts may not be visible on standard ultrasound, but may be much softer than the embedded tissue. The elastic moduli of tumors change during their pathological evolution. Elastographic imaging has the potential to detect and characterize cancers by mapping tissue stiffness distribution. The work developed a model of the mammary gland in the form of a two-dimensional layer of unit thickness with a round tumor, taking into account boundary conditions. Local elastic responses were obtained when an acoustic field was applied.

Results. To evaluate the possibilities of determining the quantitative values of the elastic modules of the medium, we proposed a model of the process of deformation of heterogeneity under the conditions of ultrasonic static elastography and investigated the influence of elastic moduli and deformation of heterogeneity in the direction of applied pressure.

Conclusion. The developed technique made it possible to obtain an analytical solution for the field of deformations and stresses of two-dimensional models of mammary glands containing inhomogeneities. The model makes it possible to use the developed methodology for constructing medical elastographic devices and conducting research in the field of elastography.

Keywords: elastography; mammary gland; tissue; object; micromechanics; elastic modulus; tensor.

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

For citation: Kravchuk D. A., Chernov N. N., Mihralieva A. I. Analytical Modeling of Breast Elastography. *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(1): 104–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-104-113>.

Received 14.01.2024

Accepted 11.02.2024

Published 29.03.2024

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2024; 14(1): 104–113

Введение

Механические свойства мягких тканей являются важными показателями для биомедицинских исследований и диагностики [1], поскольку они, как правило, коррелируют с патологическими изменениями тканей [2]. Например, было обнаружено, что многие виды карцином молочной железы плотнее [3], чем окружающие ее нормальные ткани, [4]. Несмотря на различия с точки зрения упругой жесткости [5], некоторые опухоли трудно обнаружить с помощью обычных методов визуализации, таких как маммография [6], ультразвуковое исследование (УЗИ) [7], компьютерная томография [8] (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ), особенно при наличии сложных фоновых изменений [9], таких как рубцы, фиброзно-кистозные изменения или другие доброкачественные явления [10]. Пальпация часто используется для обнаружения твердых повреждений [11]. Однако глубокие повреждения в большой груди могут быть неощутимы [12] до тех пор, пока они не вырастут большими и не станут неизлечимыми [13].

Так как изменение модуля упругости (жесткости) тканей может указывать на патологическую эволюцию тканей, эластография была разработана для выявления и характеристики опухолей. Использование свойств материалов в сочетании с традиционными методами визуализации потенциально может обеспечить «сигнатуру», ощутимую до тех пор,

пока они не станут большими и неизлечимыми [14].

В работе [15] описан эластографический метод на основе ультразвука для количественной визуализации распределения деформации и модуля упругости в биологических тканях. Этот метод включает в себя применение квазистатической компрессии к тканям. Эластограмма модуля упругости может быть восстановлена путем расчета внутренних напряжений и локальных перемещений по радиочастотным ультразвуковым сигналам до сжатия и после сжатия. В работе [16] было реконструировано распределение модуля сдвига с помощью метода МРТ для измерения распространения волны акустической деформации в тканях, подверженных гармоническому механическому возбуждению.

Было показано, что как ультразвуковые, так и МР-методы эластографии являются рабочими для предоставления информации для выявления и характеристики раковых опухолей в мягких тканях. Однако большинство из них требуют больших вычислительных затрат, поскольку для восстановления модулей упругости применяется анализ конечных элементов. В то время как некоторые аналитические представления были предложены либо в двух измерениях (2D), либо в трех измерениях (3D), для исследования эластографии биологических тканей эти модели предполагают, что единичное повреждение встроено в бесконечную область ткани так, что

геометрические границы не принимаются во внимание.

В данной статье представлен основанный на микромеханике аналитический метод определения местоположения, размера и модуля упругости опухоли, внедренной в 2D конечную ткань с упрощенными геометрическими структурами. Теория микромеханики как неотъемлемая часть механики сплошных сред [17] занимается расчетом локальных полей напряжений и деформаций материалов с включениями и / или неоднородностями [18]. Биологические ткани с раковыми опухолями можно рассматривать как гетерогенно-эластичные материалы, содержащие более твердые / мягкие массы, встроенные в матрицы.

Материалы и методы

Опухоль молочной железы, определяемая ее положением, размером и упругими свойствами, может быть использована для определения локальных деформаций и полей напряжений во всей области (например, во всей молочной железе) с использованием теории микромеханики. Опухоль молочной железы моделируется как включение в тканевую матрицу с определенными граничными условиями.

Представим молочную железу в виде двумерного слоя единичной толщины (рис. 1). Для простоты обработки срез железы упрощенно представлен в виде полукруга радиусом R . Граничное условие на оси x ($x = 0$) предполагает,

что все компоненты смещения фиксированы в направлении x , в то время как никакие смещения не ограничены в направлении y . Круглая опухоль Ω (с модулем Юнга $E1$) встроена в область тканевого матрикса (с модулем Юнга $E0$). Предполагается, что и матрица, и опухоль несжимаемы таким образом, что отношение их коэффициентов Пуассона равно 0,5. Для получения локальных упругих откликов к центральной граничной точке прикладывается сжимающая сосредоточенная сила P ($x = R \neq 0$). Для двумерной задачи о плоской деформации все компоненты внеплоскостной деформации равны нулю.

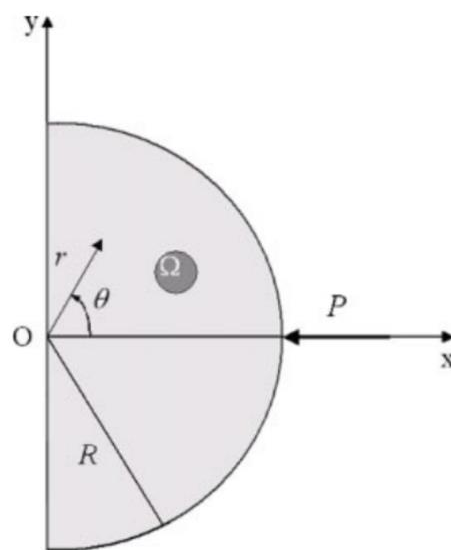


Рис. 1. Геометрическая модель молочной железы

Fig. 1. Geometric model of the breast

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим однородный круговой срез с модулем Юнга $E0$. Две равные, но противоположно направленные силы P действуют в направлении диаметра (рис. 2).

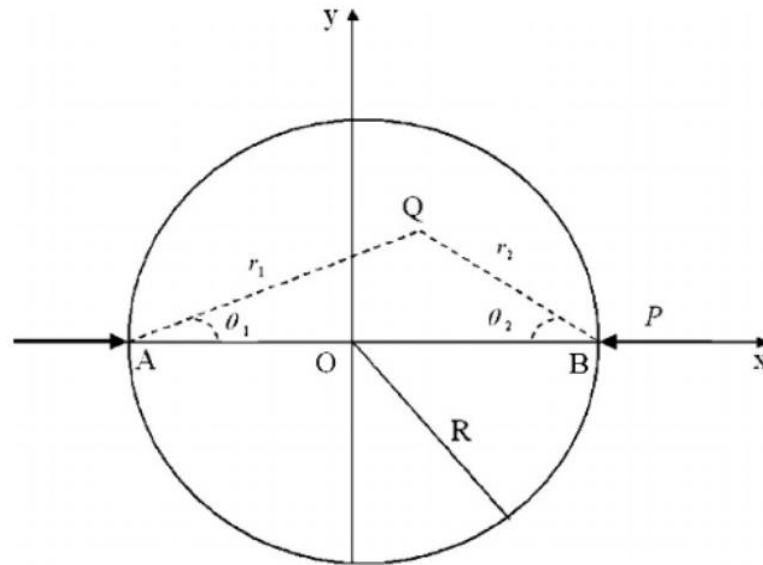


Рис. 2. Круговой срез радиусом R

Fig. 2. Circular cut with radius R

Решение для замкнутой формы приведено в [9], а именно деформация в точке Q выражается как

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{3P}{2\pi E_0} \left[\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1 - \cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2 - \cos^3 \theta_2}{r_2} \right], \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{3P}{2\pi E_0} \left[\frac{\cos^3 \theta_1 - \sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2 - \sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right], \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{3P}{2\pi E_0} \left[\frac{\sin \theta_1 \cos^2 \theta_1}{r_1} + \frac{\sin \theta_2 \cos^2 \theta_2}{r_2} \right],\end{aligned}\quad (1)$$

где ε – деформация вдоль осей, определяемых нижними индексами, остальные параметры определены на рисунке 2. Из-за симметрии внешней нагрузки и структуры материала это решение

непосредственно обеспечивает оценку упругости для 2D полукруглой молочной железы без опухолей.

Чтобы исследовать влияние внедренной опухоли, представим ее в виде круглой области Ω , внедренной в бесконечную тканевую матрицу D (рис. 3).

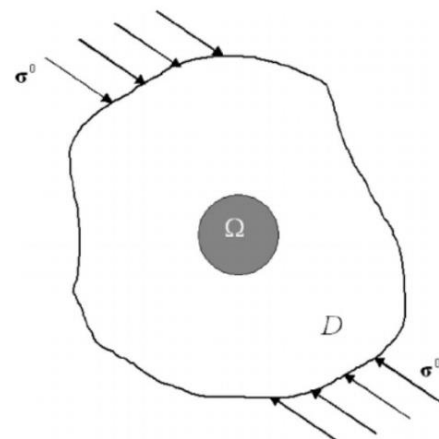


Рис. 3. Модель эквивалентного включения Эшелби, представленная повреждением, внедренным в бесконечную матричную область, подверженную напряжениям дальнего поля

Fig. 3. Model of an equivalent Eshelby inclusion, represented by a damage embedded

in an infinite matrix region subject
to far-field stresses

Когда на объект воздействует внешняя нагрузка дальнего поля σ^0 , то соответствующее поле деформаций может быть получено из теории эквивалентного включения Эшелби [19]. Общая деформация $\varepsilon(\mathbf{x})$ в положении $\mathbf{x}$ определяется как [20]:

$$\varepsilon(\mathbf{x}) = \varepsilon_0(\mathbf{x}) + \varepsilon_d(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где $\varepsilon(\mathbf{x})$ – однородная деформация из-за напряжения дальнего поля σ_0 , приложенного к ткани без повреждений, в то время как $\varepsilon_d(\mathbf{x})$ – возмущающая деформация из-за упругого несоответствия между матрицей и инородным объектом. Для конкретного объекта с центром в точке $\mathbf{x}_1$ $\varepsilon_d(\mathbf{x})$ в любом положении $\mathbf{x}$ определяется как

$$\varepsilon_d(\mathbf{x}) = \begin{cases} -[\mathbf{G}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) \times (\mathbf{A} + \mathbf{S})^{-1}] : \varepsilon_0, & \mathbf{x} \in D - \Omega, \\ -[\mathbf{S} \times (\mathbf{A} + \mathbf{S})^{-1}] : \varepsilon_0, & \mathbf{x} \in \Omega, \end{cases} \quad (3)$$

где $\mathbf{G}$, $\mathbf{S}$ – тензоры, определяемые через модули Юнга и коэффициенты Пуассона для основной ткани и включения; символы « $\times$ » и « $:$ » указывают на свертку между двумя тензорами четвертого ранга и между тензорами четвертого ранга и второго ранга, соответственно. Тензор четвертого ранга $\mathbf{A}$ представляет упругое несоответствие между тензором жесткости ткани $\mathbf{C}_0$ и тензором жесткости объекта $\mathbf{C}_1$ в виде

$$\mathbf{A} \equiv (\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_0)^{-1} \times \mathbf{C}_0.$$

Для несжимаемой ткани возмущающая деформация $\varepsilon_d(\mathbf{x})$ в уравнении (3) может быть дополнительно упрощена следующим образом:

$$\varepsilon_d(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\mathbf{B}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) : \varepsilon_0, & \mathbf{x} \in D - \Omega, \\ -\mathbf{Q} : \varepsilon_0, & \mathbf{x} \in \Omega, \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{B}$ и $\mathbf{Q}$ – тензоры четвертого порядка. Основываясь на формулах (1) и (4) для замкнутой и бесконечной задач, можно решить задачу для исходной двумерной полукруглой молочной железы (рис. 1). Поле деформации в уравнении (1) представляет собой однородное решение без повреждений. В частности, локальная деформация в положении $\mathbf{x}_1$ обозначается как $\varepsilon_l(\mathbf{x}_1)$. Если в ткань добавляется гетерогенная опухоль с центром в $\mathbf{x}_1$, то поле возмущающих напряжений $\varepsilon_d(\mathbf{x})$ может быть оценено из решения уравнения в бесконечной области (4) как

$$\varepsilon_d(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\mathbf{B}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) : \varepsilon_l(\mathbf{x}_1), & \mathbf{x} \in D - \Omega, \\ -\mathbf{Q} : \varepsilon_l(\mathbf{x}_1), & \mathbf{x} \in \Omega. \end{cases} \quad (5)$$

Соответственно общее распределение напряжения в молочной железе может быть выражено в виде суммы следующим образом:

$$\varepsilon(\mathbf{x}) = \begin{cases} \varepsilon_l(\mathbf{x}) - \mathbf{B}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) : \varepsilon_l(\mathbf{x}_1), & \mathbf{x} \in D - \Omega, \\ \varepsilon_l(\mathbf{x}) - \mathbf{Q} : \varepsilon_l(\mathbf{x}_1), & \mathbf{x} \in \Omega. \end{cases} \quad (6)$$

Выводы

Биологические ткани с раковыми опухолями можно рассматривать как гетерогенно-эластичные материалы, содержащие более твердые / мягкие массы, встроенные в матрицы. Метод эквивалентного включения Эшелби совместно с теорией упругости Тимошенко позволили получить аналитическое решение для полей деформаций и напряжений двумерных молочных желез, содержащих повреждения. Задача решена для двумерного случая. Модель может использоваться для построения

медицинских эластографических аппаратов и проведения исследований в области эластографии.

Список литературы

1. Elastic Cherenkov effects in transversely isotropic soft materials-I: theoretical analysis, simulations and inverse method / G.-Y. Li, Y. Zheng, Y. Liu, M. Destrade, Y. Cao // *J. Mech. Phys. Solids*. 2016. N 96. P. 388–410.
2. Исследование распространения поперечных упругих волн в биологических тканях / А. И. Михралиева [и др.] // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018. Т. 6, № 4. С. 53–60.
3. Rethinking Liver Fibrosis Staging in Patients with Hepatocellular Carcinoma: New Insights from a Large Two-Center Cohort Study / W. Xu, B. Li, Z. Yang, J. Li, F. Liu, Y. J. Liu // *Hepatocell Carcinoma*. 2022. N 9. P. 751–781. <https://doi.org/10.2147/JHC.S372577>.
4. Karam A. R., Beland M. D. Liver Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications // *R. I. Med. J.* 2020. Vol. 103, N 5. P. 26–29. PMID 32481776.
5. Nehring P., Szeligowska J., Przybyłkowski A. Elastography of the Liver in Wilson's Disease // *Diagnostics (Basel)*. 2023. Vol. 13, N 11. P. 1898. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13111898>.
6. Ultrasound Elastography: Basic Principles and Examples of Clinical Applications with Artificial Intelligence – A Review / M. Cè, N. C. D'Amico, G. M. Danesini, C. Foschini, G. Oliva, C. Martinenghi, M. Cellina // *BioMedInformatics*. 2023. N 3. P. 17–43. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics3010002>.
7. Use of Palpation Imaging in Diagnosis of Breast Diseases: A Way to Improve the Detection Rate / Y. Ing, C. Sun, Q. Zhou, C. Cheng, C. Yan, B. Wang // *Med. Sci. Monit.* 2020. N 26. P. e927553-1–e927553-10.
8. Update to the Society of Radiologists in Ultrasound Liver Elastography Consensus Statement / R. G. Barr, S. R. Wilson, D. Rubens, G. Garcia-Tsao, G. Ferraioli // *Radiology*. 2020. N 296. P. 263–274.
9. Accuracy of controlled attenuation parameter (CAP) and liver stiffness measurement (LSM) for assessing steatosis and fibrosis in non-alcoholic fatty liver disease: A systematic review and meta-analysis / Y.-T. Cao, L.-L. Xiang, F. Qi, Y.-J. Zhang, Y. Chen, X.-Q. Zhou // *Eclinicalmedicine*. 2022. N 51. P. 101547.
10. Combinational elastography for assessment of liver fibrosis in patients with liver injury / T. Yazaki, H. Tobita, S. Sato, T. Miyake, M. Kataoka, S. Ishihara // *J. Int. Med. Res.* 2022. N 50. P. 3000605221100126.
11. Artificial intelligence in prediction of non-alcoholic fatty liver disease and fibrosis / G. L. Wong, P. Yuen, A. J. Ma, A. W. Chan, H. H. Leung, V. W. Wong // *J. Gastroenterol. Hepatol.* 2021. N 36. P. 543–550.

12. Deep learning Radiomics of shear wave elastography significantly improved diagnostic performance for assessing liver fibrosis in chronic hepatitis B: A prospective multicentre study / K. Wang, X. Lu, H. Zhou, Y. Gao, J. Zheng, M. Tong, C. Wu, C. Liu, L. Huang, T. Jiang [et al.] // *Gut*. 2019. N 68. P. 729–741.
13. Quantitative ultrasound, elastography, and machine learning for assessment of steatosis, inflammation, and fibrosis in chronic liver disease / F. Destrempes, M. Gesnik, B. Chayer, M.-H. Roy-Cardinal, D. Olivié, J.-M. Giard, G. Sebastiani, B. N. Nguyen, G. Cloutier, A. Tang // *PLoS ONE*. 2022. N 17. P. e0262291.
14. Park S.-Y., Kang B. J. Combination of shear-wave elastography with ultrasonography for detection of breast cancer and reduction of unnecessary biopsies: A systematic review and meta-analysis // *Ultrasonography*. 2021. N 40. P. 318–332.
15. Shear Wave and Strain Elastography in Crohn's Disease – A Systematic Review / A. Grażyńska, J. Kufel, A. Dudek, M. Cebula // *Diagnostics*. 2021. N 11. P. 1609.
16. Use of Palpation Imaging in Diagnosis of Breast Diseases: A Way to Improve the Detection Rate / Y. Ding, C. Sun, Q. Zhou, C. Cheng, C. Yan, B. Wang // *Med. Sci. Monit.* 2020. N 26. P. e927553. <https://doi.org/10.12659/MSM.927553>.
17. Волков-Богородский Д. Б. Структура решений обобщенной задачи Эшелби и представление Гаусса для однородных полиномов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2019. Т. 25, № 3. С. 416–422.
18. Юденков А. В., Володченков А. М. Устойчивость математических моделей основных задач анизотропной теории упругости // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2020. Т. 30, Вып. 1. С. 112–124.
19. Evaluation of the Liver and Pancreas by 2D Shear Wave Elastography in Pediatric Wilson's Disease / S. Yavuz, F. C. Pişkin, C. Oktay, S. Soyupak, G. Tümgör // *Turk. J. Gastroenterol.* 2022. Vol. 33, N 2. P. 161–167. <https://doi.org/10.5152/tjg.2022.21545>.
20. Liver stiffness assessed by real-time two-dimensional shear wave elastography predicts hypersplenism in patients with Wilson's disease: a prospective study / J. Wang, M. Hu, Q. Zhu, L. Sun // *BMC Med. Imaging*. 2022. Vol. 22. N 1. P. 25. <https://doi.org/10.1186/s12880-022-00749-x>.

References

1. Li G.-Y., Zheng Y., Liu Y., Destrade M., Cao Y. Elastic Cherenkov effects in transversely isotropic soft materials-I: theoretical analysis, simulations and inverse method. *J. Mech. Phys. Solids.*, 2016, no. 96, pp. 388–410.
2. Mihraieva A. I., eds. Issledovanie rasprostraneniya poperechnykh uprugih voln v biologicheskikh tkanyah [Study of the propagation of transverse elastic waves in biological tissues]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 53–60.

3. Xu W., Li B., Yang Z., Li J., Liu F., Liu Y. J. Rethinking Liver Fibrosis Staging in Patients with Hepatocellular Carcinoma: New Insights from a Large Two-Center Cohort Study. *Hepatocell Carcinoma*, 2022, no. 9, pp. 751–781. <https://doi.org/10.2147/JHC.S372577>
4. Karam A. R., Beland M. D. Liver Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications. *R. I. Med. J.*, 2020, vol. 103, no. 5, pp. 26–29. PMID 32481776
5. Nehring P., Szeligowska J., Przybyłkowski A. Elastography of the Liver in Wilson's Disease. *Diagnostics (Basel)*, 2023, vol. 13, no. 11, p. 1898. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13111898>
6. Cè M., D'Amico N. C., Danesini G. M., Foschini C., Oliva G., Martinenghi C., Cellina M. Ultrasound Elastography: Basic Principles and Examples of Clinical Applications with Artificial Intelligence – A Review. *BioMedInformatics*, 2023, no. 3, pp. 17–43. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics3010002>
7. Ing Y., Sun C., Zhou Q., Cheng C., Yan C., Wang B. Use of Palpation Imaging in Diagnosis of Breast Diseases: A Way to Improve the Detection Rate. *Med. Sci. Monit.*, 2020, no. 26, pp. e927553-1–e927553-10.
8. Barr R. G., Wilson S. R., Rubens D., Garcia-Tsao G., Ferraioli G. Update to the Society of Radiologists in Ultrasound Liver Elastography Consensus Statement. *Radiology*, 2020, no. 296, pp. 263–274.
9. Cao Y.-T., Xiang L.-L., Qi F., Zhang Y.-J., Chen Y., Zhou X.-Q. Accuracy of controlled attenuation parameter (CAP) and liver stiffness measurement (LSM) for assessing steatosis and fibrosis in non-alcoholic fatty liver disease: A systematic review and meta-analysis. *Eclinicalmedicine*, 2022, no. 51, p. 101547.
10. Yazaki T., Tobita H., Sato S., Miyake T., Kataoka M., Ishihara S. Combinational elastography for assessment of liver fibrosis in patients with liver injury. *J. Int. Med. Res.*, 2022, no. 50, p. 3000605221100126.
11. Wong G. L., Yuen P., Ma A. J., Chan A. W., Leung H. H., Wong V. W. Artificial intelligence in prediction of non-alcoholic fatty liver disease and fibrosis. *J. Gastroenterol. Hepatol*, 2021, no. 36, pp. 543–550.
12. Wang K., Lu X., Zhou H., Gao Y., Zheng J., Tong M., Wu C., Liu C., Huang L., Jiang T., eds. Deep learning Radiomics of shear wave elastography significantly improved diagnostic performance for assessing liver fibrosis in chronic hepatitis B: A prospective multicentre study. *Gut*, 2019, no. 68, pp. 729–741.
13. Destrepes F., Gesnik M., Chayer B., Roy-Cardinal M.-H., Olive D., Giard J.-M., Sebastiani G., Nguyen B. N., Cloutier G., Tang A. Quantitative ultrasound, elastography, and machine learning for assessment of steatosis, inflammation, and fibrosis in chronic liver disease. *PLoS ONE*, 2022, no. 17, p. e0262291.
14. Park S.-Y., Kang B. J. Combination of shear-wave elastography with ultrasonography for detection of breast cancer and reduction of unnecessary biopsies: A systematic review and meta-analysis. *Ultrasonography*, 2021, no. 40, pp. 318–332.

15. Grażyńska A., Kufel J., Dudek A., Cebula M. Shear Wave and Strain Elastography in Crohn's Disease – A Systematic Review. *Diagnostics*, 2021, no. 11, p. 1609.
16. Ding Y., Sun C., Zhou Q., Cheng C., Yan C., Wang B. Use of Palpation Imaging in Diagnosis of Breast Diseases: A Way to Improve the Detection Rate. *Med. Sci. Monit.*, 2020, no. 26, p. e927553. <https://doi.org/10.12659/MSM.927553>
17. Volkov-Bogorodsky D. B. Struktura reshenij obobshchennoj zadachi Eshelbi i predstavlenie Gaussa dlya odnorodnyh polinomov [The structure of solutions to the generalized Eshelby problem and the Gaussian representation for homogeneous polynomials]. *Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij = Mechanics of Composite Materials and Structures*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 416–422.
18. Yudenkov A. V., Volodchenkov A. M. Ustojchivost' matematicheskikh modelej osnovnyh zadach anizotropnoj teorii uprugosti [Stability of mathematical models of the main problems of anisotropic theory of elasticity]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki = Bulletin of the Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, 2020, vol. 30, is. 1, pp. 112–124.
19. Yavuz S., Pişkin F. C., Oktay C., Soyupak S., Tümgör G. Evaluation of the Liver and Pancreas by 2D Shear Wave Elastography in Pediatric Wilson's Disease. *Turk. J. Gastroenterol.*, 2022, vol. 33, no. 2, pp. 161–167. <https://doi.org/10.5152/tjg.2022.21545>
20. Wang J., Hu M., Zhu Q., Sun L. Liver stiffness assessed by real-time two-dimensional shear wave elastography predicts hypersplenism in patients with Wilson's disease: a prospective study. *BMC Med. Imaging.*, 2022, vol. 22, no. 1, p. 25. <https://doi.org/10.1186/s12880-022-00749-x>

Информация об авторах / Information about the Authors

Кравчук Денис Александрович, доктор технических наук, доцент, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: kravchukda@sfedu.ru, ORCID: 0000-0002-4220-3928

Чернов Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: nnchernov@sfedu.ru, ORCID: 0000-0003-0656-8919

Михралиева Амалия Исмиевна, аспирант Института нанотехнологий, электроники

Denis A. Kravchuk, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Southern Federal University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kravchukda@sfedu.ru, ORCID: 0000-0002-4220-3928

Nikolaj N. Chernov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0656-8919

Amaliya I. Michralieva, Post-Graduate Student of the Institute of Nanotechnology, Electronics

и приборостроения, Южный федеральный
университет, г. Таганрог, Российская Федерация,
e-mail: mihralieva.amalya@yandex.ru,
ORCID: 0009-0000-0248-9012

and Instrumentation, Southern Federal University,
Taganrog, Russian Federation,
e-mail: mihralieva.amalya@yandex.ru,
ORCID: 0009-0000-0248-9012

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-114-129>



УДК 004.421.2

Модель информационного обеспечения регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами

Д. В. Александров¹, А. А. Гуламов¹

¹ Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: di46ma@mail.ru

Резюме

Целью исследования является составление современной модели информационного обеспечения регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами и анализа требований, предъявляемых для этой системы.

Методы исследования основаны на различных публикациях докладов экологических операторов публично-правовой компании «Российский экологический оператор» (ППК РЕО), на законодательной документации, исследованиях и программных решениях (СТЕК ЖКХ, подсистема «Сирена ЖКХ», Электронная торговая площадка РЭО) в плане автоматизации вывоза отходов.

Результаты. Построена современная информационная модель обмена данных в сети регионального оператора по обращению с ТКО, которая соответствует нуждам в отрасли. В исследование выведены исходя из законодательства рекомендации по работе и функционированию отделов. Представлены готовые решения по автоматизации работы регионального оператора по вывозу твердых коммунальных отходов. Разработан алгоритм функционирования системы для отправки данных о количестве поступающих на полигон твердых коммунальных отходов (ТКО) согласно новым требованиям по автоматическому мониторингу принятых на полигон отходов.

Заключение. Реализация современного уровня информационного обеспечения регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами является актуальной не только с точки зрения экологии, формирования комплексного эффективного подхода обращения с отходами, но и информационной безопасности. Организация работы регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами является процессом, который нуждается в современной информационной поддержке. Для осуществления процесса построения грамотной логистики используются инфокоммуникационные комплекты и системы передачи данных для отслеживания машин, осуществляющих транспортирование отходов. Используется программное обеспечение для контроля уровня загруженности машин, общего количества вывезенного мусора, расхода топлива, проведения анализа загруженности и состояния полигонов с твердыми коммунальными отходами, процессов разделения и переработки отходов.

Ключевые слова: инфокоммуникационная сеть; обработка данных; региональный оператор; персональные данные; информационная модель.

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

Для цитирования: Александров Д. В., Гуламов А. А. Модель информационного обеспечения регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С.114–129. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-114-129>.

Поступила в редакцию 14.01.2024

Подписана в печать 12.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Model of Information Support for a Regional Operator for the Management of Municipal Solid Waste

Dmitry V. Aleksandrov¹ ✉, Alisher A. Gulamov¹

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

✉ e-mail: di46ma@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to compile a modern model of information support for a regional operator for the management of municipal solid waste and analyze the requirements for this system.

Methods are based on various publications of reports by environmental operators, the public law company "Russian Ecological Operator" (PPK REO), on legislative documentation, research and software solutions (STEC Housing and Public Utilities, Sirena Housing and Public Utilities, Electronic Trading Platform REO) in terms of automation of waste removal.

Results. A modern information model for data exchange in the network of a regional operator for the management of solid waste has been built, which meets the needs of the industry. Based on the legislation, the study included recommendations for the work and functioning of departments. Ready-made solutions for automating the work of a regional operator for the removal of municipal solid waste are presented. An algorithm has been developed for the functioning of the system to send data on the amount of municipal solid waste (MSW) arriving at the landfill in accordance with the new requirements for automatic monitoring of waste accepted at the landfill.

Conclusion. The implementation of a modern level of information support for a regional operator for the management of municipal solid waste is relevant, not only from an environmental point of view, the formation of an integrated effective approach to waste management, but also from information security. Organizing the work of a regional operator for the management of municipal solid waste is a process that requires modern information support. To carry out the process of building competent logistics, infocommunication kits and data transmission systems are used to track vehicles transporting waste. Software is used to monitor the level of vehicle load, the total amount of waste removed, fuel consumption, analyze the load and condition of landfills with solid municipal waste, waste separation and recycling processes.

Keywords: infocommunication network; data processing; regional operator; personal data; information model.

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

For citation: Aleksandrov D. V., Gulamov A. A. Model of Information Support for a Regional Operator for the Management of Municipal Solid Waste. *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): 114–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-114-129>.

Received 14.01.2024

Accepted 12.02.2024

Published 29.03.2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(1): 114–129

Введение

Региональный оператор по вывозу твердых коммунальных отходов (ТКО) представляет собой сложную разветвленную организацию, в состав которой входят административные здания для аппарата управления, площадки с оборудованием для осуществления раздельного накопления ТКО, техника для осуществления уборки, погрузки и вывоза ТКО, территория для стоянки техники и помещения с оборудованием для осуществления её регламентных и ремонтных работ, полигоны ТКО, предприятия разделения и переработки ТКО, мусорные заводы, пункты приёма вторсырья и другие вспомогательные службы [1].

Создание оптимальных условий для работы организации невозможно без эффективного информационно-аналитического обеспечения на базе современных инфокоммуникационных систем [2]. При этом региональные операторы должны в плане информационного учета и иной информационной деятельности руководствоваться Постановлением Правительства РФ от 20 мая 2022 г. № 913 [3].

В данной работе предложена информационная модель процесса информационно-аналитического обеспечения регионального оператора ТКО, отличительной особенностью которой является обеспечение активной информационной поддержки принятия решений на всех этапах работы организации [4]. Это позволит сделать многие процессы более эффективными, прозрачными и контролируемыми [5].

Материалы и методы

Реализация эффективного и современного уровня информационного обеспечения регионального оператора ТКО невозможна без анализа информационных потоков, обеспечивающих его работу [6].

На рисунке 1 представлена структурная схема информационной модели обмена данными в системе регионального оператора ТКО.

Данная модель состоит из 4 основных контуров:

1. Руководство организации.
2. Отделы организации.
3. Сервера организации.
4. Служба безопасности.

В левой части рисунка 1 представлены внешние и внутренние источники информации, в правой части – указаны основные формируемые документы.

Руководство организации регионального оператора по обращению с ТКО формирует и направляет информацию текстового и электронного характера (нормативные документы, распоряжения и т. д.) [7]. Данный вид информации необходим для организации повседневной деятельности регионального оператора по обращению с ТКО и смежных предприятий в рамках законодательства РФ и инструктивных документов федеральной структуры ППК РЕО (публично-правовая компания «Российский экологический оператор») [8].

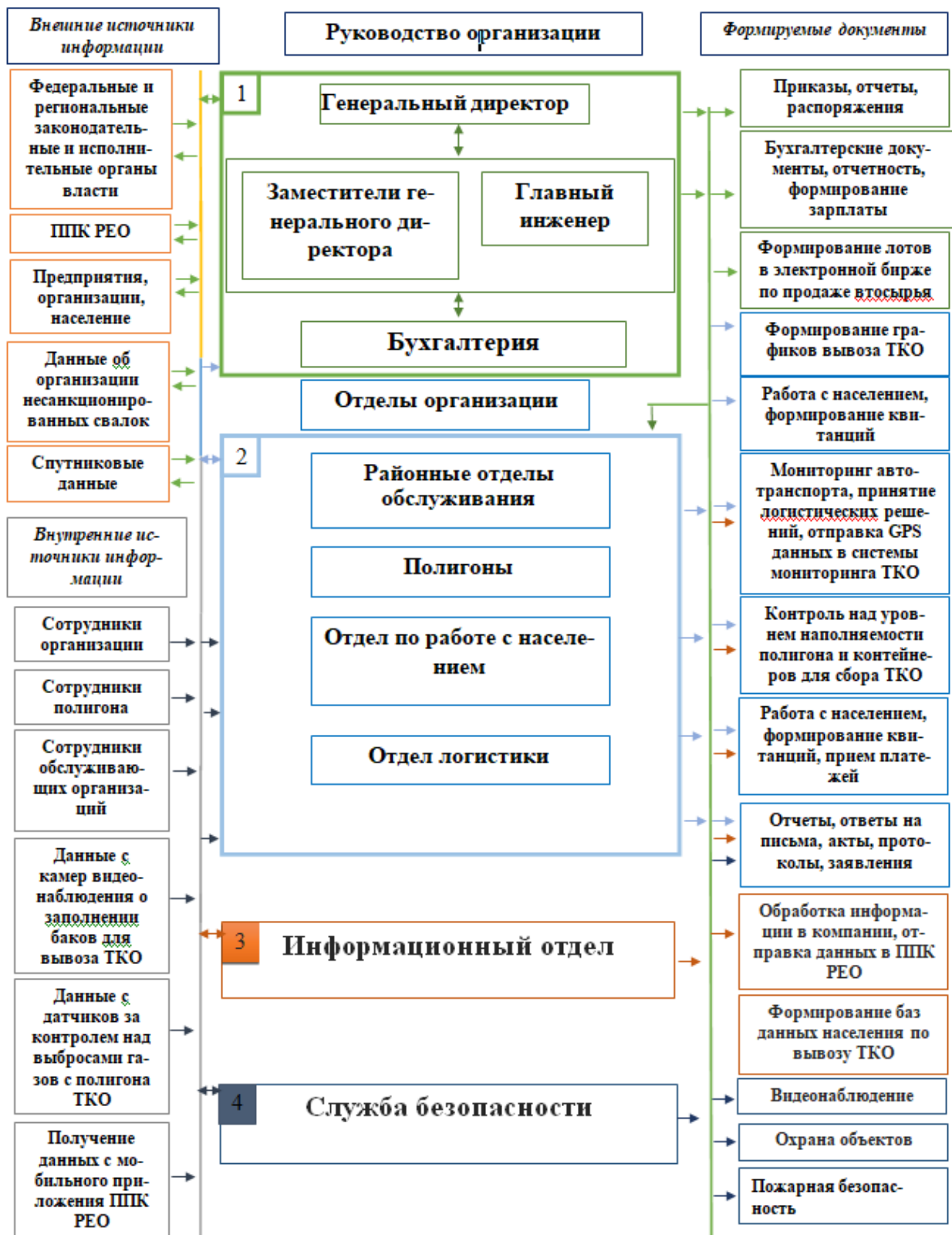


Рис. 1. Структурная схема информационной модели обмена данных в сети регионального оператора по обращению с ТКО

Fig. 1. Block diagram of the information model of data exchange in the network of a regional operator for the management of solid waste

В контур руководства организации поступает информация от федеральных, региональных законодательных органов власти, министерств и ведомств РФ, руководства ППК РЕО, письма от различных предприятий, населения, обслуживающих организаций [9]. Данная информация направлена на регулирование деятельности регионального оператора по обращению с ТКО в законодательной, налоговой, экологической и других сферах, а также деятельности по организации бесперебойной работы с соблюдением экологической безопасности при перевозке, переработке и захоронению ТКО [10]. Входные данные поступают в первую очередь к генеральному директору, а затем распространяется по всему контуру руководства организации (заместители генерального директора, главный инженер, главный бухгалтер), после чего уже поступает в виде внутренних распоряжений, приказов во все остальные контуры информационной системы организации [11].

Информация о работе регионального оператора по обращению с ТКО предоставляется в федеральные, региональные законодательные органы власти, министерства и ведомства РФ по их запросам. Текущая информация о работе регионального оператора предоставляется в ППК РЕО и на сайте организации [12].

В контур отделов организации входят: районные отделы обслуживания,

полигоны ТКО, отдел по работе с населением, отдел логистики. Все отделы организации тесно взаимодействуют друг с другом.

Районные отделы обслуживания представляют собой обособленные отделения, у которых в распоряжении имеется техника и оборудование для раздельного сбора, накопления и вывоза ТКО, пункты перегруза ТКО, а также персонал для работы с населением и организациями. Районные подразделения включены в общую защищенную телекоммуникационную сеть регионального оператора, через которую осуществляется обмен информацией о клиентах, обслуживаемых организациях, пунктах сортировки и переработки ТКО, пунктах сбора вторсырья [13].

Полигон представляет собой не только место, куда свозятся отходы, там должны быть установлены целые комплексы инфокоммуникационных устройств. В современных условиях необходимы комплексы видеонаблюдения, охранно-пожарной сигнализации, весовой, контроля наполняемости полигона, выделения газов в атмосферу для оценки экологической обстановки на полигоне и влияния на окружающую среду [14]. Все эти комплексы должны взаимодействовать между собой. На рисунке 2 представлена структурная схема алгоритма автоматизированного взаимодействия оператора по обращению с ТКО с контролирующими организациями.

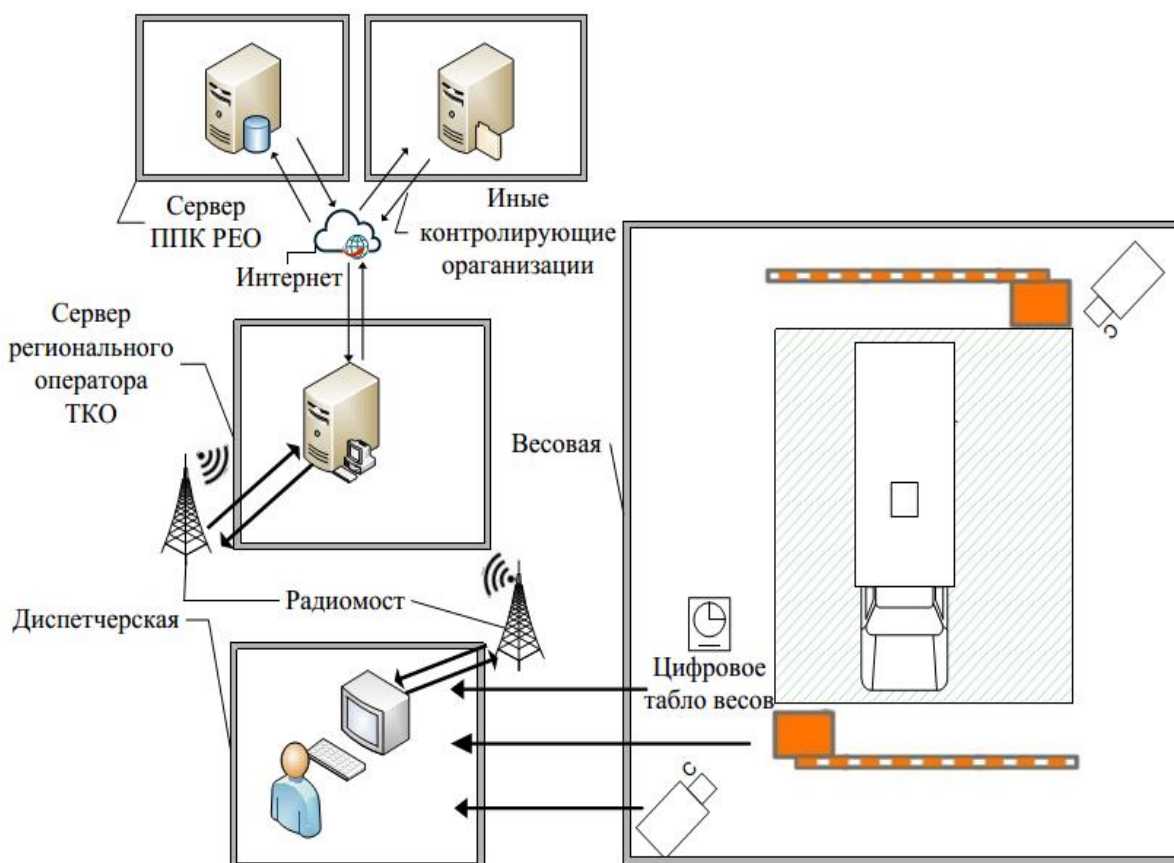


Рис. 2. Структурная схема алгоритма автоматизированного взаимодействия оператора по обращению с ТКО с контролирующими организациями

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for automated interaction between the MSW management operator and regulatory organizations

В настоящее время информация с полигонов должна в онлайн-режиме передаваться в ППК РЕО для мониторинга количества вывезенного ТКО. Весовые должны быть оборудованы автоматическими шлагбаумами на въезде и выезде и камерами видеонаблюдения для фиксации въезжающих и выезжающих машин [15]. В помещении работника, контролирующего взвешивание машин с ТКО, должен стоять персональный компьютер (ПК) с специализированным программным обеспечением (ПО) для вывода на экран изображения с камер и результатов взвешивания машин,

обеспечен доступ в Интернет для отправки этих данных в офис регионального оператора, в ППК РЕО и по запросу в прочие контролирующие организации.

Минимальный алгоритм работы системы для отправки данных о количестве поступающих на полигон ТКО должен выглядеть следующим образом:

1. Машина подъезжает к шлагбауму, и срабатывает камера распознавания номеров.
2. Камера заносит данные номера и времени в программу для контроля машины с ТКО и активирует реле для открытия шлагбаума.

3. Машина, заехав на весы, останавливается, происходит измерение веса машины с ТКО, эти данные и данные времени заносятся в базу данных.

4. Для достоверности камера фотографирует машину с привязкой по времени на весовой и открывает шлагбаум для выезда.

5. Процедура взвешивания пустой машины, когда машина выезжает с полигона, осуществляется по такому же алгоритму.

Программа рассчитывает вес доставленных ТКО и передаёт все полученные данные в офис регионального оператора и ППК РЕО.

Так как особенность полигона заключается в том, что обычно они находятся далеко за чертой города, встает вопрос о создании устойчивой интернет- и телефонной связи. Для передачи данных эффективно использовать радиомосты с помощью телекоммуникационного оборудования, а благодаря доступу в Интернет можно использовать систему микросот для обеспечения телефонной связи на полигоне [16].

Отдел по работе с населением является одним из самых важных в организации, данный отдел выполняет ряд функций:

1. Своевременно формирует квитанции и контролирует корректность начислений оплаты за вывоз ТКО.

2. Информировует граждан и организации об изменениях в договорах.

3. Консультирует население по всем вопросам, касающимся начислений и вывоза ТКО.

4. Актуализирует базу данных по лицевым счетам и собственникам.

Отдел логистики выполняет функции по контролю за транспортными средствами, за выходом их на рейс, за техническим состоянием, подготовкой к работе, за текущими и сезонными регламентными и ремонтными работами, проведением периодического технического осмотра и т.д. Также данный отдел должен своевременно выкладывать графики вывоза ТКО, при любой внештатной ситуации доводить информацию до отдела по работе с населением для дальнейшего информирования граждан и организации по срокам вывоза ТКО [17].

Контур информационного отдела выполняет следующие функции:

1. Контроль технического состояния клиентских персональных компьютеров (ПК) и иных технических офисных устройств.

2. Контроль технического состояния системы видеонаблюдения, системы контроля доступа, системы полигонов и других систем.

3. Контроль информационных платформ и своевременное обновление сайтов и прочих информационных ресурсов компании.

4. Осуществление защиты информации в компании, мониторинг сетевого трафика.

5. Осуществление информационного обмена между компанией и

организациями, осуществление обмена с приложениями, включая мобильные.

6. Резервирование всех данных компании.

Последний контур – это служба безопасности. Данная служба выполняет функции контроля над объектами организации, контроль доступа персонала к различным уровням компании, контроль за въездом и выездом машин на полигонах, контроль за состоянием объектов посредством видеонаблюдения и систем охранно-пожарной сигнализации, установление контроля за несанкционированным складированием мусора в пределах зоны ответственности организации.

Цифровизация в отрасли на сегодняшний день идет очень активно, ППК РЕО дает рекомендации по её продвижению и выполнению в соответствии с экологической программой страны [18].

Стоит отметить, что цифровизация региональных операторов является одним из ключевых направлений развития отрасли, что, в свою очередь, требует создание новых решений в этой области.

В 2022 г. по рекомендации и наставлению ППК РЕО у регионального оператора (РО) должны быть введены в эксплуатацию программные модули, обеспечивающие поддержку деятельности компании в части обращения с отходами, а именно:

- 1) модуль обработки треков мусоровозов;
- 2) модуль получения и передачи данных по объектам инфраструктуры обращения с отходами;

3) модуль сопоставления данных региональных операторов и субъектов РФ в части выполнения показателей федерального правительства;

4) модуль работы с тарифами объектов инфраструктуры;

5) модуль работы с тарифами региональных операторов;

6) модуль приема и визуализации данных о движении мусоровозов;

7) модуль приема и визуализации телеметрических данных о наполненности контейнеров;

8) модуль приема и визуализации данных автоматизированных систем весового контроля;

9) модуль расчета массы образования ТКО по субъектам РФ.

Данные модули позволяют в автоматизированном режиме собирать и анализировать фактические данные об обращении ТКО, что позволяет повысить качество территориальных и федеральной схем, более точно оценить обоснованность установленных тарифов, а также обеспечить более точную оценку состояния отрасли обращения с отходами в целом.

Также стоит упомянуть о участии региональных операторов в деятельности по улучшению экологического состояния страны. Они учувствуют в программе «Экомониторинг», которая была запущена ППК РЕО по поручению Минприроды России от 12.08.2021 г. № 02-16/228пр. [19].

Помимо этого, региональные операторы должны в плане информационного

учета и иной информационной деятельности руководствоваться Постановлением Правительства РФ от 20 мая 2022 г. № 913 «Об утверждении Положения о федеральной государственной информационной системе учета твердых коммунальных отходов». Согласно этому постановлению, они являются поставщиками информации и обязаны размещать её в информационной системе, руководствуясь Федеральным законом «Об отходах производства и потребления», а также и иными нормативными правовыми актами [20].

Следует отметить, что региональные операторы в 2023 г. активно используют электронную торговую площадку *etp.reo.ru*, благодаря которой удается находить поставщиков и покупателей вторсырья для дальнейшей его переработки. Только за 2022 г. на площадке зарегистрировано 572 участника и размещено 210 лотов на общую сумму 428 млн руб. Участие регионального оператора на данной площадке помогает снизить объемы отправляемого на полигон вторсырья примерно в 2 раза и способствует выполнению Указа Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» в части снижения объемов отходов, направляемых на полигоны [21].

Формирование приказов, распоряжений, отчетов отделами в современных условиях существующие программные продукты позволяют делать и

обрабатывать в электронном виде, при этом передача между дальними контурами занимает минимальное время, увеличивая оперативность ответов, и позволяет снизить расходы бумаги. Одним из отличных технических решений является использование системы «Дело-WEB», которая позволяет удаленно подключиться к серверу и ответить на поручения документа, подписав его своей электронной подписью [22].

Для формирования зарплаты и ведения бухгалтерской отчетности широко используются программные продукты *1С: Зарплата и кадры* и *1С: Бухгалтерия*.

Своевременное выставление квитанций, актуализация базы данных населения, мониторинг изменения количества жильцов – все это ложится на отдел по работе с населением. Для выполнения всех этих функций оперативно необходима автоматизация данных процессов для уменьшения влияния человеческого фактора и увеличения качества обслуживания населения за счет повышения скорости его обслуживания. Комплекс для автоматизации такого рода задач должен включать в себя следующие функции:

1. Обеспечить точность начислений за услуги по сбору и утилизации ТКО.
2. Повысить коммерческий контроль по входящим платежам, материальным расходам, расчетам с поставщиками услуг.
3. Обеспечить качество обслуживания. Прием, распределение и контроль

над исполнением заявок от населения по сбору и утилизации отходов, осуществлять контроль их исполнения.

4. Обладать возможностью интеграции с внешними системами: бухгалтерия, органы соцзащиты, оператор ЭДО (цифровой документооборот с госорганами), банки, почта России, платежные системы, пункты приема платежей, эквайринг.

5. Выполнять информирование потребителей по различным каналам связи.

6. Иметь возможность выгрузки в ГИС ЖКХ данных.

7. Соответствовать Федеральному закону от 27.07.2006 г. 152-ФЗ «О персональных данных».

Оптимальным выбором будет использовать программный продукт «СТЕК ЖКХ» для решения нужд регионального оператора по вывозу ТКО.

Конечно, типовые конфигурации 1С можно использовать для отдела бухгалтерии, но они будут нуждаться в доработке по причине необходимости контроля над вывозом ТКО у юридических лиц, а также расчет всех сверхнормативов и корректные выставления счетов. Также в настоящее время многие юридические лица активно переходят на систему электронного документооборота для минимизации затрат на получение и отправку счетов и документов, а также увеличение скорости получения документов другими организациями и ведомствами. Всё это позволяет выполнять

готовый программный продукт СТЕК ЖКХ с модулем для юридических лиц.

Для решения задач, связанных с визуализацией данных о движении мусоровозов, наполняемости контейнеров, обработки треков мусоровозов, можно использовать систему «Сирена ЖКХ», которая активно используется в Курской области многими компаниями. В данной системе полученные данные сохраняются в базе данных диспетчера, что позволяет подключаться к сети, получать данные по мере надобности и затем анализировать их без необходимости подключения к серверу. Кроме того, это разрешает использовать данные, полученные диспетчерами по локальной сети и таким образом минимизировать трафик [23].

Компания также должна заботиться о сохранности персональных данных. Законные основания для обработки персональных данных:

- Конституция РФ;
- Трудовой кодекс РФ № 197-ФЗ от 30.12.2001 г.;
- приказ генерального директора организации.

Поэтому для защиты передаваемой информации, обеспечения информационной безопасности такого рода компанией используются организационно-технические комплексы защиты данных, а также серверное оборудование для резервирования и передачи данных. Сервер для защиты данных должен включать в себя:

- SSH-ключи;
- фаерволы;
- VPN;
- инфраструктуру открытых ключей (PKI);
- систему резервирования данных;
- антивирусное ПО.

Самое главное, что серверное оборудование и сеть в целом должны проходить процедуру аудита.

Результаты и их обсуждение

Разработана структурная схема информационной модели обмена данных в сети регионального оператора по обращению с ТКО, показывающая не только информационное взаимодействие внутри компании, но и с всеми внешними организациями. Создан алгоритм работы согласно новым требованиям по автоматическому мониторингу принятых на полигон отходов, позволяющий создать на полигоне приема ТКО систему, благодаря которой можно выполнять требования ППК РЕО в плане информационной передачи данных по поступившим отходам. Предложено техническое готовое решение для региональных операторов по быстрому разворачиванию и автоматизации своей деятельности.

Сформулированы требования к работе каждого отдела и их взаимодействию в современной компании по вывозу ТКО.

В статье приведены, какими минимальными функциями должны обладать программные продукты для выполнения актуальных задач регионального оператора, которые ставят не только население, но и органы власти и ППК РЕО.

В исследовании показаны условия работы организации в сфере вывоза мусора с точки зрения информационного учета отходов.

Выводы

Предложенная информационная модель информационного обмена в сети регионального оператора по вывозу ТКО может служить основой в процессе разработки варианта типовой инфокоммуникационной системы.

Анализ всех информационных потоков позволяет предложить оптимизацию варианта архитектуры и топологии инфокоммуникационной системы для типовых предприятий данного направления. В дальнейшем планируется использовать разработанные методы, модели и алгоритмы для реализации программного решения, которое позволит повысить уровень предоставляемого сервиса и протестировать их работу путем внедрения в действующие предприятия и организации региональных операторов области.

Список литературы

1. Путитнцева Н. А. Роль региональных операторов в организации раздельного накопления отходов // Петербургский экономический журнал. 2020. Т. 1, № 2. С. 101–111.

2. Буданов И. А. Состояние системы утилизации отходов и использования вторичных ресурсов в РФ // Научные труды: Институт народно-хозяйственного прогнозирования РАН. 2019. № 17. С. 119–142.
3. Гольцова И. А., Гуламов А. А. Информационное обеспечение участка железной дороги // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 7, № 2. С. 6–11.
4. Чекалин В. С. Обзор мер по организации управления отходами в России как фактора повышения ее энергоэффективности // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2018. Т. 4, № 112. С. 68–105.
5. Багдасарян В. А. Проблемы экологической безопасности в сфере утилизации бытовых и промышленных отходов в окружающую среду // Вестник экспертного совета. 2022. № 2(29). С. 74–82.
6. Марьев В. А., Смиртова Т. Г. Формирование экотехнопарков в условиях РФ // Твердые бытовые отходы. 2017. № 3. С. 21–23.
7. Титова О. В. Разработка предложений по совершенствованию утилизации и переработки бытовых отходов на примере ООО «Капталстрой» г. Липацк // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2022. № 2. С. 218–229.
8. Комков В. И. Системная организация обращения с отходами автотранспорта в регионах // Твердые бытовые отходы. 2022. № 1. С. 19–21.
9. Чернышин П. В. B2C-сервис «Агрегатор вывоза строительных отходов» // Reduce reuse recycle. 2020. Т. 3, № 15. С. 40–41.
10. Левакова И. В., Арустамов Э. А. Проблемы реализации программы комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами // Отходы и ресурсы. 2021. Т. 8, № 1. С. 1–8.
11. Левакова И. В., Арустамов Э. А. О необходимости комплексного подхода к реализации программы утилизации отходов в год экологии РФ (на примере г. Москва) // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2017. № 3. С. 91–98.
12. Романенко И. И., Петровнина И. Н., Кондратьев К. А. Автоматизация систем сбора и переработки твердых бытовых отходов // Форум молодых ученых. 2019. Т. 29, № 1. С. 52–57.
13. Проблема раздельного сбора твердых бытовых отходов в России / В. О. Ноткина, А. И. Слободенюк, В. С. Невиницына, Ю. А. Осипкина // Студенческая наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и просвещение, 2021. С. 29–31.
14. Конарев Д. И., Гуламов А. А. Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов морских судов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24, № 1. С. 100–105.

15. Конарев Д. И., Гуламов А. А. Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов судов на базе технологии предварительного обучения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. № 10(2). С. 1–12. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.011>.
16. Бузько И. Т. Применение цифровых радиорелейных систем в современном мире // Science and Technology Research: III Международная научно-практическая конференция. Петрозаводск: Новая наука, 2022. С. 41–47.
17. Касапов А. В., Заиченко Г. В. Утилизация и автоматизация переработки бытовых отходов // Юный ученый. 2017. № 3-1(12). С. 31–36.
18. Рубинов В. В. Оценка динамики роста отходов в Санкт-Петербурге // Системный анализ и логистика. 2020. Т. 3, № 25. С. 3–8.
19. Рубинов В. В. Использование математических моделей теории систем массового обслуживания для описания и анализа систем работы с отходами в мегаполисах // Системный анализ и логистика. 2021. Т. 4, № 34. С. 28–35.
20. Рубинов В. В., Фетисов В. А. Разработка модели оптимизации потоков ТКО на уровне маршрутов // Системный анализ и логистика. 2021. Т. 30, № 4. С. 68–75.
21. Rubinov V. V. Problems of a Modern Approach to the Technological Process of Waste Management Conference Proceedings: 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) // IEEE. 2021. N 1. С. 50–53.
22. Иванцова Е. А. Проблемы и перспективы управления твердыми бытовыми отходами // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. 2016. № 5. С. 109–113.
23. Юсуфова О. М., Шиболденков В. А., Андреева А. А. Анализ технологий цифровой логистики для автоматизации и сервисной интеграции складских процессов организации // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10, № 3. С. 1759–1772.

References

1. Putitntseva N. A. Rol' regional'nyh operatorov v organizacii razdel'nogo nakopleniya othodov [The role of regional operators in the organization of separate waste accumulation]. *Peterburgskij ekonomicheskij zhurnal = St. Petersburg Economic Journal*, 2020, vol. 1, no. 2, pp. 101–111.
2. Budanov I. A. Sostoyanie sistemy utilizacii othodov i ispol'zovaniya vtorichnyh resursov v RF [The state of the waste disposal system and the use of secondary resources in the Russian Federation]. *Nauchnye trudy: Institut narodno-hozyajstvennogo prognozirovaniya RAN = Scientific Papers: Institute of National Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 2019, no. 17, pp. 119–142.
3. Goltsova I. A., Gulamov A. A. Informacionnoe obespechenie uchastka zheleznoj dorogi [Information support of the railway section]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

gosudarstvennogo universiteta = *Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 6–11.

4. Chekalin V. S. Obzor mer po organizacii upravleniya othodami v Rossii kak faktora povysheniya ee energoeffektivnosti [Review of measures for waste management in Russia as a factor in improving its energy efficiency]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta = Proceedings of the St. Petersburg State University of Economics*, 2018, vol. 4, no. 112. pp. 68–105.

5. Bagdasaryan V. A. Problemy ekologicheskoy bezopasnosti v sfere utilizacii bytovyh i promyshlennykh othodov v okruzhayushchuyu sredu [Problems of environmental safety in the field of disposal of household and industrial waste into the environment]. *Vestnik ekspertnogo soveta = Bulletin of the Expert Council*, 2022, no. 2(29), pp. 74–82.

6. Maryev V. A., Smirnova T. G. Formirovanie ekotekhnoparkov v usloviyah RF [Formation of ecotechnoparks in the conditions of the Russian Federation]. *Tverdye bytovye othody = Solid Household Waste*, 2017, no. 3, pp. 21–23.

7. Titova O. V. Razrabotka predlozhenij po sovershenstvovaniyu utilizacii i pererabotki bytovyh othodov na primere OOO "Kapitalstroy" g. Lipack [Development of proposals for improving the disposal and processing of household waste on the example of Kapitalstroy LLC, Lipetsk]. *Vestnik Moskovskogo finansovo-yuridicheskogo universiteta MFYUA = Bulletin of the Moscow University of Finance and Law MFUA*, 2022, no. 2, pp. 218–229.

8. Komkov V. I. Sistemnaya organizaciya obrashcheniya s othodami avtotransporta v regionah [Systemic organization of waste management of motor vehicles in the regions]. *Tverdye bytovye othody = Solid Household Waste*, 2022, no. 1, pp. 19–21.

9. Chernyshin P. V. B2C-servis "Agregator vyvoza stroitel'nykh othodov" [B2C-service "Aggregator of construction waste removal"]. *Reduce reuse recycle*, 2020, vol. 3, no. 15, pp. 40–41.

10. Levakova I. V., Arustamov E. A. Problemy realizacii programmy kompleksnoj sistemy obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi othodami [Problems of implementing the program of a complex system of solid municipal waste management]. *Othody i resursy = Waste and Resources*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 1–8.

11. Levakova I. V., Arustamov E. A. O neobkhodimosti kompleksnogo podhoda k realizacii programmy utilizacii othodov v god ekologii RF (na primere g. Moskva) [On the need for an integrated approach to the implementation of the waste disposal program in the year of Ecology of the Russian Federation (on the example of Moscow)]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Se-riya: Estestvennye nauki = Bulletin of the Moscow State Regional University. Family: Natural Sciences*, 2017, no. 3, pp. 91–98.

12. Romanenko I. I., Petrovnina I. N., Kondratiev K. A. Avtomatizaciya sistem sbora i pererabotki tverdykh bytovyh othodov [Automation of solid waste collection and processing systems]. *Forum molodykh uchenykh = Forum of Young Scientists*, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 52–57.

13. Notkina V. O., Slobodenyuk A. I., Nevinitsyna V. S., Osipkina Yu. A. [The problem of separate collection of solid household waste in Russia]. *Studencheskaya nauka: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii. Sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Student science: current issues, achievements and innovations. Collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference]. Penza, Science and Education Publ., 2021, pp. 29–31. (In Russ.)

14. Konarev D. I., Gulamov A. A. Sintez arhitektury nejronnoj seti dlya raspoznavaniya obrazov morskikh sudov [Synthesis of neural network architecture for the cognition of images of marine vessels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 100–105.

15. Konarev D. I., Gulamov A. A. Sintez arhitektury nejronnoj seti dlya raspoznavaniya obrazov sudov na baze tekhnologii predvaritel'nogo obucheniya [Synthesis of neural network architecture for the cognition of ship images based on pre-training technology]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*, 2022, no. 10(2), pp. 1–12. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.011>.

16. Buz'ko I. T. [Application of digital radio relay systems in the modern world]. *Science and Technology Research. III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya* [Science and Technology Research. III International Scientific and Practical Conference]. Petrozavodsk, Novaya nauka Publ., 2022, pp. 41–47. (In Russ.)

17. Kasapov A. V., Zaichenko G. V. Utilizaciya i avtomatizaciya pererabotki bytovykh othodov [Utilization and automation of recycling of household waste]. *Yunyj uchenyj = Young Scientist*, 2017, no. 3-1(12), pp. 31–36.

18. Rubinov V. V. Ocenka dinamiki rosta othodov v Sankt-Peterburge [Assessment of the dynamics of waste growth in St. Petersburg]. *Sistemnyj analiz i logistika = System Analysis and Logistics*, 2020, vol. 3, no. 25, pp. 3–8.

19. Rubinov V. V. Ispol'zovanie matematicheskikh modelej teorii sistem massovogo obsluzhivaniya dlya opisaniya i analiza sistem raboty s othodami v megapolisah [Using mathematical models of the theory of mass maintenance systems to describe and analyze waste management systems in megalopolises]. *Sistemnyj analiz i logistika = System Analysis and Logistics*, 2021, vol. 4, no. 34, pp. 28–35.

20. Rubinov V. V., Fetisov V. A. Razrabotka modeli optimizacii potokov TKO na urovne marshrutov [Development of a model for optimizing MSW flows at the route level]. *Sistemnyj analiz i logistika = System Analysis and Logistics*, 2021, vol. 30, no. 4, pp. 68–75.

21. Rubinov V. V. Problems of a Modern Approach to the Technological Process of Waste Management Conference Proceedings: 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). *IEEE*, 2021, no. 1, pp. 50–53.

22. Ivantsova E. A. Problemy i perspektivy upravleniya tverdymi bytovymi othodami [Problems and prospects of solid waste management]. *Vestnik Volgogradskogo*

gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Ekonomika = Bulletin of Volgograd State University. Series 3: Economics, 2016, no. 5, pp. 109–113.

23. Yusufova O. M., Shiboldenkov V. A., Andreeva A. A. Analiz tekhnologij cifrovoj logistiki dlya avtomatizacii i servisnoj integracii skladskih processov organizacii [Analysis of digital logistics technologies for automation and service integration of organization's warehouse processes]. *Voprosy innovacionnoj ekonomiki = Issues of Innovative Economics*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 1759–1772.

Информация об авторах / Information about the Authors

Александров Дмитрий Владимирович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: di46ma@mail.ru, ORCID: 0009-0005-3456-2786

Dmitry V. Alexandrov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: di46ma@mail.ru, ORCID: 0009-0005-3456-2786

Гуламов Алишер Абдумаликович, доктор физико-математических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: profgulamov@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9334-6710

Alisher A. Gulamov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: profgulamov@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9334-6710

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-130-147>

УДК 004.891

Модель прототипа экспертной системы для формирования единого классификатора компетенций

А. В. Брежнев¹, С. Д. Дорожкин^{1✉}, П. С. Тивиков¹

¹ Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
Стремянный пер., д. 36, г. Москва 115054, Российская Федерация

✉ e-mail: Dorozhkin_SD@outlook.com

Резюме

Цель исследования заключается в описании процесса создания экспертной системы, которая сопоставляет модели компетенций и профессиональные стандарты с актуальными потребностями рынка труда.

Методы исследования основаны на анализе принципов формирования компетенций и включают системный анализ требований рынка труда, применение методов сравнительного анализа компетенций выпускников и потребностей работодателей с использованием статистических данных. Исследование направлено на решение фундаментальной задачи сопоставления навыков специалистов с потребностями рынка труда. В рамках данной работы был проведен обширный поиск источников данных, в том числе анализ отчетов о трудоустройстве выпускников и требований, предъявляемых к специалистам, в ходе которого было выявлено несоответствие компетенций выпускников и потребностей работодателей.

Результаты. В результате исследования была создана единая база данных, содержащая сведения о вузах, их направлениях, компетенциях и выпускниках, а также сформулированы требования к будущей экспертной системе, разработана ее архитектура, описана модель представления знаний о соответствии. Данная система сможет предоставлять рекомендации по улучшению компетенций на основе сопоставления требований рынка труда.

Заключение. Экспертная система, созданная на основе данной работы, предоставляет оперативные возможности для решения вопросов соответствия спроса и предложения на рынке труда, повысит эффективность обучения, поспособствует удовлетворению потребности работодателей в опытных специалистах. Данная концепция имеет ряд положительных сторон, такие как увеличение эффективности обучения, сокращение временных ресурсов, публичность и доступность. Такая система позволит повысить конкурентоспособность соискателей, а также удовлетворить организации, нуждающиеся в опытных специалистах.

Ключевые слова: рынок труда; цифровая экономика; экспертная система; стратегическое планирование; государственное планирование.

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

Для цитирования: Брежнев А. В., Дорожкин С. Д., Тивиков П. С. Аналитическое моделирование эластографии молочной железы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 130–147. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-130-147>.

© Брежнев А. В., Дорожкин С. Д., Тивиков П. С., 2024

Поступила в редакцию 18.01.2024

Подписана в печать 15.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(1): 130–147

Model of a Prototype Expert System for the Formation of a Simple Classifier of Competencies

Alexey V. Brezhnev¹, Sergey D. Dorozhkin¹ ✉, Petr S. Tivikov¹

¹ Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny side-street, Moscow 115054, Russian Federation

✉ e-mail: Dorozhkin_SD@outlook.com

Abstract

The purpose of the research is to describe the process of creating an expert system that compares competency models and professional standards with the current needs of the labor market.

Methods are based on an analysis of the principles of developing competencies and include a systematic analysis of labor market requirements, the use of methods for comparative analysis of graduates' competencies and the needs of employers using statistical data. The research is aimed at solving the fundamental problem of matching the skills of specialists with the needs of the labor market. As part of this work, an extensive search of data sources was carried out, including an analysis of graduate employment reports and requirements for specialists, during which a discrepancy between the competencies of graduates and the needs of employers was identified.

Results. As a result of the research, a unified database was created containing information about universities, their areas, competencies and graduates, as well as requirements for the future expert system were formulated, its architecture was developed, and a model for representing knowledge about compliance was described. This system will be able to provide recommendations for improving competencies based on a comparison of labor market requirements.

Conclusion. The expert system created on the basis of this work provides operational capabilities for solving issues of matching supply and demand in the labor market, will increase the effectiveness of training, and will help meet the needs of employers for experienced specialists. This concept has several positive aspects, such as increasing the efficiency of training, reducing time resources, publicity and accessibility. Such a system will increase the competitiveness of applicants, as well as satisfy organizations in need of experienced specialists.

Keywords: labor market; digital economy; expert system; strategic planning; state planning.

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

For citation: Brezhnev A. V., Dorozhkin S. D., Tivikov P. S. Model of a Prototype Expert System for the Formation of a Simple Classifier of Competencies. *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): 130–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-130-147>.

Received 18.01.2024

Accepted 15.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

Трансформация запросов общества в последние годы привела к необходимости качественных изменений в

процессе формирования навыков будущих специалистов, повышению конкурентоспособности на рынке труда. Необходимость этих изменений обусловлена

проблемой согласования умений соискателей с потребностями рынка труда.

Эта проблема показывает, насколько важно изменить подход к процессу получения образования.

Глобальная задача вхождения человека в социальный мир, его адаптации поднимает вопрос об обеспечении образованием более полного, личностно и социально интегрированного результата. В качестве общего определения результата образования выступило понятие «компетенция / компетентность», что стало новой парадигмой образовательного процесса. Из всего вышесказанного следует, что на данный момент существует необходимость в разработке механизма, позволяющего устранить пробел между компетенциями соискателей и требованиями работодателей. Решением может стать разработка экспертной системы.

Целью статьи является описание процесса создания экспертной системы, которая сопоставляет модели компетенций и профессиональные стандарты с потребностями рынка труда.

В ходе работы были поставлены следующие задачи:

1) анализ профессиональных стандартов и методологий формирования моделей компетенций в образовательных учреждениях РФ;

2) обоснование разработки экспертной системы для решения проблем с несоответствия спроса и предложения на рынке труда;

3) формирование требований к экспертной системе для решения задач по

установлению соответствия компетенций требованиям работодателей;

4) разработка архитектуры концепта экспертной системы;

5) описание модели представления знаний о соответствии.

Объектом данной работы является рынок труда и Министерство науки и высшего образования РФ. Предметом исследования является разрыв между компетенциями выпускников и требованиями работодателей.

Сами по себе экспертные системы не являются новшеством. О них начали серьезно говорить уже в 80-е годы прошлого века. Тогда зародилась идея, что экспертов могут заменить программные решения, которые имели бы возможность давать ответы на вопросы в определенных областях [1].

Суть экспертных систем состоит в сохранении знаний для их последующего использования теми, кто этими знаниями не обладает или обладает в недостаточной степени. Более того, экспертная система предоставляет лучшие альтернативы решения поставленных задач, оказывая тем самым помощь в конкурентной борьбе.

Экспертные системы для достижения высокой эффективности обладают следующими особенностями:

– четко определенная предметная область;

– четкое разделение фактов и выводов;

– способность принимать решения в условиях неопределенности;

– интерпретация полученных результатов и принимаемых решений;

– результат отображается в виде списка действий.

Наибольшее распространение экспертные системы получили в сферах экономики, бухгалтерского учета, сферах различных видов производства, а также медицине. Свое место системы нашли и в образовании [2].

В сфере образования экспертные системы используются для следующих задач:

- распознавание характеристик учащихся;
- прогнозирование успеваемости учащихся;
- анализ успеваемости учащихся;
- базовая оценка компетентности учащихся;
- оценка образования на основе характера;
- оценка академических программ и т. д. [3].

Вариантов применений много. Основное их направление – поддержка достижений учащихся [3].

Экспертные системы также используются в качестве учебного пособия, поскольку они оснащены уникальными функциями, которые позволяют пользователям задавать вопросы в различном формате.

Экспертная система способна взять на себя управление педагогическим процессом, составляя методику обучения с помощью базы правил, составленной экспертом. Анализ и интерпретация результатов тестирования позволяют иметь представление о том, какие знания имеет учащийся имеет. Эта информация

позволяет выбрать направление процесса обучения [4].

Экспертная система может быть применена для решения проблемы и на рынке труда, с которой сталкиваются все его стороны.

После окончания обучения перед выпускником возникает необходимость в поиске работы. Однако запросы работодателей на рынке труда очень часто не совпадают с компетенциями, полученными выпускниками на выходе после завершения обучения. Это вполне логично, ведь рынок меняется постоянно, а если учесть скорость этого процесса, то становится понятно, почему образовательные организации реагируют на него с опозданием [5; 6].

Формирование компетенций напрямую зависит от федеральных государственных образовательных стандартов ФГОС, которые требуют проработки и дополнительной деятельности от коллектива образовательных организаций. ФГОС из-за предметной направленности затрудняет освоение компетенций должного качества [7].

В итоге получается проблемная ситуация как для выпускников, так и организаций, требующих от соискателей определенных умений. Первые, закончив обучение, ожидают найти работу, которая будет соответствовать их специальности, а также удовлетворять их запросам. Но при отсутствии компетенций добиться этого не получается [8]. Соискателям приходится повышать свои компетенции либо менять направление поиска [9].

Работодатели же испытывают трудности с набором специалистов. В 2021 г. наблюдался рост потребности в IT-специалистах в связи с проведением масштабной цифровизации экономики [10]. Пандемия ускорила эти процессы в десятки раз, что привело к серьезному дисбалансу между спросом и предложением на рынке труда.

ИТ-сектор продолжает динамично развиваться. В этих условиях многие работодатели отмечают, что молодые соискатели не обладают необходимыми знаниями и умениями, чтобы после окончания учебного заведения сразу приступить к работе. Проблема недостаточной подготовленности молодежи к трудовой жизни возникает преимущественно из-за «пробелов» в современных образовательных программах. Образовательные программы, действующие в настоящее время, абсолютно не учитывают практическую составляющую профессиональной подготовки специалистов [11].

В связи с этим у работодателей возникает необходимость в проведении дополнительного дообучения соискателей [12]. При этом они подчеркивают, что в некоторых случаях им проще трудоустроить специалиста с уже имеющимся опытом работы [13].

Исследования Центра мониторинга развития промышленности (ЦМРП), в котором участвовало 500 руководителей крупных предприятий, показывают, что лишь 63% из них считают, что студенты получают хорошие теоретические знания (рис. 1). И 48% считают, что студенты не испытывают проблем с недостатком подготовки к практической

работе (рис. 2). Эти данные лишь подтверждает наличие проблемы с компетенциями у большей части нынешних выпускников [14].

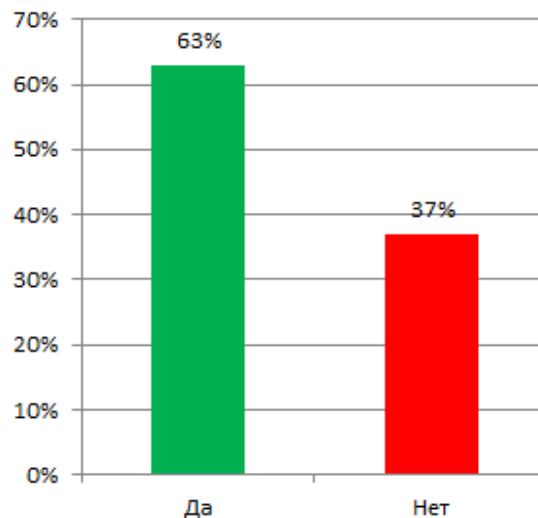


Рис. 1. Результаты ответов на вопрос: «Считаете ли Вы, что студентам дают хорошие теоретические знания?» [14]

Fig.1. The results of the answers to the question: "Do you think that students are given good theoretical knowledge?" [14]

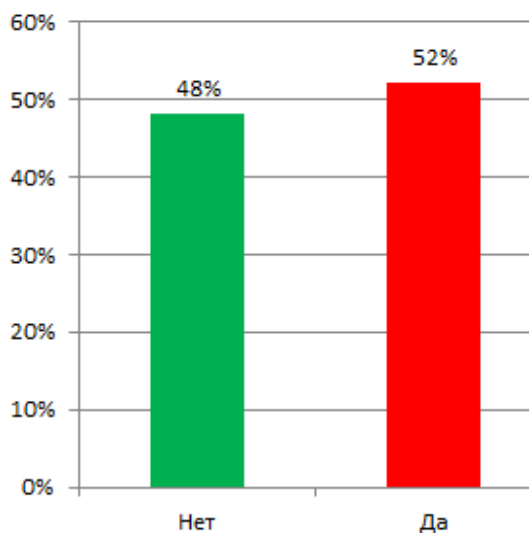


Рис. 2. Результаты ответов на вопрос: «Считаете ли Вы, что студентам не хватает подготовки к практической работе?» [14]

Fig.2. The results of the answers to the question: "Do you think that students lack preparation for practical work?" [14]

Государственные требования к выпускникам, сформулированные даже в новых образовательных программах, отстают от современных потребностей рынка труда. Это касается и «мягких навыков» [15].

«Мягкие навыки» являются надпрофессиональными компетенциями, которые помогают решать жизненные задачи и работать с другими людьми. Специалист должен уметь задавать вопросы, слушать и слышать собеседника, уметь договариваться, иметь аналитические способности и т. д. Таких навыков много, и эксперты расходятся во мнении, какие навыки наиболее важны и ценны [16].

Все это побуждает работодателей принимать участие в разработке и реализации образовательных программ. И это имеет смысл, так как образовательные организации могут приглашать специалистов из организаций, четко формулировать результаты производственной практики, а также лучше изучать потребности рынка [17].

Научная новизна – модель экспертной системы формирования единого классификатора компетенций.

Экспертная система поможет в решении следующих *практических задач*:

- 1) формирование индивидуального плана развития учащихся и работников;
- 2) обоснование индивидуального выбора программы обучения;
- 3) согласование программ обучения с потребностями рынка труда на различных уровнях;

- 4) оказание образовательных и профориентационных консультационных услуг;

- 5) построение и реализации программ и процедур сертификации специалистов;

- 6) эффективное взаимодействие с глобальными и национальными вендорами, заинтересованными в обучении пользователей своим продуктам (Яндекс, 1С, IBS).

Данная проблема актуальна для многих стран и, конечно, привлекает внимание многих исследователей, которые пытаются решить проблему разрыва между спросом и предложением рабочей силы [18].

Некоторые специалисты уже проводили исследования в этом направлении, предлагая концептуальную модель модуля сбора данных для экспертной системы с сайта вакансий для анализа образовательными организациями для последующего улучшения образовательных программ [19].

Мы предлагаем пойти немного в другом направлении. Как уже было написано выше, для преодоления ситуации, с которой столкнулся рынок труда, может быть использована экспертная система, которая давала бы конкретные советы по улучшению компетенций соискателей, показывала бы ситуацию на рынке труда людям, ищущим работу, а также образовательным организациям, и предложение этого рынка работодателям.

Экспертная система будет предназначена не только для образовательных организаций, но и для соискателей, уже

закончивших обучение. Каждый сможет воспользоваться системой для получения рекомендаций по повышению качества своих компетенций.

В данном направлении экспертная система еще не использовалась. В теории она может значительно повысить качество предложения на рынке труда. Организации, предлагающие образовательные услуги, смогут отслеживать рынок труда, проверять актуальность своих образовательных программ. Люди, заинтересованные в поиске работы, смогут сроки получать рекомендации по квалификациям, которые необходимо улучшить, чтобы быть конкурентоспособным, и список мест, где это можно

сделать. Работодатели в таком случае получают рабочую силу необходимого уровня.

При нынешней неопределенности, с которой сталкиваются выпускники, а также неудовлетворенностью работодателей, касательно отсутствия желаемого качества предложения на рынке труда, данная экспертная система может дать толчок в сокращении разрыва между компетенциями соискателей и требуемых при приеме на работу, удовлетворив потребности всех сторон [6].

Материалы и методы

Создание экспертной системы подразумевает разработку концептуальной модели, представленной ниже (рис. 3).

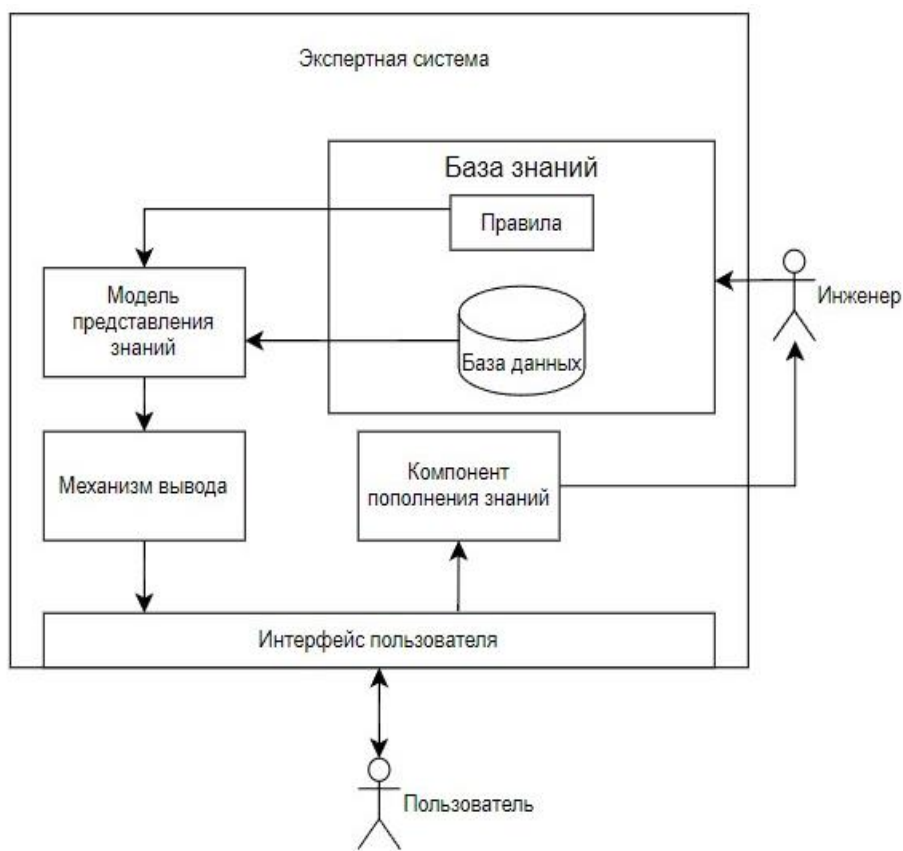


Рис. 3. Архитектура экспертной системы

Fig. 3. Expert system architecture

Концептуальная модель экспертной системы для формирования единого классификатора компетенций включает следующие компоненты:

1. База знаний – это хранилище знаний и правил, используемых системой для классификации компетенций.

2. База данных – место хранения всех данных, которые используются базой знаний. Она содержит информацию о различных компетенциях и связанных с ними навыках и опыте, институтах и т. д. База данных входит в базу знаний.

3. Модель представления знаний – это модель, используемая для представления знаний в базе знаний. Данный компонент предназначен для связи данных из базы данных между собой на основе правил, взятых из базы знаний. Для этого может быть использована аналогия, которая позволяет описывать связи между различными компетенциями и связанными с ними навыками и опытом.

4. Механизм вывода – это модуль системы, который использует базу знаний для выявления связей между различными компетенциями и их классификацией.

5. Интерфейс пользователя – это интерфейс, который позволяет пользователю вводить данные и просматривать результаты классификации компетенций. Он также может быть использован для поиска информации о конкретных компетенциях и связанных с ними навыках и опыте.

6. Компонент обогащения знаний – компонент, позволяющий вносить

изменения в базу знаний или базу данных. Пользователь может вводить данные через интерфейс в зависимости от прав, предоставленных системой. Миннауки сможет вносить изменения, связанные с ФГОС, образовательные организации меняют данные, связанные с обучением, работодатели меняют или добавляют требования к абитуриенту. Компонент обогащения знаний отобразит подсказку, если введенные данные аналогичны существующей информации, и предоставит возможность как произвести замену, так и добавить существующую информацию, не изменяя ее.

7. Инженер экспертных систем. Инженер контролирует данные, которые перемещаются из компонента знаний в базу данных, обеспечивая их качество и соответствие. При необходимости он также может вносить изменения в базу знаний.

Разработка прототипа экспертной системы включает в себя следующие этапы:

1. Сбор данных – это этап, на котором собираются данные о различных компетенциях и связанных с ними навыках и опыте.

2. Анализ данных – на этом этапе данные анализируются и структурируются для использования в базе знаний. Данные приводятся в определенный формат, создаются связи между различными компетенциями.

3. Создание базы знаний. На этом этапе создается база знаний, содержащая информацию о различных

компетенциях и связанных с ними навыках и опыте.

4. Тестирование системы – этап, на котором проверяется работоспособность экспертной системы и точность ее выводов. Для этого используются тестовые данные, которые не использовались при обучении модели.

5. Уточнение базы знаний – на основе результатов тестирования и отзывов пользователей системы можно уточнить базу знаний и правила, используемые для классификации компетенций.

6. Разработка и обслуживание системы. На этом этапе система разрабатывается и поддерживается, чтобы оставаться актуальной и эффективной. Это может включать добавление новых компетенций и улучшение пользовательского интерфейса.

7. Использование системы – после разработки и тестирования система готова к использованию. Пользователи могут ввести свои компетенции и получить рекомендации по развитию карьеры или оценке своей подготовки к определенным должностям. Компании могут использовать систему для разработки программ обучения или для оценки навыков своих сотрудников.

О преимуществах использования экспертной системы в процессе подбора работников с необходимыми компетенциями уже говорилось, но стоит разобратся в этом подробнее. Ниже приведены преимущества этой системы:

1. Повышение качества принятия решений. Экспертная система может

помочь принимать решения на основе знаний экспертов в соответствующей области, что может привести к лучшим результатам [4]. В данном случае речь идет о быстром подборе подходящих кандидатов. Обладая большой базой данных, экспертная система сможет предоставить работодателям наиболее подходящих кандидатов. Для тех, кто ищет работу, программа сможет дать рекомендации по повышению квалификации, которой не хватает соискателю.

2. Оптимизация процессов подбора персонала. Экспертная система способна упростить процесс отбора кандидатов, позволяя работодателям сократить время и повысить качество найма.

3. Повышение эффективности обучения. Экспертная система может помочь студентам и образовательным учреждениям определить необходимые компетенции для конкретных профессий и разработать соответствующие программы обучения.

4. Сократите затраты. Экспертная система может снизить затраты на обучение, подбор и поддержку персонала, что приведет к экономии времени и денег.

5. Возможность интеграции. Экспертные системы смогут интегрироваться с другими системами и приложениями, что упростит процессы и повысит эффективность работы.

6. Доступность и публичность. Она обеспечивается легкий доступ к информации о компетенциях и возможность предоставления обратной связи.

Результаты и их обсуждение

Данная экспертная система станет полезным нововведением для рынка труда, однако уже на ранних этапах становятся видны некоторые проблемы, которые мешают или замедляют внедрение такой системы на практике.

Для функционирования база данных, используемая экспертной системой, должна содержать определенную информацию. Среди них данные обо всех университетах и колледжах с разбивкой по регионам, количество их выпускников за последние несколько лет, данные о направлениях каждого вуза и компетенциях, которые получают студенты по окончании обучения, требования работодателей и другие. Когда дело доходит до данных, необходимо четко понимать, как они будут собираться. Здесь кроется ряд проблем. Давайте посмотрим на них поближе.

Во-первых, единого списка вузов и колледжей России в открытом доступе нет. Система требует не только список, но и данные о направлениях, приобретаемых компетенциях, количестве выпускников и т. д. Информацию можно получить по каждому образовательному учреждению отдельно на сайтах образовательных учреждений. Сбор данных таким способом займет много времени, за это время они, скорее всего, станут неактуальными.

Есть возможность получить данные по направлениям обучения. Их можно

взять с сайта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Однако эти данные не разбиты по регионам. Есть данные, касающиеся студентов, которые разбиты по регионам, однако их принадлежность к институтам или направлениям в статистике не указана [20].

Выходом из сложившейся ситуации могло бы стать активное участие образовательных учреждений в функционировании системы путем самостоятельной загрузки данных о количестве выпускников и их компетенциях в разрезе направлений и специальностей. Эта опция позволит вам не только получать актуальную информацию от университетов и колледжей, но и привлечь их внимание к системе.

Во-вторых, данные о требованиях работодателя, вакансиях и всем, что с этим связано, невозможно найти в готовом виде. Они постоянно меняются, исчезают и появляются, что делает их сбор невыполнимой задачей.

В этом случае участие работодателей также играет очень важную роль, так как эти данные нужны системе. На их основе будут составляться рекомендации по повышению компетенций. Это позволит образовательному учреждению лучше ориентироваться в сложившейся ситуации. Участие организаций в процессе даст возможность лучше узнать наиболее перспективных претендентов, а также найти тех, кто повысил свою

квалификацию и готов приступить к работе быстрее своих конкурентов [2; 17].

Однако сложность состоит в том, что не все хотят обременять себя дополнительной деятельностью, в результате большинство работодателей поначалу могут остаться в стороне.

В процессе работы мы развернули базу данных с помощью программы Open Server, загрузили датасет, содержащий данные об образовательных организациях с сайта Министерство науки и

высшего образования РФ. Примеры данных: наименования учебных заведений, количество студентов и выпускников по направлениям, регионы вузов, компетенции. Основная проблема в работе заключалась в том, что обработанных данных по образовательной сфере нет, поэтому пришлось собирать данные вручную и изменять их под нужды проекта.

Рассмотрим процесс заполнения Базы данных с помощью Python-скрипта (рис. 4 и 5).

```
import psycopg2
import pandas as pd

print('Выполняю подключение к базе данных')

conn = psycopg2.connect(
    host="localhost",
    database="labor_market",
    user="postgres",
    password="postgres")

print('Подключение выполнено')

organizations_path = 'C:/Users/Peter/KIS_Dataset/_Rabota_v_RF_trudvsem.rf_186_02.12.21/organizations.csv'
region_path = 'C:/Users/Peter/KIS_Dataset/_Rabota_v_RF_trudvsem.rf_186_02.12.21/regions.csv'
professions_path = 'C:/Users/Peter/KIS_Dataset/_Rabota_v_RF_trudvsem.rf_186_02.12.21/professions.csv'
industries_path = 'C:/Users/Peter/KIS_Dataset/_Rabota_v_RF_trudvsem.rf_186_02.12.21/industries.csv'
cv_path = 'C:/Users/Peter/KIS_Dataset/_Rabota_v_RF_trudvsem.rf_186_02.12.21/cv.csv'
edu_path = 'C:/Users/Peter/KIS_Dataset/_Rabota_v_RF_trudvsem.rf_186_02.12.21/edu.csv'
vacancies_path = 'C:/Users/Peter/KIS_Dataset/_Rabota_v_RF_trudvsem.rf_186_02.12.21/vacancies.csv'

with conn:
    with conn.cursor() as curs:
        curs.execute("DROP TABLE IF EXISTS regions, professions, industries, cv, education, organizations, vacancies;")

print('Создаю и заполняю таблицу regions')

with conn:
    with conn.cursor() as curs:
        curs.execute("CREATE TABLE regions (region_code bigint, \
            region_name text, \
            economic_growth numeric, \
            medium_salary_difference numeric, \
            unemployment_level numeric, \
            PRIMARY KEY (region_code) \
        );")

with conn:
    with conn.cursor() as curs:
        curs.execute(f"COPY regions(region_code, region_name, economic_growth, medium_salary_difference, \
            unemployment_level) \
        FROM '{region_path}' \
        DELIMITER ';' \
        CSV HEADER;")
```

Рис. 4. Python-скрипт для заполнения БД

Fig. 4. Python script to populate the database

Fig. 5. Database Interface in Open Server

ствовать с экспертной системой и поможет правильно использовать возможности ЭС. Интерфейс может быть создан на основе текстового или графического интерфейса.

- ## Выводы

Созданная на основе данной работы экспертная система будет полезна для решения задачи согласования спроса и предложения на рынке труда, повышения эффективности обучения, сокращения временных ресурсов и удовлетворения потребности работодателей в опытных специалистах. Это позволит соискателям повысить свою конкурентоспособность и обеспечить себе более перспективные вакансии, а работодатели смогут найти опытных специалистов, сократив время и затраты на поиск.

- Однако разработка экспертной системы потребует участия работодателей и образовательных организаций в процессе

ее эксплуатации. Также могут возникнуть проблемы с обеспечением точности и полноты информации, которая будет использоваться в системе, а также с обеспечением безопасности данных. В целом

создание экспертной системы может стать важным шагом в решении проблемы соответствия компетенций и требований на рынке труда, но потребует серьезных усилий и внимания к деталям.

Список литературы

1. Volneikina E. S., Ludnev V. S., Korostelev A. S. Applications expert systems // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2022. С. 1004–1006.
2. Стаин Д. А., Вербицкая Н. О., Калугин Т. Г. Калификационно-ориентированная экспертная система управления образовательным процессом вуза в современных процессах непрерывного квалификационного развития кадров в Носии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Образование. Педагогические науки. 2018. С. 27–36.
3. Агафонова Д. А., Толстова Д. В. Применение экспертных систем в образовании // Матрица научного познания. 2023. № 1-2. С. 60–62.
4. Kireev T. D, Markevich I. V., Vaitekunaite P. Yu. Expert systems in knowledge-intensive fields of knowledge // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2022. Р. 1015–1017. EDN FQPOOH.
5. Охотников О. В., Казакова Ю. Е. Трудоустройство выпускников вуза как проблема системы российского образования // Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. 2019. № 3. С. 431–449.
6. Виноградова Е. Б., Мудрова Е. Б. Вузы – промышленность: подходы к планированию заказа на специалистов // Университетское управление: практика и анализ. 2016. № 3. С. 43–53.
7. Шехмирова А. М., Грибина Л. В. Методологические аспекты формирования универсальных компетенций в вузовской практике в условиях реализации ФГОС 3++ // Сборники конференций НИЦ Социосфера. 2019. № 33. С. 11–16.
8. Marelli E., Signorelli M. Young People and the Labor Market – Challenges and Opportunities: An Introduction // Young People and the Labor Market: Challenges and Opportunities. 2022. N 2(1). P. 59–61.
9. Прилуцкая Е. К., Царева Н. А. Проблема трудоустройства выпускников вузов (анализ научных публикаций) // Водные биоресурсы: рациональное освоение и

искусственное воспроизводство: материалы Международной научно-практической конференции. Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2021. С. 189–193.

10. Томакова Р. А., Томаков В. И. Российский рынок труда в сфере информационных технологий в 2021 году // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2022. Т. 12(1), № 1. С. 150–166.

11. Климова Н. В., Касьянова Т. И. Рынок труда молодежи: проблемы и пути их решения // Стратегии развития социальных общностей, институтов и территорий: материалы III Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2017. Т. 1. С. 284–287.

12. Амелин А. А., Ильичев В. А., Отлева Т. И. Последствия недостатков в подготовке специалистов строительного профиля // Современный ученый. 2017. № 11. С. 152–159.

13. Do employability skills for business graduates meet the employers' expectations? The case of retail Islamic banks of Bahrain / N. Al-Shehab, M. AL-Hashimi, A. Madbouly [et al.] // Higher Education, Skills and Work-Based Learning. 2020. Vol. 11, is. 2. P. 349–366.

14. Кравченко С. К. Проблема баланса спроса и предложения на рынке подготовки профессиональных кадров с учетом потребностей экономики региона // Образование: ресурсы развития. Вестник ЛОИРО. 2020. № 4. С. 82–85.

15. Нуретдинов Р. И. Востребованность компетенций молодых специалистов среднего уровня профессионального образования в области информационных технологий рынком труда // Общество: социология, психология, педагогика. 2021. № 5 (85). С. 169–172.

16. Томакова Р. А., Томаков М. В. Дискуссия как педагогическая технология развития Soft Skills будущих IT-специалистов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11(3), № 3. С. 121–141.

17. Лимонникова Е. В. Формы участия работодателей в разработке образовательных программ высшего образования // Актуальные вопросы инновационного развития арктического региона РФ: сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 2023. С. 563–567.

18. Employers' Preference on Employability Skills of Business Management and Accounting Graduates / Guillermo B. Briones, Elaine Joy C. Apat, Dennis Gaudencio Iii R. Loricarica [et al.] // International Journal of Academe and Industry Research. 2021. P. 64–85.

19. Турков Е. С., Степанов Ю. А. Концептуальная модель модуля сбора данных о вакансиях для экспертной системы // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 2-1(92). С. 75–78.

20. Высшее образование // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/stat/highed/> (дата обращения: 10.12.2023).

References

1. Volneikina E. S., Ludnev V. S., Korostelev A. S. [Applications expert systems]. *Molodye uchenye v reshenii aktual'nyh problem nauki. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh* [Young scientists in solving urgent problems of science. A collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists]. Krasnoyarsk, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev Publ., 2022, pp. 1004–1006.
2. Stain D. A., Verbitskaya N. O., Kalugin T. G. Kalifikacionno-orientirovannaya ekspertnaya sistema upravleniya obrazovatel'nym processom vuza v sovremennyh processah nepreryvnogo kvalifikacionnogo razvitiya kadrov v Hossii [Qualification-oriented expert management system of the educational process of the university in modern processes of continuous qualification development of personnel in Russia]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ob-razovanie. Pedagogicheskie nauki = Bulletin of the South Ural State University. Series: Education. Pedagogical Sciences*, 2018, pp. 27–36.
3. Agafonova D. A., Tolstova D. V. Primenenie ekspertnyh sistem v obrazovanii [Application of expert systems in education]. *Matrica nauchnogo poznaniya = Matrix of Scientific cognition*, 2023, no. 1-2, pp. 60–62.
4. Kireev T. D., Markevich I. V., Vaitekunaite P. Yu. [Expert systems in knowledge-intensive fields of knowledge]. *Molodye uchenye v reshenii aktual'nyh problem nauki. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh* [Young scientists in solving urgent problems of science. A collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists]. Krasnoyarsk, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev Publ., 2022, pp. 1015–1017. EDN FQPOOH
5. Okhotnikov O. V., Kazakova Yu. E. Trudoustrojstvo vypusknikov vuza kak problema sistemy rossijskogo obrazovaniya [Employment of university graduates as a problem of the Russian education system]. *Vestnik UrFU. Seriya ekonomika i upravlenie = Bulletin of the UrFU. Economics and Management Series*, 2019, no. 3, pp. 431–449.
6. Vinogradova E. B., Mudrova E. B. Vuzy – promyshlennost': podhody k planirovaniyu zakaza na specialistov [Universities – industry: approaches to planning an order for specialists]. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University Management: Practice and Analysis*, 2016, no. 3, pp. 43–53.

7. Shekhmirzova A. M., Gribina L. V. Metodologicheskie aspekty formirovaniya universal'nyh kompetencij v vuzovskoj praktike v usloviyah realizacii FGOS 3++ [Methodological aspects of the formation of universal competencies in university practice in the context of the implementation of FGOS 3++]. *Sborniki konferencij NIC Sociosfera = Collections of Conferences of SIC Sociosphere*, 2019, no. 33, pp. 11–16.

8. Marelli E., Signorelli M. Young People and the Labor Market – Challenges and Opportunities: An Introduction. *Young People and the Labor Market: Challenges and Opportunities*, 2022, no. 2(1), pp. 59–61.

9. Prilutskaya E. K., Tsareva N. A. [The problem of employment of university graduates (analysis of scientific publications)]. *Vodnye bioresursy: racional'noe osvoenie i iskusstvennoe vosproizvodstvo. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Aquatic bioresources: rational development and artificial reproduction. Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Vladivostok, Far Eastern State Technical Fishing and Economic University Publ., 2021, pp. 189–193. (In Russ.)

10. Tomakova R. A., Tomakov V. I. Rossijskij rynek truda v sfere informacionnyh tekhnologij v 2021 godu [The Russian labor market in the field of information technologies in 2021]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Seriya: Ekonomika. Sociologiya. Menedzhment = Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management*, 2022, vol. 12(1), no. 1, pp. 150–166.

11. Klimova N. V., Kasyanova T. I. [Youth labor market: problems and solutions]. *Strategii razvitiya social'nyh obshchnostej, institutov i territorij. Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Strategies for the development of social communities, institutions and territories. Materials of the III International Scientific and Practical Conference]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2017, vol. 1, pp. 284–287. (In Russ.)

12. Amelin A. A., Ilyichev V. A., Otleva T. I. Posledstviya nedostatkov v podgotovke specialistov stroitel'nogo profilya [Consequences of deficiencies in the training of construction specialists]. *Sovremennyy uchenyy = A Modern Scientist*, 2017, no. 11, pp. 152–159.

13. Al-Shehab N., AL-Hashimi M., Madbouly A., eds. Do employability skills for business graduates meet the employers' expectations? The case of retail Islamic banks of Bahrain. *Higher Education, Skills and Work-Based Learning*, 2020, vol. 11, is. 2, pp. 349–366.

14. Kravchenko S. K. Problema balansa sprosa i predlozheniya na rynke podgotovki professional'nyh kadrov s uchetom potrebnostej ekonomiki regiona [The problem of the balance of supply and demand in the market of training professional personnel, taking into account the needs of the economy of the region]. *Obrazovanie: resursy razvitiya. Vestnik LOIRO = Education: Development Resources. Bulletin of LOIRO*, 2020, no. 4, pp. 82–85.

15. Nuretdinov R. I. Vostrebovannost' kompetencij molodyh specialistov srednego urovnya professional'nogo obrazovaniya v oblasti informacionnyh tekhnologij rynkom truda [The demand for competencies of young specialists of the average level of professional education

in the field of information technologies by the labor market]. *Obshchestvo: sociologiya, psikhologiya, pedagogika* = *Society: Sociology, Psychology, Pedagogy*, 2021, no. 5 (85), pp. 169–172.

16. Tomakova R. A., Tomakov M. V. Diskussiya kak pedagogicheskaya tekhnologiya razvitiya Soft Skills budushchih IT-specialistov [Discussion as a pedagogical technology for the development of Soft Skills of future IT specialists]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11(3), no. 3, pp. 121–141.

17. Limonnikova E. V. [Forms of employers' participation in the development of educational programs of higher education]. *Aktual'nye voprosy innovacionnogo razvitiya arkticheskogo regiona RF. Sbornik materialov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Topical issues of innovative development of the Arctic region of the Russian Federation. Collection of materials of the IV All-Russian Scientific and practical conference]. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov Publ., 2023, pp. 563–567. (In Russ.)

18. Guillermo B. Briones, Elaine Joy C. Apat, Dennis Gaudencio Iii R. Lorica, eds. Employers' Preference on Employability Skills of Business Management and Accounting Graduates. *International Journal of Academia and Industry Research*, 2021, pp. 64–85.

19. Turkov E. S., Stepanov Yu. A. Konceptual'naya model' modulya sbora dannyh o vakansiyah dlya ekspertnoj sistemy [Conceptual model of the data collection module on vacancies for the expert system]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* = *International Scientific Research Journal*, 2020, no. 2-1(92), pp. 75–78.

20. Vysshee obrazovanie [Higher education]. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii [Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation]. Available at: <https://minobrnauki.gov.ru/action/stat/highed/>. (accessed 10.12.2023)

Информация об авторах / Information about the Authors

Брежнев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: Brezhnev.AV@rea.ru, ORCID: 0000-0002-3679-7379

Alexey V. Brezhnev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Science, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation, e-mail: Brezhnev.AV@rea.ru, ORCID: 0000-0002-3679-7379

Дорожкин Сергей Дмитриевич, студент,
Российский экономический университет
имени Г. В. Плеханова,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: Dorozhkin_SD@outlook.com,
ORCID: 0009-0009-4035-0199

Sergey D. Dorozhkin, Student,
Plekhanov Russian University of Economics,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: Dorozhkin_SD@outlook.com,
ORCID: 0009-0009-4035-0199

Тивиков Петр Сергеевич, студент,
Российский экономический университет
имени Г. В. Плеханова, г. Москва,
Российская Федерация,
e-mail: tivikovucheba@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-6129-0917

Petr S. Tivikov, Student,
Plekhanov Russian University of Economics,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: tivikovucheba@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-6129-0917

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-148-160>



УДК 616-073.756.8+611.711.1+616.76-007.43

Компьютерная оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шеи на основании данных МРТ-исследований

Е. С. Мохова¹✉, А. В. Колсанов²

¹ Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова Минздрава России
ул. Кирочная, д. 41, г. Санкт-Петербург 191015, Российская Федерация

² Самарский государственный медицинский университет Минздрава России
ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара 443099, Российская Федерация

✉ e-mail: mokhova-es@mail.ru

Резюме

Цель исследования – оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков C4-C5, C5-C6 и C6-C7 шейного отдела позвоночника по данным МРТ-исследования.

Методы. Изучена биомеханика физиологических процессов этого отдела на основании данных МРТ-исследований. Разработана и апробирована компьютерная программ ЭВМ «Способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шейного отдела позвоночника по результатам МРТ-исследования». Измерения, необходимые для вышеуказанной оценки, получали при оценке МРТ-исследования конкретного пациента, после чего вводили данные в программу. Результаты расчетов сопоставлялись с базой данных, ранее полученной авторами в ходе экспериментального и клинического исследований.

Результаты. Используемая нами модель корректно описывает механические особенности соединения позвонков, так как учитывает наиболее значимые особенности строения их, оказывающие влияние на изменение длин плеч рычагов и силу давления на центр межпозвонкового диска. По данным магниторезонансной томографии, определяли высоту межпозвонкового диска на уровне передних краёв тел позвонков и значение AV, вычисляли $\tan \alpha$. Для конкретного пациента получали риск возникновения выпячивания межпозвонкового диска на уровне C4-C5, C5-C6 и C6-C7.

Заключение. Результаты испытания программы оценки риска развития выпячивания межпозвонкового диска в шейном отделе позвоночника позволяют описывать динамические явления в шейном отделе позвоночника и прогнозировать неблагоприятный исход патологии на доклиническом этапе даже при отсутствии клинических проявлений.

Ключевые слова: межпозвонковый диск; оценка риска; риск развития выпячивания межпозвонкового диска; шейный отдел позвоночника; МРТ-исследования.

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

Для цитирования: Мохова Е. С., Колсанов А. В. Компьютерная оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шеи на основании данных МРТ-исследований // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 148–160. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-148-160>.

Поступила в редакцию 17.01.2024

Подписана в печать 10.02.2024

Опубликована 29.03.2024

© Мохова Е. С., Колсанов А. В., 2024

Computer Assessment of the Risk of Herniated Protrusions of the Intervertebral Discs of the Neck Based on MRI Data

Ekaterina S. Mokhova^{1✉}, Alexander V. Kolsanov²

¹ North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov Ministry of Health of Russia
41 Kirochnaya Str., St. Petersburg 191015, Russian Federation

² Samara State Medical University Ministry of Health of Russia
89 Chapaevskaya Str., Samara 443099, Russian Federation

✉ e-mail: mokhova-es@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is assessment of the risk of herniated protrusions of intervertebral discs C4-C5, C5-C6 and C6-C7 of the cervical spine according to MRI examination.

Methods. The biomechanics of the physiological processes of this department has been studied on the basis of MRI data. A computer program «A method for assessing the risk of herniated protrusions of intervertebral discs of the cervical spine based on the results of an MRI examination» has been developed and tested. The measurements required for the above assessment were obtained during the evaluation of the MRI examination of a particular patient, after which the data was entered into the program. The calculation results were compared with the database previously obtained by the authors in the course of experimental and clinical studies.

Results. The model we use correctly describes the mechanical features of the vertebral junction, since it takes into account the most significant features of their structure, which affect the change in the length of the arms of the levers and the force of pressure on the center of the intervertebral disc. Based on magnetic resonance imaging data, the height of the intervertebral disc at the level of the anterior edges of the vertebral bodies and the AV value were determined, and $\text{tg}\alpha$ was calculated. For a particular patient, the risk of intervertebral disc protrusion was obtained at the C4-C5, C5-C6 and C6-C7 levels.

Conclusion. The test results of the program for assessing the risk of developing an intervertebral disc protrusion in the cervical spine make it possible to describe dynamic phenomena in the cervical spine and predict an unfavorable outcome of pathology at the preclinical stage, even in the absence of clinical manifestations.

Keywords: intervertebral disc; risk assessment; risk of developing a bulging intervertebral disc; cervical spine; MRI studies.

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

For citation: Mohova E. S., Kolsanov A. V. Computer Assessment of the Risk of Herniated Protrusions of the Intervertebral Discs of the Cervical Spine Based on MRI Scans. *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): 148–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-148-160>.

Received 17.01.2024

Accepted 10.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

С точки зрения биомеханики область шеи является наиболее сложной для детального описания человеческого тела. Взаимодействие окружающей среды с генетическими факторами ускоряет процесс дегенерации межпозвонковых дисков (МПД) [1]. Боль в шее вызвана нагрузкой на межпозвоночные диски, которая может привести к образованию грыжевых выпячиваний МПД с сопутствующим сдавливанием нерва. Из-за своей распространённости и социальных последствий это заболевание считается проблемой общественного здравоохранения [2; 3].

Основными факторами патологии межпозвонковых дисков являются факторы, связанные с родом занятий и профессией (физическая нагрузка, стресс на работе). На биомеханические процессы оказывают влияние и генетические факторы косвенно также. Взаимодействие с генетическими факторами ускоряется процессом дегенерации межпозвонковых дисков [3; 4].

Изучение механизмов дегенеративно-дистрофических процессов в различных структурах позвоночно-двигательного сегмента (ПДС) становится важным для практической деятельности врачей различных профилей и актуальным направлением совершенствования методов диагностики. Воздействие различных факторов повреждения межпозвонковых дисков на пациента, приводящих к образованию грыжевых

выпячиваний, необходимо учитывать при выборе рациональных лечебно-диагностических технологий в каждом конкретном случае. Для диагностики грыжевых выпячиваний МПД обычно используется магнитно-резонансная томография. Выявление грыжевых выпячиваний происходит при снижении интенсивности сигнала от межпозвоночного диска, однако чрезвычайно важна разработка новых методов диагностики риска грыжевых выпячиваний, которые позволяют изучать механизмы дегенеративно-дистрофических процессов в различных анатомических структурах позвоночно-двигательного сегмента. В каждом конкретном случае необходимо понимать основные механизмы повреждения МПД, которые вызывают образование грыжевых выпячиваний, а также разрабатывать лечебно-диагностическую тактику врача при выявлении МПД [4].

Цель исследования – оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков C4-C5, C5-C6 и C6-C7 шейного отдела позвоночника по данным МРТ-исследования.

Материалы и методы

В настоящее время математический анализ и трёхмерное моделирование являются новым перспективным способом получения дополнительной информации, с помощью которых исследователь имеет возможность виртуально наблюдать и моделировать сложные биомеханические явления в изучаемых

виртуальных аналогов вне организма, что безопасно для пациента.

В основу анализа взят способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шейного отдела позвоночника путем МРТ-исследования, описанный в патенте Е. В. Яковлева с соавторами [2] и получивший дальнейшее развитие в нашей совместной работе [4].

Измерения, необходимые для вышеуказанной оценки, получают при оценке МРТ-исследования конкретного пациента, после чего вводят данные в программу. Результаты сопоставляются с базой данных, ранее полученной авторами в ходе экспериментального и клинического исследований.

Результаты и их обсуждение

При описании патологии шейного отдела позвоночника используется позвоночно-двигательный сегмент, который включает в себя два соседних позвонка, межпозвоночные суставы, межпозвоночный диск, межпозвоночные связки, а также мышцы и фиброзные ткани [5]. Каждый позвоночно-двигательный сегмент в сагиттальной плоскости при стабильных условиях представляет собой систему сбалансированных рычагов с точкой опоры на уровне сустава.

Смещение материала диска за пределы межпозвоночного пространства происходит по следующим основным причинам: изменение нормальной структуры ПДС, дегенерация фиброзного

кольца МПД, увеличение механического фактора – давления на пульпозное ядро. При изучении изолированных биомеханических факторов на первый план выходит трехмерная структура позвонка, поскольку она определяет длины рычагов и векторы направления силы. В повседневной практике дегенеративные изменения МПД оцениваются по двумерным геометрическим и сигнальным характеристикам. Согласно исследованию [6; 7], высота диска при срединно-сагиттальной магнитно-резонансной томографии не является надежным признаком возрастной дегенерации диска. Исследование демонстрирует конечно-элементное моделирование валидированной модели ПДС, которая использовалась для изучения траекторий центра мгновенной скорости при различных степенях дегенерации межпозвонковых дисков [4; 8].

Четкие 3D-модели могут стать новым инструментом для исследований в случае шейного отдела позвоночника [9]. Трехмерные, математические и биомеханические модели важны как средство детального изучения биологического объекта, а также представляют практически огромные возможности в области моделирования различных видов патологий и создания трехмерного визуального изображения для моделирования проведения различных терапевтических и диагностических исследований [10; 11].

Выпячивание грыжи межпозвоночного диска возникает при наличии

следующих факторов: изменении структуры, деградации фиброзного кольца и влиянии механических факторов – давления на пульпозное ядро. Подробный анализ механизма формирования рычага был представлен нами ранее [4].

Представленная модель четко описывает механические особенности позвоночного сустава, так как учитывает наиболее существенные конструктивные

особенности их строения, которые влияют на изменение длины плеч рычага и силы давления на центр межпозвоночного диска.

Для ПДС C4-C5, C5-C6 и C6-C7 в горизонтальных проекциях определяли значения FF1 и O1A (рис. 1).

Значение O1A вычисляли по формуле

$$O_1A = \frac{2}{FF_1} \sqrt{(P(P - FF_1)(P - F_1A)(P - F_A))},$$

где

$$P = \frac{(FA + F_1A + FF_1)}{2}.$$

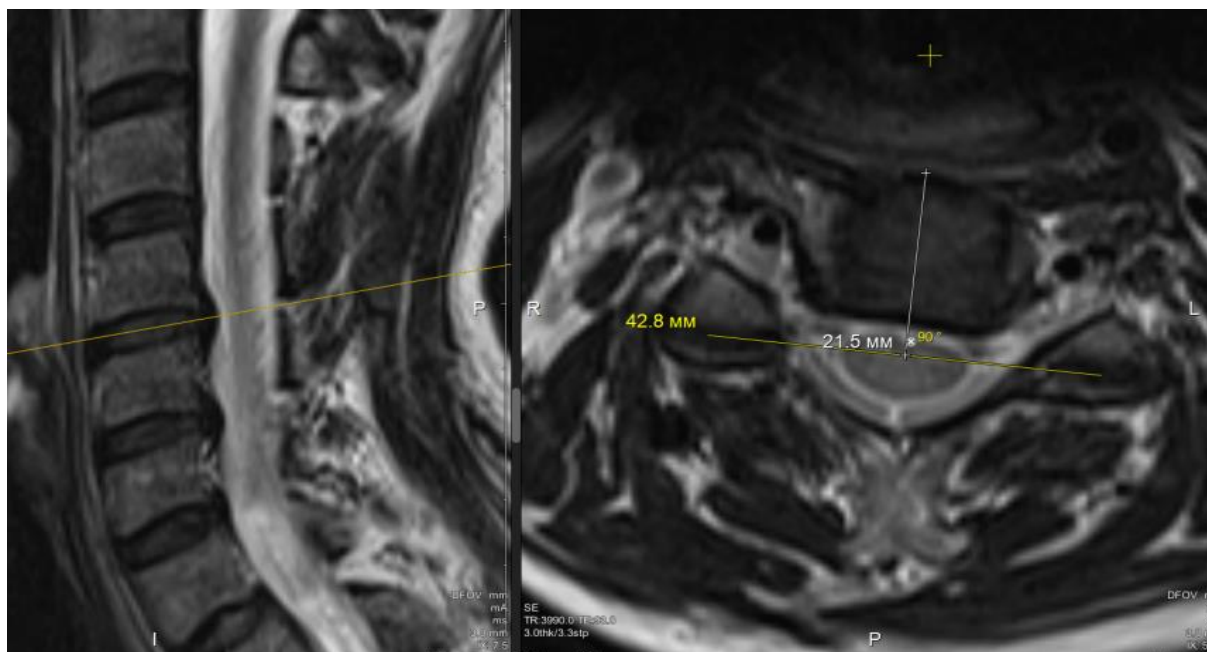


Рис. 1. Определение значения FF1 и O1A в сегменте C5-C6 [4; 12]

Fig. 1. Determination of the value of FF1 and O1A in the C5-C6 segment [4; 12]

По данным магниторезонансной томографии (МРТ), определяли значение высоты межпозвонкового диска на уровне C4-C5, C5-C6 и C6-C7 передних краёв тел позвонков (рис. 2) для всех

ПДС, значение AV, равное 1/2 высоты межпозвонкового диска. Производили вычисления $\text{tg } \alpha = \frac{AV}{O_1A}$ для каждого ПДС [4].

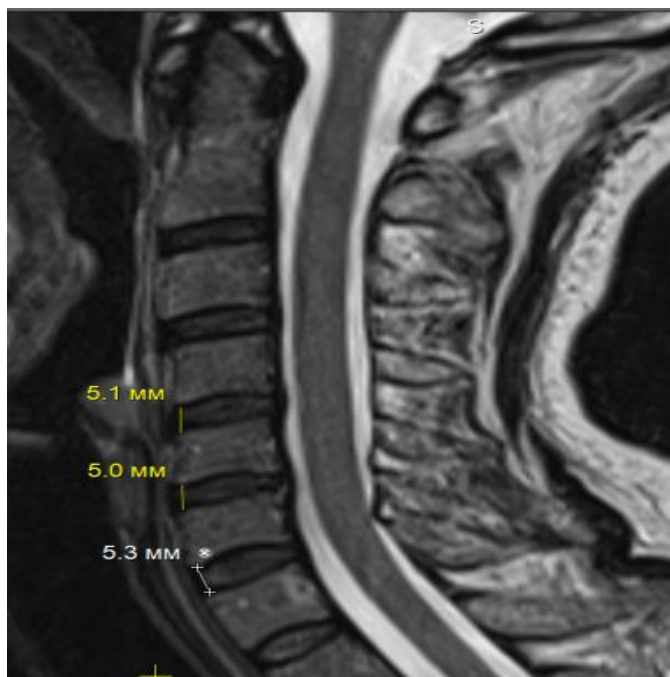


Рис. 2. Определение высоты межпозвонковых дисков на уровне передних краёв тел позвонков

Fig. 2. Determination of the height of the intervertebral discs at the level of the anterior edges of the vertebral bodies

Используя выявленные закономерности, нами создана Программа для биомеханической оценки риска возникновения парамедианных выпячиваний межпозвонковых дисков на основе данных MPT ALPHATANG 1.0 и получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [4]. С её помощью можно определить степень нарушения в шейном регионе.

Оценивался риск выпячивания следующим образом при значении X : больше или равно 0,11 – высокий риск; от 0,06 включительно до 0,08 включительно – средний риск; равно 0,05 и ниже – низкий риск.

На ретроспективном материале в программе определялся риск возникновения выпячивания межпозвонкового диска.

Риск возникновения грыжевого выпячивания межпозвонковых дисков C4-C5, C5-C6 и C6-C7 шейного отдела позвоночника в случае, представленном в данной статье, $\text{tg}\alpha$ составил соответственно 0,118-0,116-0,123. Риск возникновения грыжевого выпячивания межпозвонковых дисков по всем позвонкам был высоким при отсутствии клинических жалоб у пациента.

В данном исследовании была подтверждена формирующаяся патология шейного отдела позвоночника – выход диска за линию, соединяющую соседние позвонки, в исследуемой сагиттальном срезе тела приблизился к критическому значению 2,0 мм и составил 1,6–1,8 мм (рис. 3).

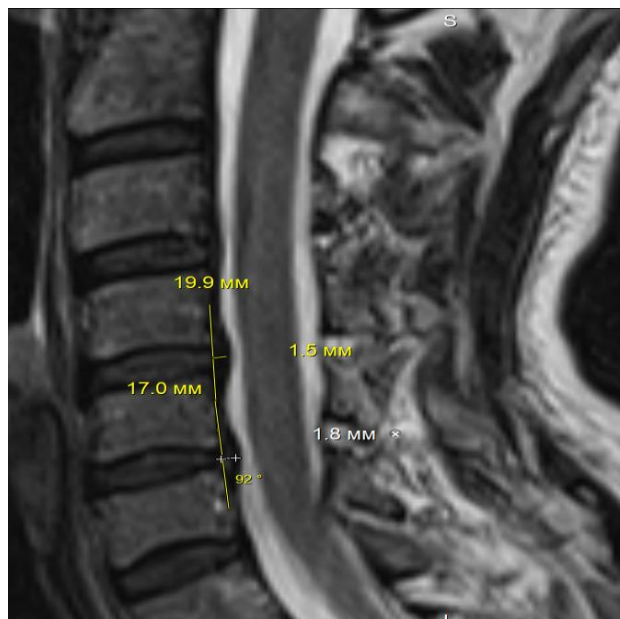


Рис. 3. Определение ширины выпячиваний дисков [4]

Fig. 3. Determination of the width of the disc protrusions [4]

Комплексный подход к описанию объекта исследования позволяет проводить биомеханический анализ. В нем проводится различие между общей биомеханикой (биомеханика клеток, внутренних органов и систем), инженерной биомеханикой (движение и контроль тела, биомеханика предметной среды человека), медицинской биомеханикой (биомеханические аспекты медицинской диагностики и лечения, биомеханика травм и хирургических вмешательств), биомеханика заменителей биологических тканей и биомеханика трудовых и спортивных движений [13]. Мы провели биомеханический анализ только на уровне общей биомеханики шеи, что позволило понять механизм физиологических процессов шеи.

Неоспоримо влияние нестабильности позвонков на развитие различных патологических изменений других

отделов позвоночника, а также на развитие соматической дисфункции других, порой даже значительно удалённых органов и систем.

В исследовании Okada E. et al [12] сообщается, что при проведении МРТ-исследований пациентов без симптомов, возникающих со стороны шейного отдела позвоночника, была значительно более высокая распространенность снижения интенсивности сигнала от межпозвоночного диска и заднего протрузии диска на МРТ шейного отдела позвоночника. Эти результаты убедительно свидетельствуют о том, что у пациентов с МПД наблюдаются дегенеративные изменения в других сегментах позвоночника, и некоторые индивидуальные факторы могут стимулировать дегенерацию диска как в шейном, так и в поясничном отделах позвоночника одновременно.

Goel. A. [14] оценил роль атлантоаксиальной и многоуровневой субаксиальной нестабильности позвоночника как первичной узловой точки патогенеза дегенеративной миелопатии, связанной с заболеванием шейного отдела позвоночника. Подтверждено, что нестабильность атлантоаксиального сустава часто ассоциируется с субаксиальной многоуровневой нестабильностью позвоночника при дегенеративных заболеваниях позвоночника. Показана также роль субаксиальной и атлантоаксиальной нестабильности в патогенезе кифоза шейного отдела позвоночника, связанного с дегенерацией [15].

До настоящего момента были предприняты отдельные попытки описания закономерностей смещения органов и мышечно-фасциальных слоёв шеи при поворотах головы, единой системы описания их механизма, а также способов ранней диагностики патологии этой области, никто из исследователей так и не смог их сформулировать [16; 17]. Используя последние достижения современной науки, нами была сделана попытка создать систему описания сложных динамических процессов в шее с применением данных МРТ и применить методику оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков в клинической практике.

Подводя итоги, можем констатировать, что неоспоримо влияние нестабильности позвонков на развитие

различных патологических изменений различных отделов позвоночника, что лишний раз подтверждает актуальность ранней доклинической диагностики патологии шейного отдела и необходимости выделения группы риска, нуждающейся в углубленном обследовании.

Выводы

1. Математическое моделирование биологических объектов позволяет описать патологические изменения в организме, отражающие реальные биомеханические процессы. Задачей клинического врача на любой стадии развития патологического процесса является разрыв этого патологического круга. Крайне важным является выявление функциональных изменений на ранней доклинической стадии.

2. Данные, полученные в результате исследования, позволили получить математическое описание способа оценки риска возникновения выпячивания межпозвонкового диска.

3. Предложенный способ оценки в программе для ЭВМ риска возникновения выпячивания межпозвонкового диска на основе данных MPT ALPHATANG 1.0 может снизить риск осложнений при проведении манипуляций в области шеи и играть ведущую роль в выборе метода лечебного реабилитационного воздействия. Оценка рисков возникновения выпячиваний МПД будут иметь большую значимость для врачей широкого профиля.

Список литературы

1. Топографо-анатомический анализ и конечно-элементное моделирование динамических и биомеханических закономерностей смещения мышечно-фасциальных футляров шеи / Е. С. Мохова, Д. Е. Мохов, Е. В. Яковлев, С. А. Живолупов, Д. Ю. Бутко, Р. В. Алиев, И. М. Гасанбеков, А. С. Ведяшкина, А. А. Смирнов // Медицинский совет. 2023. Т. 17, № 6. С. 330–344. <https://doi.org/10.21518/ms2023-061>.
2. Пат. 2795175 Российская Федерация. МПК А61В 6/00. Способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков С4-С5, С5-С6 и С6-С7 шейного отдела позвоночника / Яковлев Е. В., Смирнов А. А., Живолунов С. А., Овсепьян А. Л., Гневыхшев Е. Н., Новиков Р. В. № 0002795175; заявл. 06.07.22; опубл. 28.04.23.
3. Анатомическая оценка изолированного влияния биомеханических факторов на процесс формирования смещений дискового материала за пределы пространства межпозвонковых дисков шейного отдела позвоночника в структуре дорсопатий / Е. В. Яковлев, А. А. Смирнов, С. А. Живолупов, Е. Н. Гневыхшев, Е. С. Мохова, Ю. А. Тероева, Р. В. Алиев, Д. Е. Мохов, А. Л. Овсепьян // Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал). 2022. Т. 6, № 2. С. 32–44. <https://doi.org/10.17116/ioperhirurg2022602132>.
4. Risk Factors of Intervertebral Disc Pathology – A Point of View Formerly and Today – A Review / N. Zielinska, M. Podgórski, R. Haładaj, M. Polguy, Ł. Olewnik // J. Clin. Med. 2021. N 10(3). P. 409. <https://doi.org/10.3390/jcm10030409/>.
5. Кузьмин А. И., Кон И. И., Бельский В. Е. Сколиоз. М.: Медицина, 1981. 272 с.
6. Magnetic Resonance Classification System of Cervical Intervertebral Disk Degeneration: Its Validity and Meaning / A. Suzuki, M. D. Daubs, T. Hayashi, M. Ruangchainikom, C. Xiong, K. Phan, T. P. Scott, J. C. Wang // Clin. Spine Surg. 2017. N 30(5). P. 547–553. <https://doi.org/10.1097/BSD.0000000000000172>.
7. Is it appropriate to measure age-related lumbar disc degeneration on the mid-sagittal MR image? A quantitative image study / X. Hu, M. Chen, J. Pan, L. Liang, Y. Wang // Eur. Spine J. 2018. N 27(5). P. 1073–1081. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5357-3>.
8. The effect of cervical intervertebral disc degeneration on the motion path of instantaneous center of rotation at degenerated and adjacent segments: A finite element analysis / D. Sang, C. F. Du, B. Wu, X. Y. Cai, W. Cui, C. X. Yuchi, T. Rong, H. Sang, B. Liu // Comput. Biol. Med. 2021. N 134. P. 104426. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104426>.
9. Reconstruction of the Three-dimensional Model of Cervical Vertebrae Segments Based on CT Image and 3D Printing / G. Zhao, G. Jiang, X. Xun Yang, P. Xireayi, E. Wang // Chinese

journal of medical instrumentation. 2019. N 43(6). P. 451–453. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2019.06.016>.

10. Конечно-элементный анализ при моделировании структур сердца и аорты / А. А. Смирнов, А. Л. Овсепьян, П. А. Квиндт, Ф. Н. Палеев, Е. В. Борисова, Е. В. Яковлев // Альманах клинической медицины. 2021. Т. 49, № 6. С. 375–384. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2021-49-043>.

11. Новый подход к изучению пространственной анатомии верхнечелюстных пазух в сравнении с общепринятыми методиками / О. В. Зелева, П. М. Зельтер, А. В. Колсанов, Е. А. Сидоров // Современные проблемы науки и образования. 2022. № 6-1. С. 114. <https://doi.org/10.17513/spno.32214>.

12. Disc degeneration of cervical spine on MRI in patients with lumbar disc herniation: comparison study with asymptomatic volunteers / E. Okada, M. Matsumoto, H. Fujiwara, Y. Toyama // Eur. Spine J. 2011. N 20(4). P. 585–591. <https://doi.org/10.1007/s00586-010-1644-y>.

13. Бегун П. И., Афонин П. Н. Моделирование в биомеханике. М.: Высшая школа, 2004. 389 с.

14. Goel A., Kaswa A., Shah A. Role of Atlantoaxial and Subaxial Spinal Instability in Pathogenesis of Spinal "Degeneration" – Related Cervical Kyphosis // World Neurosurg. 2017. N 101. P. 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.02.063>.

15. Goel A. Role of Subaxial Spinal and Atlantoaxial Instability in Multisegmental Cervical Spondylotic Myelopathy // Acta Neurochir. Suppl. 2019. N 125. P. 71–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62515-7_11.

16. Biomechanical analysis of the cervical spine segment as a method for studying the functional and dynamic anatomy of the human neck / A. L. Ovsepyan, A. A. Smirnov, E. A. Pustozarov, D. E. Mokhov, E. S. Mokhova, E. M. Trunin, S. S. Dydykin, Yu. L. Vasil'ev, E. V. Yakovlev, S. Budday, F. Paulsen, S. A. Zhivolupov, D. A. Starchik // Ann. Anat. 2022. N 240. P. 151856. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2021.151856>.

17. Reproducing morphological features of intervertebral disc using finite element modeling to predict the course of cervical spine dorsopathy / E. V. Yakovlev, A. L. Ovsepyan, A. A. Smirnov, A. A. Safronova, D. A. Starchik, S. A. Zhivolupov, D. E. Mokhov, E. S. Mokhova, Yu. L. Vasil'ev, S. S. Dydykin // Russian Open Medical Journal. 2022. N 11(1). P. e0118. <https://doi.org/10.15275/rusomj.2022.0118>.

References

1. Mokhova E. S., Mokhov D. E., Yakovlev E. V., Zhivolupov S. A., Butko D. Yu., Aliyev R. V., Hasanbekov I. M., Vedyashkin A. S., Smirnov A. A. Topografo-anatomicheskij

analiz i konechno-elementnoe modelirovanie dinamicheskikh i biomekhanicheskikh zakonomernostej smeshcheniya myshechno-fascial'nyh futlyarov shei [Topographic and anatomical analysis and finite element modeling of dynamic and biomechanical patterns of displacement of musculofacial neck cases]. *Medicinskij sovet = Medical Advice*, 2023, vol. 17, no. 6, pp. 330–344. <https://doi.org/10.21518/ms2023-061>

2. Yakovlev E. V., e. a. Sposob ocenki riska vozniknoveniya gryzhevyh vypyachivaniy mezhpozvonkovykh diskov S4-S5, S5-S6 i S6-S7 shejnogo otdela pozvonochnika [A method for assessing the risk of herniated protrusions of intervertebral discs C4-C5, C5-C6 and C6-C7 of the cervical spine]. Patent RF, no. 0002795175, 2023.

3. Yakovlev E. V. Smirnov A. A., Zhivolupov S. A., Gnevyshev E. N., Mokhova E. S., Teroeva Yu. A., Aliyev R. V., Mokhov D. E., Ovsepyan A. L. Anatomicheskaya ocenka izolirovannogo vliyaniya biomekhanicheskikh faktorov na process formirovaniya smeshchenij diskovogo materiala za predely prostranstva mezhpozvonkovykh diskov shejnogo otdela pozvonochnika v strukture dorsopatij [Anatomical assessment of the isolated influence of biomechanical factors on the formation of disc material displacements beyond the space of intervertebral discs of the cervical spine in the structure of dorsopathies]. *Operativnaya hirurgiya i klinicheskaya anatomiya (Pirogovskij nauchnyj zhurnal) = Operative Surgery and Clinical Anatomy (Pirogov Scientific Journal)*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 32–44. <https://doi.org/10.17116/operhirurg2022602132>

4. Zielinska N., Podgórski M., Haładaj R., Polguy M., Olewnik Ł. Risk Factors of Intervertebral Disc Pathology – A Point of View Formerly and Today – A Review. *J. Clin Med.*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 409. <https://doi.org/10.3390/jcm10030409>

5. Kuzmin A. I., Kon I. I., Belenky V. E. Skolioz [Scoliosis]. Moscow, Medicine Publ., 1981. 272 p.

6. Suzuki A., Daubs M. D., Hayashi T., Ruangchainikom M., Xiong C., Phan K., Scott T. P., Wang J. C. Magnetic Resonance Classification System of Cervical Intervertebral Disk Degeneration: Its Validity and Meaning. *Clin. Spine Surg.*, 2017, vol. 30, no. 5, pp. 547–553. <https://doi.org/0.1097/BSD.0000000000000172>

7. Hu X., Chen M., Pan J., Liang L., Wang Y. Is it appropriate to measure age-related lumbar disc degeneration on the mid-sagittal MR image? A quantitative image study. *Eur. Spine J.*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 1073–1081. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5357-3>

8. Sang D., Du C. F., Wu B., Cai X. Y., Cui W., Yuchi C. X., Rong T., Sang H., Liu B. The effect of cervical intervertebral disc degeneration on the motion path of instantaneous center of rotation at degenerated and adjacent segments: A finite element analysis. *Comput. Biol. Med.*, 2021, no. 134, pp. 104426. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104426>

9. Zhao G., Jiang G., Xun Yang X., Xireayi P., Wang E. Reconstruction of the Three-dimensional Model of Cervical Vertebrae Segments Based on CT Image and 3D Printing.

Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2019, vol. 43, no. 6, pp. 451–453. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2019.06.016>

10. Smirnov A. A., Ovsepyan A. L., Quindt P. A., Paleev F. N., Borisova E. V., Yakovlev E. V. Konechno-elementnyj analiz pri modelirovanii struktur serdca i aorty [Finite element analysis in modeling the structures of the heart and aorta]. *Al'manah klinicheskoy mediciny = Almanac of Clinical Medicine*, 2021, vol. 49, no. 6, pp. 375–384. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2021-49-043>

11. Zeleva O. V., Zelter P. M., Kolsanov A. V., Sidorov E. A. Novyj podhod k izucheniyu prostranstvennoj anatomii verhnechelyustnyh pazuh v sravnenii s obshchepriyatyimi metodikami [A new approach to the study of the spatial anatomy of the maxillary sinuses in comparison with conventional techniques]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2022, no. 6-1, pp. 114. <https://doi.org/10.17513/spno.32214>

12. Okada E., Matsumoto M., Fujiwara H., Toyama Y. Disc degeneration of cervical spine on MRI in patients with lumbar disc herniation: comparison study with asymptomatic volunteers. *Eur. Spine J.*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 585–591. <https://doi.org/10.1007/s00586-010-1644-y>

13. Begun P. I., Afonin P. N. Modelirovanie v biomekhanike [Modeling in biomechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 389 p.

14. Goel A., Kaswa A., Shah A. Role of Atlantoaxial and Subaxial Spinal Instability in Pathogenesis of Spinal "Degeneration"-Related Cervical Kyphosis. *World Neurosurg*, 2017, no. 101, pp. 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.02.063>

15. Goel A. Role of Subaxial Spinal and Atlantoaxial Instability in Multisegmental Cervical Spondylotic Myelopathy. *Acta Neurochir. Suppl.*, 2019, no. 125, pp. 71–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62515-7_11

16. Ovsepyan A. L., Smirnov A. A., Pustozarov E. A., Mokhov D. E., Mokhova E. S., Trunin E. M., Dydykin S. S., Vasil'ev Yu. L., Yakovlev E. V., Budday S., Paulsen F., Zhivolupov S. A., Starchik D. A. Biomechanical analysis of the cervical spine segment as a method for studying the functional and dynamic anatomy of the human neck. *Ann. Anat.*, 2022, no. 240, pp. 151856. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2021.151856>

17. Yakovlev E. V., Ovsepyan A. L., Smirnov A. A., Safronova A. A., Starchik D. A., Zhivolupov S. A., Mokhov D. E., Mokhova E. S., Vasil'ev Yu. L., Dydykin S. S. Reproducing morphological features of intervertebral disc using finite element modeling to predict the course of cervical spine dorsopathy. *Russian Open Medical Journal*, 2022, vol. 11, no. 1, p. e0118. <https://doi.org/10.15275/rusomj.2022.0118>

Информация об авторах / Information about the Authors

Мохова Екатерина Степановна,
ассистент кафедры остеопатии с курсом
функциональной и интегративной медицины,
Северо-Западный государственный
медицинский университет имени
И. И. Мечникова Минздрава России,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: mokhova-es@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1079-388X

Ekaterina S. Mokhova, Assistant
of the Department of Osteopathy with a Course
of Functional and Integrative Medicine,
North-Western State Medical University named
after I. I. Mechnikov Ministry of Health of Russia,
Saint-Petersburg, Russian Federation,
e-mail: mokhova-es@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1079-388X

Колсанов Александр Владимирович,
заведующий кафедрой оперативной хирургии
и клинической анатомии с курсом
медицинских информационных технологий,
Самарский государственный медицинский
университет Минздрава России,
г. Самара, Российская Федерация,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru,
ORCID: 0000-0002-4144-7090

Alexander V. Kolsanov,
Head of the Department of Operative Surgery
and Clinical Anatomy with a Course
of Medical Information Technologies,
Samara State Medical University
Ministry of Health of Russia,
Samara, Russian Federation,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru,
ORCID: 0000-0002-4144-7090

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 ($\sin$, $\cos$, $\tan$ 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/>.