МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

Юго-Западного государственного университета

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Научный журнал

Том 12 № 1 / 2022

Proceedings

of the Southwest State University

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

Scientific Journal

Vol. 12 № 1 / 2022

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie)

Научный рецензируемый журнал

Основан в 2011 г.

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как информационные и интеллектуальные системы, мехатроника и робототехника, распознавание и обработка изображений, системный анализ и принятие решений, моделирование в медицинских и технических системах, приборы и методы контроля природной среды.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

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

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
Адрес учредителя, издателя и редакции:
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94
Телефон: +7(4712) 22-25-26,
Факс: +7(4712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

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

ISSN 2223-1536 (Print)
Префикс DOI: 10.21869
Сайт журнала: https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/

© Юго-Западный государственный университет, 2022

Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

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

16+

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

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. В. Кофановой

Подписано в печать 29.03.2021. Формат 60x84/8.
Дата выхода в свет 19.04.2022.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 20,0.
Тираж 1000 экз. Заказ 9.

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 doctorial or candidate thesis in the following areas:

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

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

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

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

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Zhanybai T. Zhusubaliev, 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/

© Southwest State University, 2022

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

Printing office:
Printing Center
of the Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str., 94,
Kursk 305040, Russian Federation

16+

Subscription and distribution:
the journal is distributed by subscription.
Subscription index 44288
in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. V. Kofanova

Signed for printing 29.03.2022. Format 60x84/8.
Release date 19.04.2022.
Offset paper. Printer's sheets: 20,0.
Circulation 1000 copies. Order 9.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....8

Оригинальные статьи

Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона 8

Киселев А. В., Кузьмин А. А., Мяснянкин М. Б., Маслак А. А., Филист С. А., Рыбочкин А. Ф.

Разработка и реализация web-ресурса для стоматологической клиники 33

Малышев А. В., Конаныхина Т. Н., Немченко С. А.

МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....54

Оригинальные статьи

Влияние агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на пропускную способность и энергопотребление беспроводной сенсорной сети.....54

Павлов А. М.

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ.....65

Оригинальные статьи

Метод и алгоритм обучения сверточной нейронной сети, предназначенной для интеллектуальной системы распознавания меланомы 65

Томакова Р. А., Дзюбин И. А., Брежнев А. В.

Восстановление непрерывного изображения с использованием оценок максимального правдоподобия и интерполяции по атомарным функциям в соответствии с апертурой светочувствительного элемента датчика 84

Ефремова И. Н., Ефремов В. В.

Применение CUDA и тензорных ядер в задачах обнаружения и распознавания объектов.....99

Дегтерев С. В., Лапина Т. И., Криушина Ю. А., Криушин Е. А.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....111

Оригинальные статьи

Методика расчета стоимости запуска ракет космического назначения для выведения на орбиту спутников дистанционного зондирования земной поверхности.....111

Стельмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С.

Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности 129

Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....145

Оригинальные статьи

Прогнозирование возникновения и развития фатальных сосудистых осложнений при COVID-19 с использованием нечетких математических моделей 145

Быков А. В., Кореневский Н. А., Винников А. В., Безуглов А. И.

Программная система виртуальной машины с поддержкой передачи сообщений между потоками.....160

Чаплыгин А. А.

К сведению авторов.....172

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS 8

Original articles

Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Analysis of the Variability of Slow Waves in the VLF Range 9

Kiselev A. V., Kuzmin A. A., Myasnyankin M. B., Maslak A. A., Philist S. A., Rybochkin A. F.

Development and Implementation of a Web Resource for the Dental Clinic..... 33

Malyshev A. V., Konanykhina T. N., Nemchenko S. A.

MECHATRONICS, ROBOTICS..... 54

Original articles

Influence of the Quasi-Stationary Measurement Data Aggregation in Sensor Nodes on the Throughput and Power Consumption of the Wireless Sensor Network 54

Pavlov A. M.

IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING 65

Original articles

A Method and Algorithm for Training a Convolutional Neural Network Designed for an Intelligent Melanoma Recognition System 65

Tomakova R. A., Dzyubin I. A., Brezhnev A. V.

Reconstruction of a Analog Image Using Maximum Likelihood and Interpolation by Atomic Functions According to the Aperture of the Photosensitive Element of the Sensor 84

Efremova I. N., Efremov V. V.

Application of CUDA and Tensor Kernels in Object Detection and Recognition Problems..... 99

Degterev S. V., Lapina T. I., Kriushina Y. A., Kriushin E. A.

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING 111

Original articles

Methodology for Calculation of the Cost of Launch of Space Rockets for Introducing Remote Sensing Satellites of the Earth's Surface into Orbit 111

Stelmakh S. F., Andronov V. G., Koptev D. S.

Determination and Assessment of the Level of Deviations of Unmanned Aerial Vehicles from a Given Trajectory from Images of the Underlying Surface 129

Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A.

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS.....145

Original articles

Prediction of the Occurrence and Development of Fatal Vascular Complications in COVID-19 Using Fuzzy Mathematical Models 145

Bykov A. V., Korenevsky N. A., Vinnikov A. V., Bezuglov A. I.

Virtual Machine Software System with Support for Message Transfer Between Threads 160

Chaplygin A. A.

Information for Authors 172

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-8-32

(cc) BY 4.0

Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона

А. В. Киселев[1], А. А. Кузьмин[1], М. Б. Мяснянкин[1], А. А. Маслак[2], С. А. Филист[1] ✉, А. Ф. Рыбочкин[1]

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

[2] Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани
ул. Кубанская 200, г. Славянск-на-Кубани 353560, Российская Федерация

✉ e-mail: SFilist@gmail.ru

Цель исследования *– разработка метода классификации функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона для диагностики функционального состояния системы дыхания.*

Методы*. Предлагаемый метод строится на основе мультимодального анализа ритмов кардиореспираторной системы. Для выделения медленных волн второго порядка используется вейвлет-преобразование мониторинговых кардиосигналов. Детектор медленных волн второго порядка строится на основе анализа Фурье каждой строки вейвлет-плоскости, принадлежащей к области ритма дыхания. Это позволяет построить иерархическую структуру «слабых» классификаторов с последующим их усилением. При формировании дескрипторов для таких классификаторов сигналы медленных волн, отражающие вариации ритма дыхания, извлекаются из мониторингового кардиосигнала посредством разведочного анализа в области частот ритма дыхания и последующего вейвлет-анализа в области частот, соответствующих определенному в результате разведочного анализа частотному диапазону ритма дыхания. Компоненты релевантных строк вейвлет-плоскости используются для вычисления дескрипторов обучаемой нейронной сети, принимающей решение по отнесению текущего состояния системы дыхания к тестируемому состоянию.*

Результаты. *Проведенные исследования показали, что функциональное состояние кардиореспираторной системы характеризует динамика медленных волн первого и второго порядка, которые связаны как с системными ритмами вегетативной нервной системы, так и с системными ритмами центральной нервной системы. В ходе экспериментальных исследований на контрольной выборке был проведен сравнительный анализ двух методов классификации функционального состояния системы дыхания – предлагаемого и рентгенологического. Предлагаемый метод исследования превосходят рентгенологические по специфичности и несколько уступают по чувствительности, что позволяет рекомендовать их в клиническую практику.*

© Киселев А. В., Кузьмин А. А., Мяснянкин М. Б., Маслак А. А., Филист С. А., Рыбочкин А. Ф., 2022

Заключение. *В ходе проведенного исследования было выявлено, что для выделения дескрипторов, на основе которых строятся классификаторы функционального состояния системы дыхания, может быть использована корреляция строк вейвлет-плоскостей электрокардиосигнала с системой дыхания при помощи Фурье-анализа.*

Ключевые слова: *дескриптор; нейросетевой классификатор; вейвлет-преобразование; кардио-респираторная система; мультимодальный анализ; системные ритмы.*

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

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

Для цитирования: Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона / А. В. Киселев, А. А. Кузьмин, М. Б. Мяснянкин, А. А. Маслак, С. А. Филист, А. Ф. Рыбочкин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 8–32. https://doi.org/10.21869/ 2223-1536-2022-12-1-8-32.

Поступила в редакцию 05.01.2022 *Подписана в печать 04.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Analysis of the Variability of Slow Waves in the VLF Range

Alexey V. Kiselev[1], Alexander A. Kuzmin[1], Maksim B. Myasnyankin[1], Anatoly A. Maslak[2], Sergey A. Philist[1] ✉, Anatoly F. Rybochkin[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya st. 94, Kursk 305040, Russian Federation

[2] Branch of the “Kuban State University” in Slavyansk-on-Kuban
200 Kubanskaya str., Slavyansk-on-Kuban 353560, Russian Federation

✉ e-mail: SFilist@gmail.ru

Abstract

The purpose of research *is development of a method for classifying the functional state of the respiratory system based on the analysis of the variability of slow waves of the VLF range for diagnosing the functional state of the respiratory system.*

Methods. *The proposed method is based on multimodal analysis of the rhythms of the cardiorespiratory system. To select slow waves of the second order, the wavelet transform of monitoring cardiac signals is used. The detector of slow waves of the second order is built on the basis of the Fourier analysis of each line of the wavelet plane belonging to the region of the breathing rhythm. This allows you to build a hierarchical structure of "weak" classifiers with their subsequent strengthening. When generating descriptors for such classifiers, the signals of slow waves reflecting variations in the breathing rhythm are extracted from the monitoring cardiosignal by means of exploratory analysis in the frequency range of the breathing rhythm and subsequent wavelet analysis in the frequency range corresponding to the frequency range of the breathing rhythm determined as a result of the exploratory analysis. The components of the relevant strings of the wavelet plane are used to calculate the descriptors of the trained neural network, which makes a decision on assigning the current state of the respiratory system to the tested state.*

Results. *The studies have shown that the functional state of the cardiorespiratory system is characterized by the dynamics of slow waves of the first and second order, which are associated both with the systemic rhythms of the autonomic nervous system and with the systemic rhythms of the central nervous system. In the course of experimental studies on the control sample, a comparative analysis of two methods of classification of the functional state of the respiratory system was carried out: the proposed one and the radiological one. The proposed research method is superior to radiological in specificity and somewhat inferior in sensitivity, which makes it possible to recommend them for clinical practice.*

Conclusion*. In the course of the study, it was revealed that for the identification of descriptors, on the basis of which classifiers of the functional state of the respiratory system are built, the correlation of wavelet-planes of the electrocardiosignal with the respiratory system using Fourier analysis can be used.*

Keywords: *descriptor; neural network classifier; wavelet transform; cardiorespiratory system; multimodal analysis; systemic rhythms.*

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

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

For citation: Kiselev A. V., Kuzmin A. A., Myasnyankin M. B., Maslak A. A., Philist S. A., Rybochkin A. F. Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Analysis of the Variability of Slow Waves in the VLF Range. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 8–32. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-8-32.

Received 05.01.2022 *Accepted 04.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

Пандемия COVID-19 обнаружила, что вся система здравоохранения недостаточно подготовлена к этой беспрецедентной чрезвычайной ситуации в области общественного здравоохранения и клинической практики. Клиническая сложность COVID-19 варьируется от бессимптомных случаев до тяжелой пневмонии, прогрессирование которой до дыхательной недостаточности трудно предсказать. Пневмония чаще всего возникает на второй или третьей неделе симптоматической инфекции и характеризуется уровнем смертности от 3 до 10% [1; 2; 3]. В целом существует высокая степень неопределенности как в отношении прогрессирования состояния здоровья пациента, так и в отношении скорости, с которой у пациентов развивается дыхательная недостаточность, требующая искусственной вентиляции легких [4; 5].

Прогностические модели, построенные на основе методов искусственного интеллекта, показали потенциал при создании систем поддержки принятия врачебных решений для оценки медицинских рисков [6; 7], в том числе и связанных с COVID-19. Однако любая прогностическая модель, построенная на методах машинного обучения, имеет проблему оптимизации «сырых» данных, на основе которых формируются независимые переменные модели [8; 9; 10]. Определяющее влияние этой проблемы на точность модели было указано академи-

ком А. Г. Ивахненко в конце семидесятых годов прошлого века. Надежды на то, что эта проблема решится посредством нейросетевых моделей, оказались эфемерными, что породило недоверие к методам машинного обучения у специалистов в области клинической медицины.

Сложности оптимизации вектора независимых переменных обусловлены корреляционными связями в «сырых» данных, которые весьма сложно определить даже в случае хорошо изученных заболеваний. Например, в [11] для исследования механики дыхания используется анализ электромиосигнала с дыхательных мышц и скоростных характеристик вдыхаемого/выдыхаемого воздуха при различных дыхательных маневрах. Из объемной скорости движения воздуха вычисляют характеристики ускорения вдыхаемого/выдыхаемого воздуха, расчет показателей электромиограммы проводят отдельно для каждой фазы дыхательного цикла. Отдельно рассматривают работу дыхательных мышц во время вдоха и во время выдоха. Тем не менее в этих исследованиях не приводятся решенные диагностические задачи при наличии достаточно сложного диагностического оборудования.

В работе [12] посредством анализа степени утомления с помощью стимуляционной электронейромиографии диагностируется синдром утомления дыхательной мускулатуры у больных бронхиальной астмой. В качестве нагрузки используется провокационная проба с применением аппарата Фролова. Данная методика не может считаться универсальной, так как анализ проводится по абсолютному значению параметра амплитуды, без проведения анализа динамики изменения амплитуды, который позволяет определить утомляемость мышц.

В работе [13] предлагается осуществлять оценку эффективности работы дыхательных мышц на основе анализа среднего значения амплитуды поверхностной ЭМГ с дыхательных мышц при экспираторном усилии. Рассчитывают индекс эффективности дыхательных мышц (ИЭ) как отношение разности значений амплитуды ЭМГ при исходной и средней нагрузках к отношению значения величины средней амплитуды к 30. При значении ИЭ больше 70 делают заключение о низкой эффективности работы дыхательных мышц. При значении ИЭ меньше 70 эффективность работы дыхательных мышц оценивают как высокую. Однако в работе не сообщается о решаемых диагностических задачах и возможности оценки функционального состояния системы дыхания в целом.

В [14] описан способ для анализа вариабельности показателей внешнего дыхания в VLF-диапазоне (Very Low Freqyency, 0,04–0,015 Гц или 25–70 секунд), согласно которому сначала проводят запись пневмограммы в течение 30 минут, а затем без перерыва в течение

30 минут регистрируют параметры легочного газообмена (легочной вентиляции, потребления кислорода, выделения углекислого газа и других параметров) методом газоанализа breath-by-breath. Способ позволяет исследовать ритмичность легочного газообмена и вариабельность дыхательного ритма посредством быстрого преобразования Фурье с последующим использованием этих предикторов для оценки функционального состояния системы дыхания. Недостатком способа является отсутствие возможности осуществлять классификацию получаемых в результате исследований данных и получения диагностических заключений по состоянию системы дыхания.

При построении моделей классификаторов медицинского риска часто используют фреймворки с открытым программным кодом, в частности используется фреймворк Microsoft LightGBM. Клиницисты оценили возможность его прозрачности («стеклянной коробки»), которая показала основные переменные модели, в которой патофизиологическая интерпретация была правдоподобной. Что касается переменных, используемых в гибридных моделях, некоторые из них могут быть сгруппированы в пределах гипоксического повреждения (одышка, HCO3-, pH, репарация и частота сердечных сокращений), другие – в отношении воспаления (С-реактивный белок, D-димер, тромбоциты, эритроциты, лимфоциты), в отношении поражения органов (лактатдегидрогеназа, креатинин-киназа). Системы поддержки принятия медицинских решений должны обеспечивать прозрачность, чтобы объяснять, как ведет себя прогностическая модель. С этой точки зрения необходим подход интерпретации как для лучшего понимания состояния здоровья пациента, так и для лучшего выявления опасных предубеждений, которые модель могла бы усвоить [15; 16; 17].

Анализ современных систем стратификации медицинского риска показал [18], что их нельзя считать совершенными, так как в них учитываются далеко не все известные в настоящее время факторы риска, а сделан акцент на традиционных факторах риска и методах моделирования. Таким образом, в современных условиях традиционных факторов риска и методических подходов к построению интеллектуальных систем прогнозирования рисков недостаточно для надежного предсказания возникновения заболеваний. Поэтому перспективным является включение ряда новых факторов в прогностическую модель, в частности модель внебольничной пневмонии, которые могут быть использованы в системах стратификации риска у лиц, не имеющих клинических проявлений внебольничной пневмонии, а также разработки новой методологии построения моделей медицинского риска.

Материалы и методы

Известны методы классификации системы дыхания, в которых осуществляется запись пневмограммы, на основе

которой анализируется вариабельность ритма дыхания. Так как аналитический обзор показал, что этот метод не позволяет качественно классифицировать функциональное состояние системы дыхания, то параллельно с записью пневмограммы проводят запись электрокардиосигнала, осуществляют спектральное преобразование пневмосигнала и вейвлет-преобразование электрокардиосигнала, в спектре пневмосигнала выделяется частотный диапазон, занимаемый пневмосигналом, а на вейвлет-плоскости электрокардиосигнала выделяются строки, принадлежащие частотному диапазону пневмосигнала, определяются показатели вариабельности этих строк по времени и по частоте, которые используются в качестве дескрипторов для обучаемого классификатора функционального состояния системы дыхания, выполненного на многослойной нейронной сети прямого распространения.

Нейронная сеть является нейронной сетью блочного типа и состоит из двух автономных нейронных сетей, каждая из которых имеет два выхода, показывающих вероятность нахождения системы дыхания в заданном функциональном состоянии и вероятность нахождения системы дыхания в индифферентном классе, и третьей нейронной сети, агрегирующей решения первых двух по обоим выходам [19].

В качестве дескрипторов первой автономной нейронной сети используются показатели вариабельности выделенных строк вейвлет-плоскости по времени, а в качестве дескрипторов второй автономной нейронной сети используются показатели вариабельности выделенных строк вейвлет-плоскости по частоте [20; 21].

Для вычисления дескрипторов первой автономной нейронной сети формируют матрицу размером LxN из строк вейвлет-плоскости, лежащих в области частот ритма дыхания, определяют спектры Фурье $\{f_{\ell n}\}, \ell = \overline{1,L}, n = \overline{1,N}$ строк полученной матрицы, выделяют из N спектральных коэффициентов Фурье в каждой из L строк матрицы M коэффициентов $f^*_{\ell m}$, соответствующих диапазону VLF спектра, определяют первые разности этих коэффициентов по строкам и вычисляют множество дескрипторов $\{d1_j\}, j = \overline{1,M}$ как

$$d1_j = \sum_{\ell=2}^{L} \left| f^*_{\ell,j} - f^*_{\ell-1,j} \right|. \qquad (1)$$

Для вычисления дескрипторов второй автономной нейронной сети формируют матрицу вейлет-коэффициентов $\{w_{\ell n}\}, \ell = \overline{1,L}, n = \overline{1,N}$ размером LxN из строк вейвлет-плоскости, лежащих в области частот ритма дыхания, транспонируют полученную матрицу вейвлет-коэффициентов в матрицу NxL, в каждой из N строк транспонированной матрицы

находят максимальный по абсолютной величине вейвлет-коэффициент, определяют номер строки транспонированной матрицы, которой принадлежит этот вейвлет-коэффициент, формируют вариационный ряд из N номеров строк транспонированной матрицы, элементы которого определяют как

$$d2_n = \arg\left(\max_{\ell \in \overline{1,L}} \left(\left|w_{n\ell}\right|\right)\right), \qquad (2)$$

определяют спектр полученного вариационного ряда как (3):

$$fd2_k = \sum_{n=1}^{N} d2_n \cdot \exp(-2\pi kn / N), \qquad (3)$$

выбирают из множества $\{fd2_k\}$, $k = \overline{1,N}$ множество спектральных коэффициентов $\{fd2_k^*\}$, $k = \overline{1,\Theta}$, лежащих в диапазоне VLF, и используют значения элементов этого множества в качестве дескрипторов второй автономной нейронной сети.

Метод классификации ФС СД осуществляется с помощью устройства, структурная схема которого представлена на рисунке 1. Устройство осуществляет съем сигналов пневмограммы и ЭКС с пациента 1 посредством подключенных к нему своими датчиками пневмографа 2 и электрокардиографа 3, оцифровку сигналов пневмографа и электрокардиографа с помощью подключенных к их выходам аналого-цифровых преобразователей 4 и 5 и обработку оцифрованных сигналов посредством ЭВМ 6, на входы которой поступают сигналы с выходов аналого-цифровых преобразователей 4 и 5.

Для реализации классификатора ФС СД в ЭВМ 6 имеются следующие программные модули: модули формирования данных 7 и 8, модуль спектрального анализа 9, селектор частот пневмограммы 10, модуль вейвлет-анализа 11, модуль формирования дескрипторов 12 и модуль нейросетевого моделирования 13.

Устройство работает следующим образом. К пациенту 1 подключаются датчики пневмографа 2 и электрокардиографа 3. АЦП 4 и АЦП 5 оцифровывают сигналы пневмограммы и ЭКС и подают их на входы ЭВМ 6. По команде «Измерение» ЭВМ 6 начинает формировать файлы данных с дискретными отсчетами пневмограммы и ЭКС посредством программных модулей 7 и 6. После получения синхронной записи файлов с заданным числом отсчетов в модуле 9 определяется спектральный диапазон пневмограммы, который занимает полосу частот от 0,2 Гц до 0,4 Гц. Пример этого спектра приведен на рисунке 2.

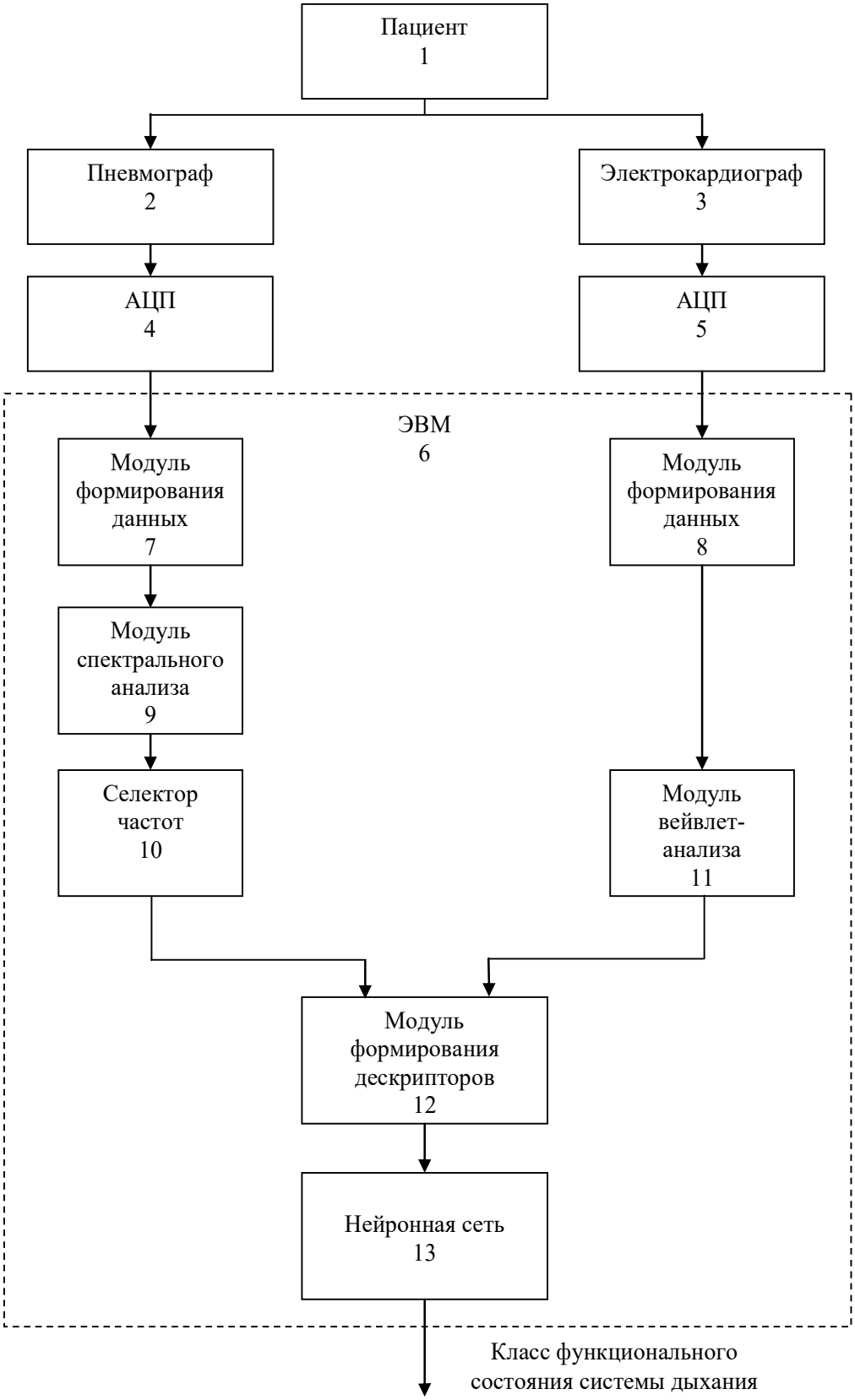


Рис. 1. Структурная схема устройства для осуществления предлагаемого способа

Fig. 1. Block diagram of a device for implementing the proposed method

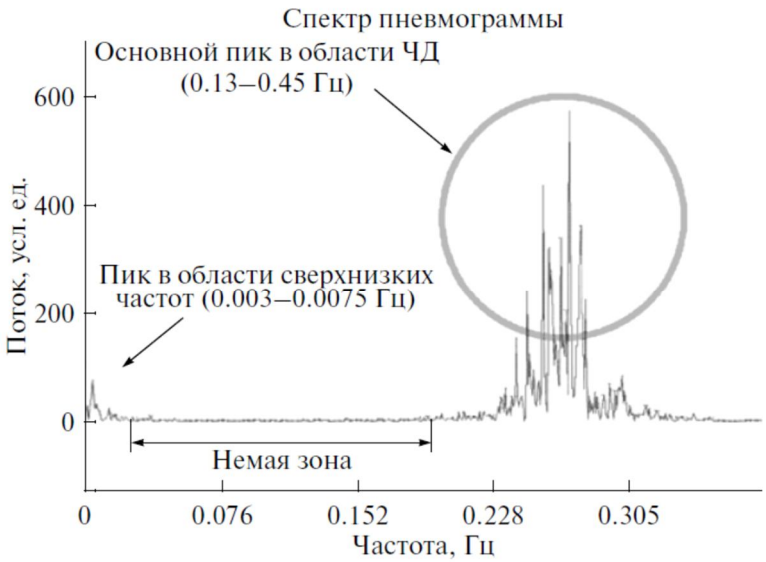


Рис. 2. Цуг спектра ритма дыхания, полученный по результатам анализа Фурье-сигнала пневмограммы

Fig. 2. Zug of the respiratory rhythm spectrum obtained from the results of the Fourie-analysis of the pneumogram signal

Программный модуль «селектор частот» 10 выделяет диапазон частот, в котором лежит основная энергия спектра пневмограммы, и передает границы этого диапазона в модуль формирования дескрипторов 12. В модуле «вейвлет-анализ» 11 определяется вейвлет-преобразование ЭКС по данным, полученным в модуле 8.

На рисунке 3 показана вейвлет-плоскость ЭКС. ЭКС оцифрован с частотой дискретизации 100 Гц и содержит 11000 отсчетов. Параметры построения вейвлет-плоскости выбраны таким образом, чтобы вейвлет-плоскость состояла из 800 строк. При таких условиях вейвлет-плоскость покрывает частотный диапазон от 40 Гц до 0,125 Гц. Частотный диапазон РД лежит в нижней части вейвлет-плоскости. При этом необходимо учитывать, что РД распределен между секторами вейвлет-плоскости с учетом того, что кроме первой гармоники РД, представленной на рисунке 2 в виде цуга, в спектре РД имеются аналогичные цуги в области кратных гармоник.

Развертка нескольких строк вейвлет-плоскости, находящихся в секторе РД, показана на рисунке 4. В секторе вейвлет-плоскости 0,1 Гц волна РД частотой 0,1 Гц модулируется медленной волной VLF, в данном случае волной 0,015 Гц. Так как на графике отражены амплитудно-детектированные значения вейвлет-коэффициентов в строках, то внизу графика рисунок 4 приведен график действительных составляющих n-й строки вейвлет-плоскости (без детектирования). Частота РД модулируется волнами VLF, период которых составляет 25 … 70 с [22].

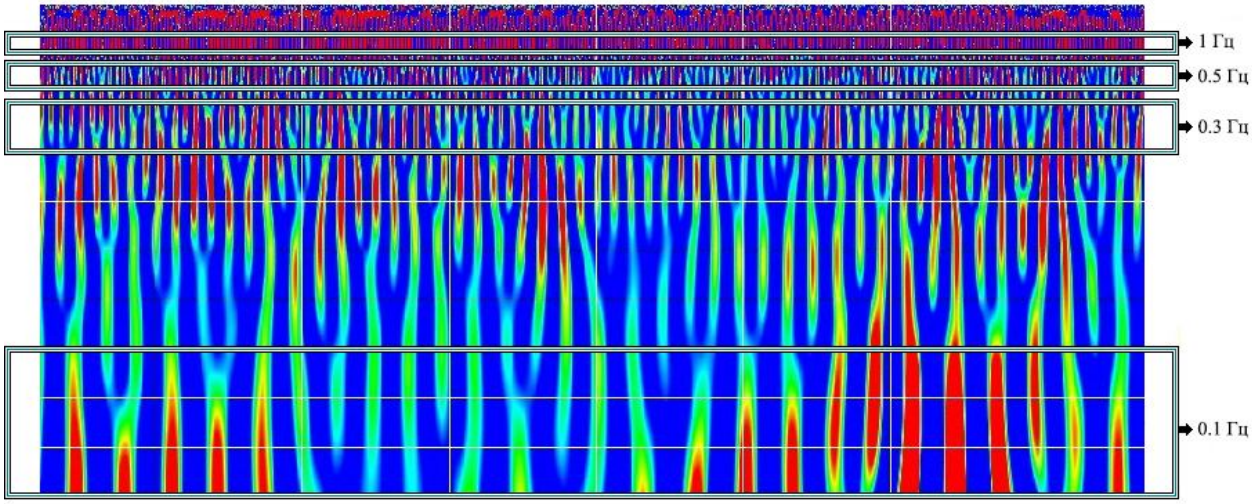


Рис. 3. Вейвлет-плоскость электрокардиосигнала с секторами медленных волн первого порядка HF (0,3 Гц) и второго порядка LF (0,1 Гц) с модуляцией их волнами с периодом 10 с и 60 с соответственно

Fig. 3. Wavelet plane of the electrocardiosignal with sectors of slow waves of the first order HF (0,3 Hz) and the second order LF (0,1 Hz) with modulation by their waves with a period of 10 s and 60 s respectively

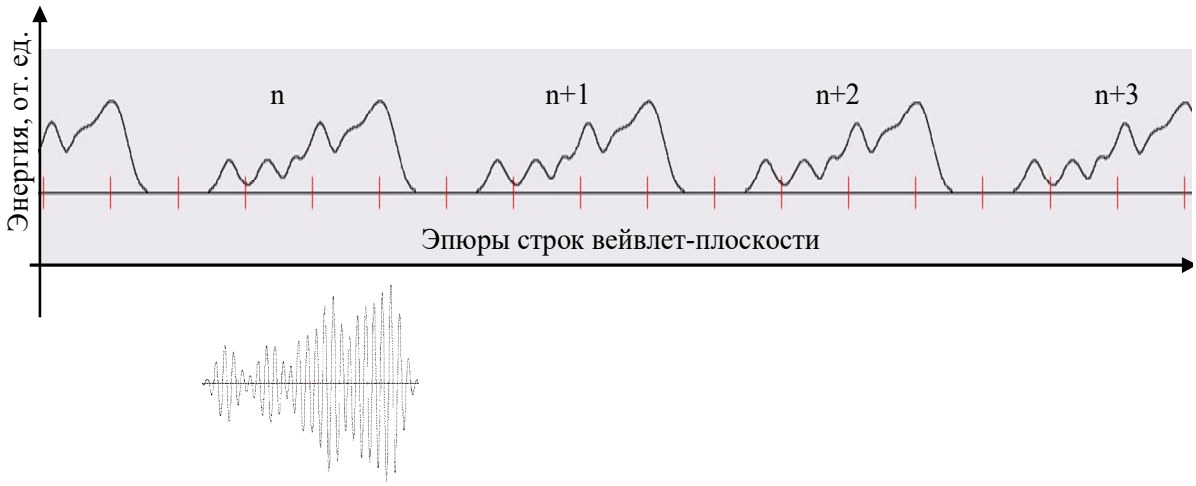


Рис. 4. Развертка строк вейвлет-плоскости в сегменте дыхательного ритма: волна дыхания (0,2 Гц), модулированная волнами 0,04 Гц (n – 548-я строка вейвлет-плоскости): под эпюрой строки n показан недетектированный сигнал в n-й строке вейвлет-плоскости

Fig. 4. Scanning of the plane lines in the segment of the respiratory rhythm: a breath wave (0,2 Hz) modulated by 0,04 Hz waves (n - 548th line of the wavelet plane): under the plot of line n is shown an undetected signal in the nth line of the wavelet plane

Для снижения корреляционных связей строк вейвлет-плоскости было предложено увеличить величину шага изменения масштаба вейвлет-плоскости. На рисунке 5 показана вейвлет-плоскость электрокардиосигнала, содержащая 20 строк и построенная при шаге изменения масштаба вейвлетов η = 230. Она имеет граничные частоты 40… 0,182 Гц.

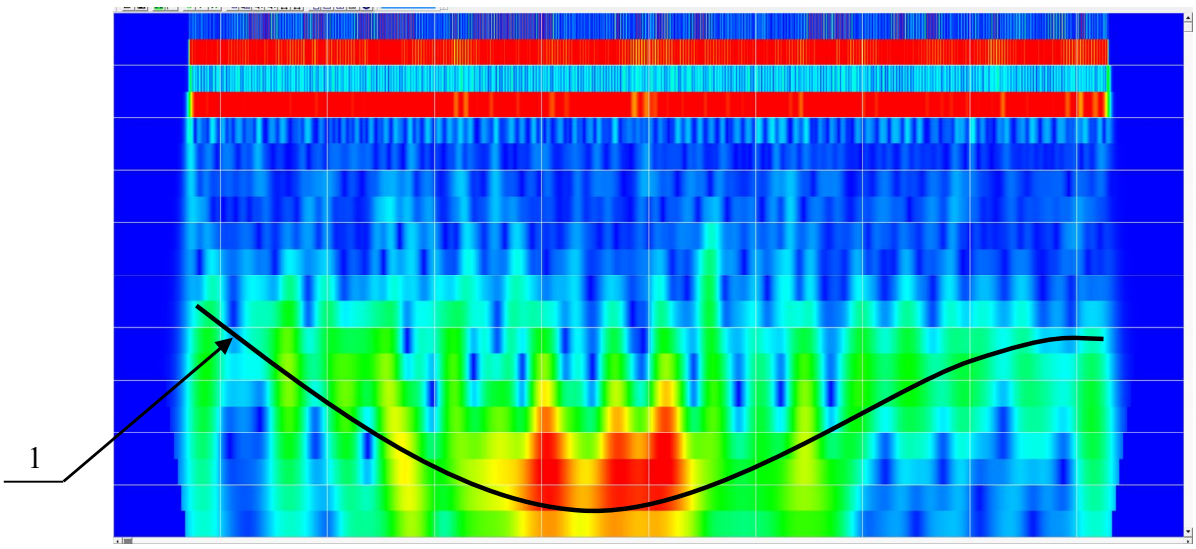


Рис. 5. Изображение вейвлет-плоскости электрокардиосигнала (амплитудные значения вейвлет-коэффициентов) с увеличенным шагом изменения масштаба вейвлетов: 1 – интерполяционная кривая, аппроксимирующая вариацию частоты ритма дыхания

Fig. 5. Image of the wavelet plane of the electrocardiosignal (amplitude values of wavelet coefficients) with an increased step of changing the of the wavelet: 1 – an interpolation curve approximating the variation of the respiratory rate

При определении дескрипторов для классификаторов ФС СД полагаем, что носителем релевантной информации является вариация РД в процессе мониторинга ЭКС. Если использовать в качестве базиса для определения дескрипторов вейвлет-коэффициенты ЭКС, то дескрипторы определяются на основе анализа вариации вейвлет-коэффициентов по времени и по частоте в области РД вейвлет-плоскости. Эти вариации будем оценивать на временной апертуре ЭКС, т. е. по оси сдвигов, и по частотной оси вейвлет-плоскости (оси масштабов). При этом вариация оценивается в определенном фрагменте вейвлет-плоскости, примеры которых представлены на рисунке 3. Такой фрагмент дает матрицу вейвлет-коэффициентов, элементы которой используем в качестве сырых данных для определения дескрипторов.

Для построения классификаторов ФС СД были использованы нейросетевые структуры с различными технологиями бустинга [23]. Структурная схема иерархического классификатора представлена на рисунке 6.

Он состоит из двух автономных нейронных сетей прямого распространения NET 13-1 и NET 13-2 и агрегирующей нейронной сети NET 13-3. В качестве дескрипторов первой автономной нейронной сети используются показатели вариабельности выделенных строк вейвлет-плоскости по времени, а в качестве дескрипторов второй автономной нейронной сети используются показатели вариабельности выделенных строк вейвлет-плоскости по частоте.

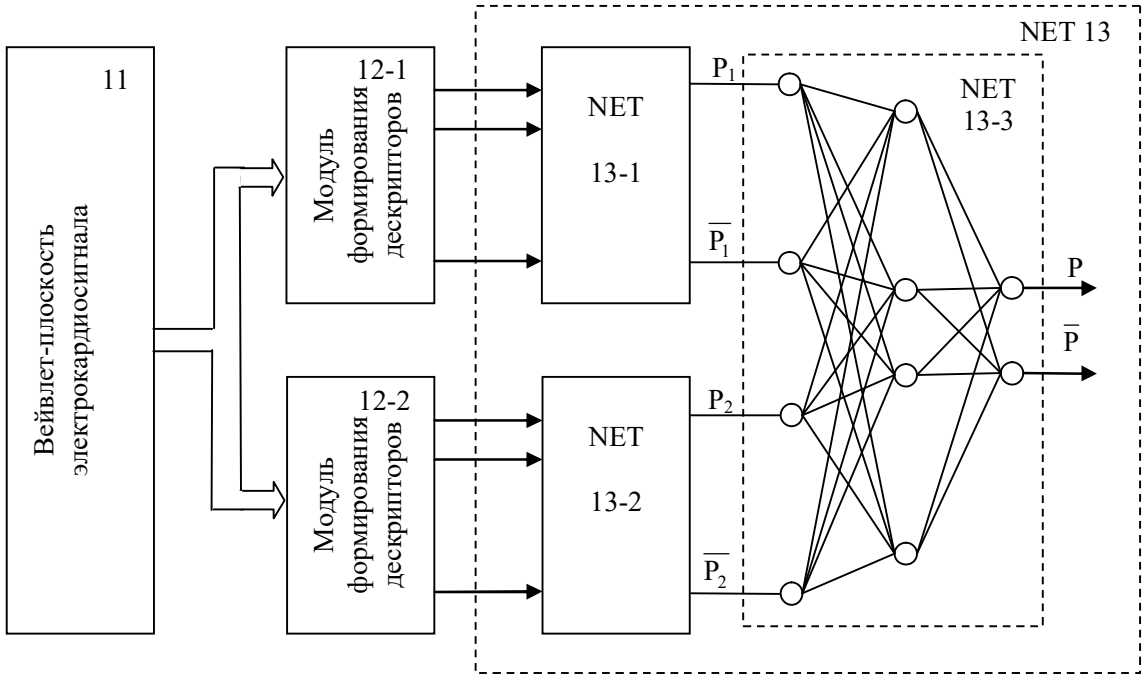


Рис. 6. Структурная схема иерархического классификатора

Fig. 6. Structural diagram of a hierarchical classifier

Вычисления дескрипторов первой автономной нейронной сети NET 13-1 осуществляют согласно алгоритму, представленному на рисунке 7.

В блоке 14 осуществляется ввод строк вейвлет-плоскости, находящихся в области РД. В результате формируется матрица вейвлет-коэффициентов размером LxN. В блоке 15 определяются спектры Фурье в строках этой матрицы. В результате множество вейвлет-коэффициентов $\{w_{\ell n}\}, \ell = \overline{1, L}, n = \overline{1, N}$ трансформируется в множество коэффициентов Фурье $\{f_{\ell k}\}, \ell = \overline{1, L}, k = \overline{1, N}$, где

$$f_{\ell k} = \sum_{n=1}^{N} w_{\ell n} \cdot \exp(-2\pi kn / N). \qquad (4)$$

В блоке 16 осуществляют селекцию столбцов спектральных коэффициентов, в результате которой в каждой строке из N спектральных коэффициентов выбирают M спектральных коэффициентов, принадлежащих диапазону VLF. Матрица спектральных коэффициентов преобразуется из LxN в LxM с элементами $\{f^*_{\ell m}\}, \ell = \overline{1, L}, m = \overline{1, M}$.

В блоке 17 определяют первые разности элементов по строкам матрицы LxM как

$$\Delta_{\ell m} = f^*_{\ell,m} - f^*_{\ell,m-1}, \quad m = \overline{2, M} \ . \ (5)$$

В блоке 18 осуществляют вычисление дескрипторов для NET 13-1 по (6):

$$d1_m = \sum_{\ell=2}^{L} |\Delta_{\ell m}|. \qquad (6)$$

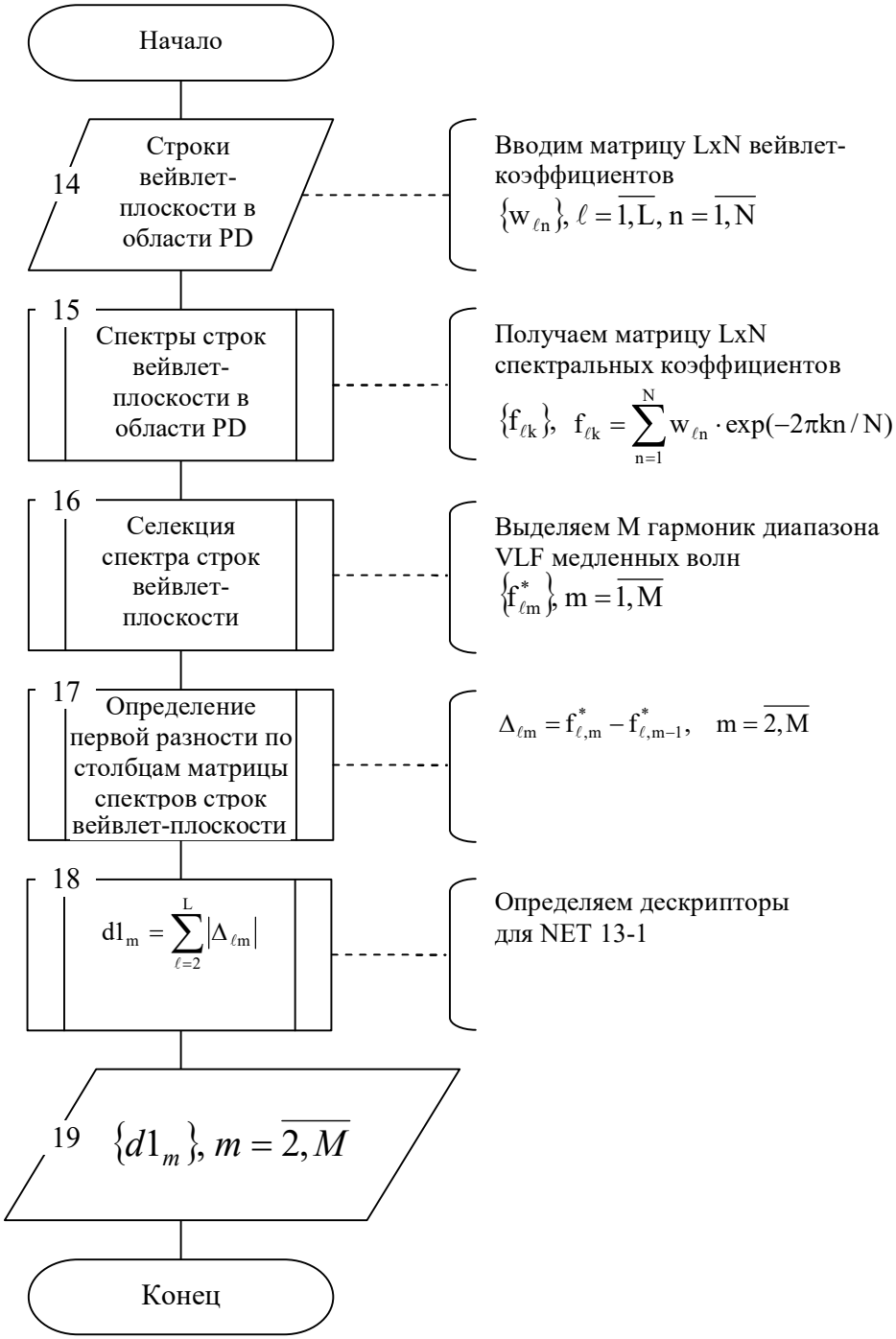


Рис. 7. Схема алгоритма вычисления дескрипторов для первой автономной нейронной сети

Fig. 7. Scheme of the algorithm for calculating descriptors for the first autonomous neural network

Вычисления дескрипторов второй автономной нейронной сети NET 13-2 осуществляются согласно алгоритму, представленному на рисунке 8. В блоке 20 осуществляется ввод строк вейвлет-плоскости, находящихся в области ритма дыхания. В результате формируется матрица вейвлет-коэффициентов $\{w_{\ell n}\}, \ell = \overline{1,L}, n = \overline{1,N}$ размером LxN.

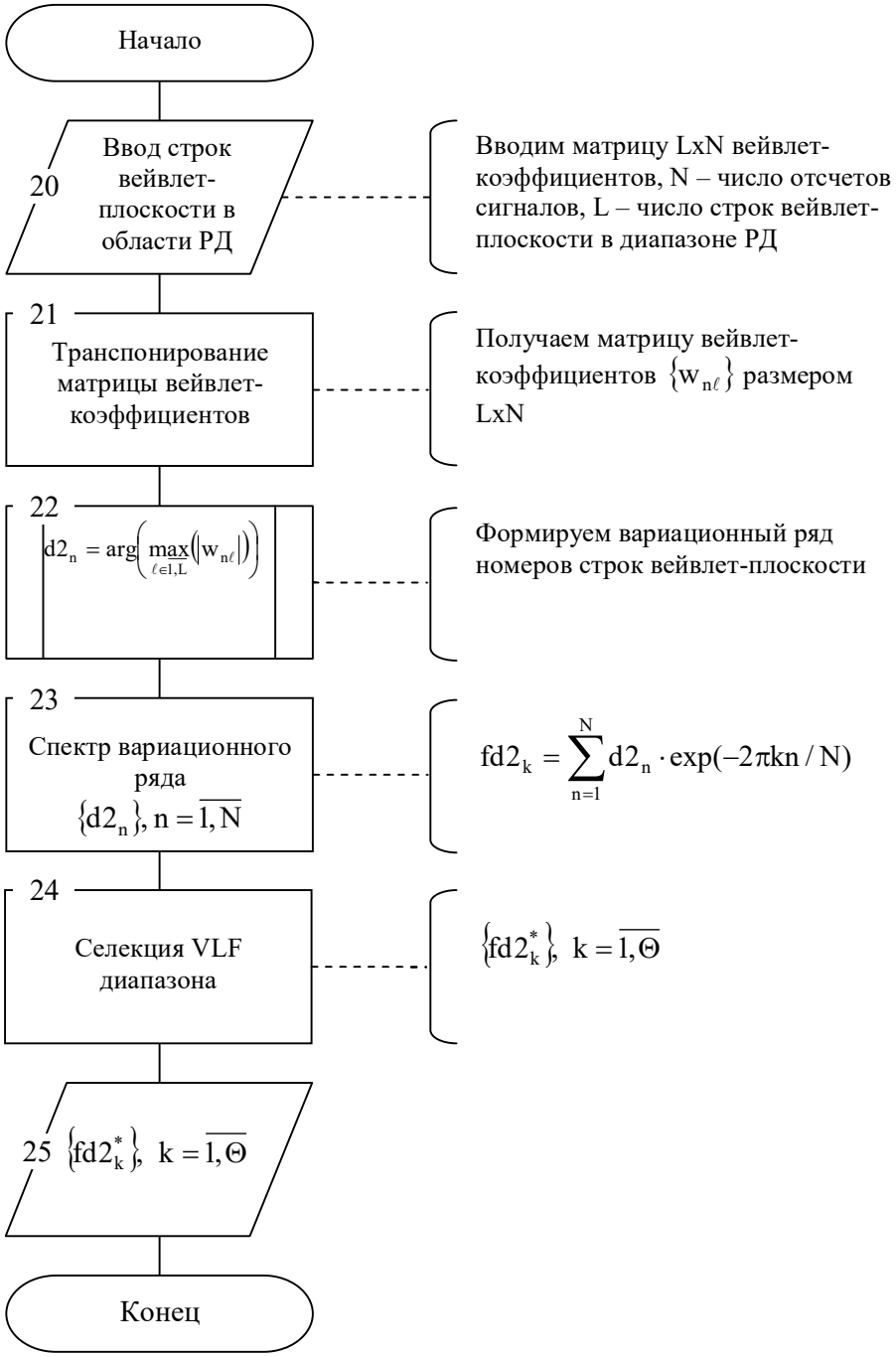


Рис. 8. Схема алгоритма вычисления дескрипторов для второй автономной нейронной сети

Fig. 8. Scheme of the algorithm for calculating descriptors for the second autonomous neural network

В блоке 21 полученную матрицу транспонируют и получают матрицу вейвлет-коэффициентов $\{w_{n\ell}\}$, $n=\overline{1,N}$; $\ell=\overline{1,L}$ размером NxL.

В блоке 22 в каждой из N строк транспонированной матрицы находят максимальный по абсолютной величине вейвлет-коэффициент и определяют но-

мер строки транспонированной матрицы, которой принадлежит этот вейвлет-коэффициент. В результате этой процедуры формируют вариационный ряд из N номеров столбцов транспонированной матрицы, элементы которого определяют согласно (2).

На рисунке 9 красным и синим цветами выделены максимальные по амплитуде значения вейвлет-коэффициентов в строках транспонированной матрицы. Значение элемента вариационного ряда определяется по максимальному по абсолютной величине вейвлет-коэффициенту, лежащему в красной или синей области. Элементу вариационного ряда присваивается значение номера столбца трансформированной матрицы, в котором находится максимальный элемент.

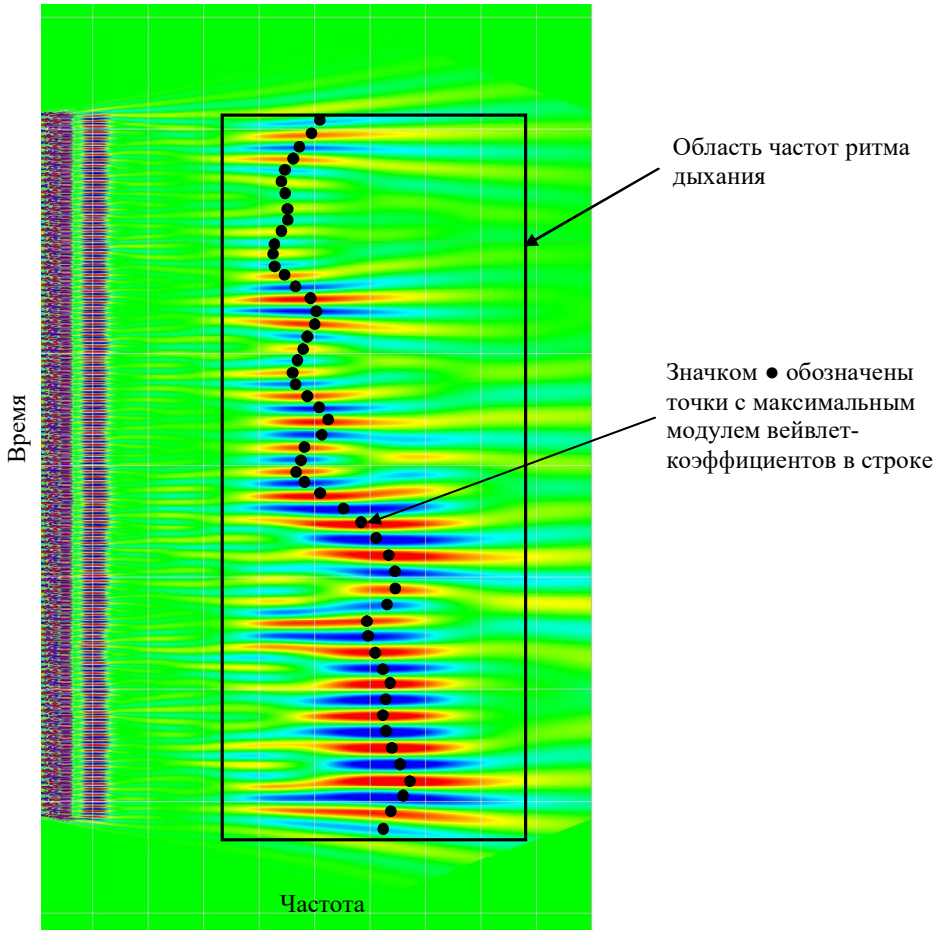


Рис. 9. Транспонированная матрица вейвлет-коэффициентов с выделенными в строках максимальными значениями модулей вейвлетов

Fig. 9. Transposed matrix of wavelet coefficients with maximum values of wavelet moduli highlighted in rows

В блоке 23 определяют спектр полученного вариационного ряда согласно (3).

В блоке 24 из множества $\{fd2_k\}$, $k=\overline{1,N}$ выбирают множество спектральных коэффициентов $\{fd2_k^*\}$, $k=\overline{1,\Theta}$,

лежащих в диапазоне VLF, и используют значения элементов этого множества в качестве дескрипторов второй автономной нейронной сети.

Классификатор обучается согласно алгоритму, представленному на рисунке 10.

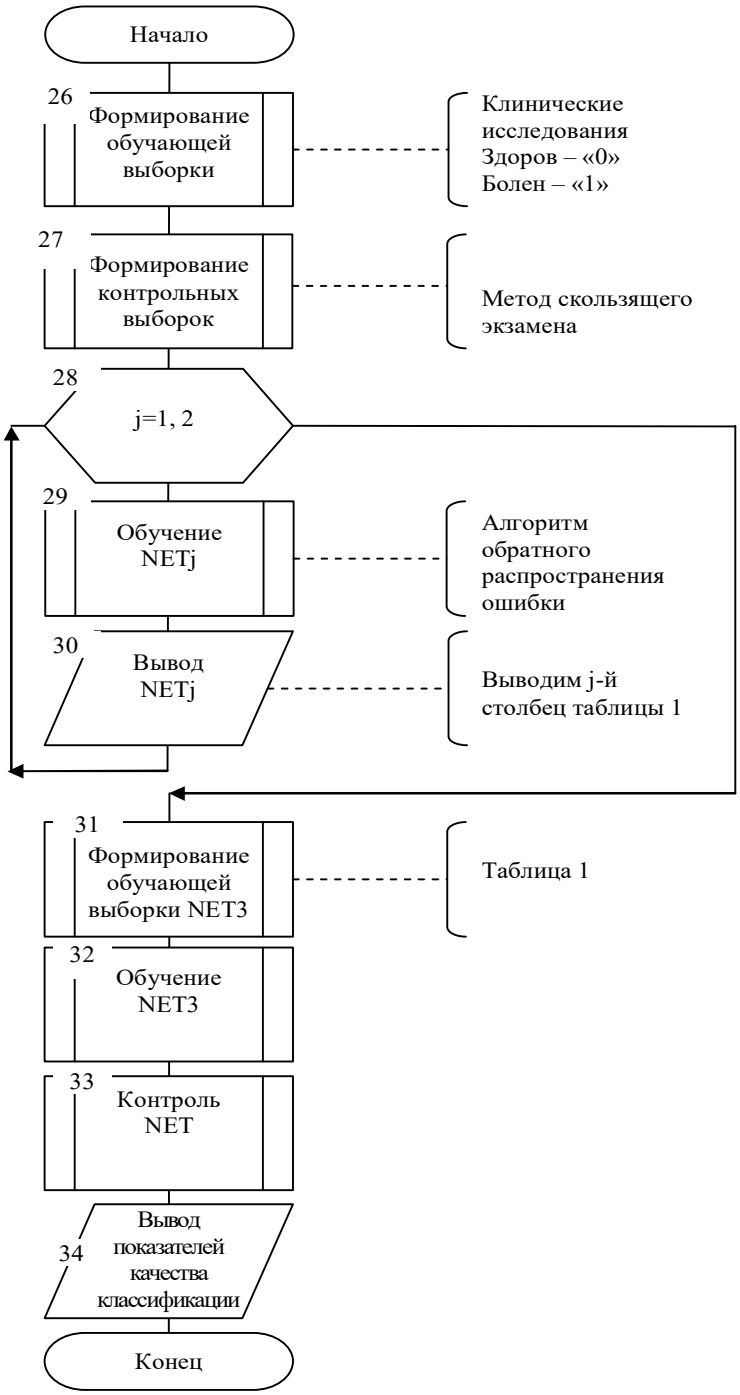


Рис. 10. Схема алгоритма для обучения нейронной сети для классификации функционального состояния системы дыхания

Fig. 10. Scheme of an algorithm for training a neural network to classify the functional state of the respiratory system

В блоке 26 формируется обучающая выборка для обучения нейронных сетей NET 13-1 и NET 13-2 (см. рис. 6). Обучающие выборки формируются на основе клинических исследований *S* пациентов, система дыхания которых находится в одном из двух классов функциональных состояний, одно из которых индифферентное.

Результаты и их обсуждение

Для апробации предложенного метода была сформирована экспериментальная группа пациентов, больных пневмонией с четко поставленным диагнозом (рентгенография, рентгеновская томография, данные лабораторного анализа) и контрольная группа волонтеров без легочных патологий. Диагнозы кодируются символами «0» и «1». Из экспериментальной и контрольной групп методом скользящего экзамена формируются контрольные выборки (блок 27, см. рис. 10). Дескрипторы определялись для каждой нейронной сети группы NET1 и NET2 посредством выполнения алгоритмов (см. рис. 7 и рис. 8).

В цикле в блоке 28 на рисунке 10 идет обучение нейронных сетей этой группы. После обучения всех нейронных сетей первого иерархического уровня формируется таблица «объект – признак» для нейронной сети NET3 (блок 31). Формат данных представлен в таблице 1. Строки в ней являются пациенты из экспериментальной и контрольной групп. В качестве независимых переменных в этой таблице выступают выходы нейронных сетей первого иерархического уровня. В блоке 32 осуществляется обучений нейронной сети NET3, а в блоке 33 осуществляют определение показателей качества классификации на контрольных выборках сети NET в целом.

Таблица 1. Формат данных для обучения нейронной сети второго иерархического уровня

Table 1. Data format for training a neural network of the second hierarchical level

NN образцов	Выход NET1		Выход NET2		Цель	
	P1	$\overline{P1}$	P2	$\overline{P2}$	P	$\overline{P}$
1	$NET1_1$	$\overline{NET1_1}$	$NET2_1$	$\overline{NET2_1}$	1	0
2	$NET1_2$	$\overline{NET1_2}$	$NET2_2$	$\overline{NET2_2}$	0	1
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
m	$NET1_m$	$\overline{NET1_m}$	$NET2_m$	$\overline{NET2_m}$	1	0

Показатели качества диагностики по классам «пневмония – нет пневмонии» для одной из контрольных выборок представлены в таблице 2. Показатели качества диагностики предлагаемого способа сравнивались с показателями качества рентгеновских исследований на той же контрольной выборке как с прототипом.

Таблица 2. Показатели качества прогнозирования на контрольной выборке

Table 2. Indicators of the quality of forecasting on the control sample

Обследуемые	Классификатор					
	на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона			рентгенологические исследования		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$m^1_{\omega 1} = 60$	76%	82%	79%	87%	68%	79%
$m^2_{\omega 1} = 60$	82%	76%		68%	87%	

Анализируя таблицу 2, приходим к выводу, что на данной контрольной выборке оба метода имеют практически одинаковые диагностические эффективности, но предлагаемый метод превосходит рентгенологические по специфичности и несколько уступает по чувствительности, что позволяет рекомендовать их в клиническую практику.

Выводы

В ходе проведенных исследований было предложено для формирования дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания использовать фрагмент вейвлет-плоскости электрокардиосигнала, соответствующий ритму дыхания. В качестве классификатора функционального состояния системы дыхания использовалась нейросетевая структура, состоящая из трех автономных нейронных сетей прямого распространения сигнала. Первые две нейронных сети имеют по два выхода, первые из которых показывают вероятность принадлежности функционального состояния системы дыхания к заданному классу, а вторые два выхода – к индифферентному классу. Третья нейронная сеть использует в качестве дескрипторов выходы первых двух нейронных сетей и является агрегатором их решений по классификации функционального состояния системы дыхания.

Дескрипторы первой нейронной сети отражают вариации ритма дыхания во времени. С этой целью осуществляется преобразование Фурье строк

вейвлет-плоскости в области ритма дыхания, выделение спектральных составляющих в них в области VLF, вычисление модулей первых разностей спектральных составляющих по столбцам вейвлет-плоскости в выделенном диапазоне и формирование вектора дескрипторов путем их суммирования в каждом столбце.

Для формирования дескрипторов второй нейронной сети определяется вариация по частоте в столбцах выделенного фрагмента вейвлет-плоскости. Вектор дескрипторов формируется как вариационный ряд, состоящий из номеров строк вейвлет-плоскости, в которых определен максимальный по модулю вейвлет-коэффициент.

Путем апробации нейросетевого классификатора, построенного на основе предложенного метода, на экспериментальной группе больных пневмонией, было установлено, что его показатели качества классификации превосходят показатели качества классификаторов, построенных на основе анализа результатов рентгенологических исследований, по специфичности, и несколько уступают им по чувствительности. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный метод исследования системы дыхания в клиническую практику.

Список литературы

1. Чучалин А. Г., Айсанов З. Р. Нарушение функции дыхательных мышц при хронических обструктивных заболеваниях легких // Терапевтический архив. 1988. Т. 60, № 7. С. 126–131.

2. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997. 265 с.

3. Пиковая скорость выдоха и бронхиальное сопротивление у больных с внебольничной пневмонией / Ф. Ф. Тетенев, Т. С. Агеева, В. Ю. Даниленк, А. В. Дубаков // Сибирский медицинский журнал. 2005. Т. 58, № 8. С. 43–45.

4. Ершов С. П., Перельман Ю. М. Электрофизиологическая характеристика дыхательных мышц у больных хроническим бронхитом // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 1999. Вып. 5. С. 28–35.

5. Изучение сердечно-сосудистого и дыхательного синхронизма при различных режимах дыхания / Л. А. Носкин, А. В. Рубинский, А. П. Романчук, В. Н. Марченко, В. В. Пивоваров, А. Б. Черепов, Л. А. Заровкина // Патогенез. 2018. Т. 16, № 4. С. 90–96.

6. Кассим К. Д. А., Филист С. А., Рыбочкин А. Ф. Компьютерные технологии обработки и анализа биомедицинских сигналов и данных / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2016. 209 с.

7. Флейшман А. Н. Вариабельность ритма сердца и медленные колебания гемодинамики. Нелинейные феномены в клинической практике. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 2009. 194 с.

8. Предикторы синхронности системных ритмов живых систем для классификаторов их функциональных состояний / Т. В. Петрова, С. А. Филист, С. В. Дегтярев, А. В. Киселев, О. В. Шаталова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 693–700.

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

10. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа З. Д. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4(43), ч. 2. С. 44–50.

11. Патент 2414170 Российская Федерация. Способ исследования механики дыхания / Ульянычев Н. В., Килин Е. В., Перельман Ю. М., Нахамчен Д. Л. № 2009140655/14; заявл. 02.11.09; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8.

12. Патент 2199948 Российская Федерация. Способ диагностики синдрома утомления дыхательной мускулатуры у больных бронхиальной астмой / Марьянова О. В., Основина И. П., Калинина О. В. № 2000130701/14; заявл. 06.12.2000; опубл. 10.03.03.

13. Патент 2638291 Российская Федерация. Способ оценки эффективности работы дыхательных мышц / Шамсутдинова М. Е., Мирошниченко И. В., Иванов К. М., Кунарбаева А. К., Сидорова М. А., Сивожелезова О. К. № 2016129437; заявл. 18.07.16; опубл. 12.12.17, Бюл. № 35.

14. Гришин О. В., Гришин В. Г., Коваленко Ю. В. Вариабельность легочного газообмена и дыхательного ритма // Физиология человека. 2012. Т. 38, № 2. С. 87–93.

15. Shortliffe E. H., Sepulveda M. J. Clinical Decision Support in the Era of Artificial Intelligence // JAMA. 2018. N 320(21). P. 2199-2200.

16. Hamet P., Tremblay J. Artificial intelligence in medicine. Metabolism. ArticlePubMed/NCBIGoogle Scholar. United States, 2017. P. 36–40.

17. Tárnok A. Machine Learning, COVID-19 (2019-nCoV), and multi-OMICS // ArticleGoogle Scholar. 2020. N 19. P. 215–216.

18. Prediction models for diagnosis and prognosis of COVID-19 infection: systematic review and critical appraisal / Wynants L., Van Calster B. [et al.] // B. M. J., 2020. N 369. P. 1328.

19. Томакова Р. А., Емельянов С. Г., Филист С. А. Интеллектуальные технологии сегментации и классификации биомедицинских изображений / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2012. 222 с.

20. Использование метода адаптивного квантования мод при исследовании вейвлет-изображений электрокардиосигналов больных ишемической болезнью сердца / А. А. Грахов, А. А. Кузьмин, С. В. Пихлап, С. А. Филист // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. Тематический выпуск «Медицинские информационные системы». 2008. № 5(82). С. 76–79.

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

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

23. Гибридные технологии выделения медленных волн из квазипериодических сигналов / Р. А. Томакова, М. А. Ефремов, С. А. Филист [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 1(34). С. 66–73.

References

1. Chuchalin A. G., Aisanov Z. R. Narushenie funktsii dykhatel'nykh myshts pri khronicheskikh obstruktivnykh zabolevaniyakh legkikh [Violation of the function of the respiratory muscles in chronic obstructive pulmonary diseases]. *Terapevticheskii arkhiv = Therapeutic Archive*, 1988, vol. 60, no. 7, pp. 126–131.

2. Baevsky R. M., Berseneva A. P. Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostei organizma i risk razvitiya zabolevanii [Assessment of the adaptive capabilities of the body and the risk of developing diseases]. Moscow, Medicine Publ., 1997. 265 p.

3. Tetenev F. F., Ageeva T. S., Danilenk V. Yu., Dubakov A. V. Pikovaya skorost' vydokha i bronkhial'noe soprotivlenie u bol'nykh s vnebol'nichnoi pnevmoniei [Peak expiratory velocity and bronchial resistance in patients with community-acquired pneumonia]. *Sibirskii meditsinskii zhurnal = Siberian Medical Journal*, 2005, vol. 58, no. 8, pp. 43–45.

4. Ershov S. P., Perelman Yu. M. Elektrofiziologicheskaya kharakteristika dykhatel'nykh myshtsu bol'nykh khronicheskim bronkhitom [Electrophysiological characteristics of respiratory muscles in patients with chronic bronchitis]. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya = Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*, 1999, is. 5, pp. 28–35.

5. Noskin L. A., Rubinsky A. V., Romanchuk A. P., Marchenko V. N., Pivovarov V. V., Cherepov A. B., Zarovkina L. A. Izuchenie serdechno-sosudistogo i dykhatel'nogo sinkhronizma pri razlichnykh rezhimakh dykhaniya [Study of cardiovascular and respiratory synchronism in different breathing modes]. *Patogenez = Pathogenesis*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 90–96.

6. Kassim K. D. A., Filist S. A., Rybochkin A. F. Komp'yuternye tekhnologii obrabotki i analiza biomeditsinskikh signalov i dannykh [Computer technologies of processing and analysis of biomedical signals and data]. Kursk, Southwest State University Publ., 2016. 209 p.

7. Fleishman A. N. Variabel'nost' ritma serdtsa i medlennye kolebaniya gemodinamiki. Nelineinye fenomeny v klinicheskoi praktike [Heart rate variability and slow fluctuations of hemodynamics. Nonlinear phenomena in clinical practice]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publishing House, 2009. 194 p.

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

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

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

11. Ulyanychev N. V., Kilin E. V., Perelman Yu. M., Nakhamchen D. L. Sposob issledovaniya mekhaniki dykhaniya [Method for studying the mechanics of respiration]. Patent RF, no. 2009140655/14, 2011.

12. Maryanova O. V., Osnovina I. P., Kalinina O. V. Sposob diagnostiki sindroma utomleniya dykhatelnoi muskulatury u bolnykh bronkhialnoi astmoi [Method for diagnosing fatigue syndrome of respiratory muscles in patients with bronchial asthma]. Patent RF, no. 2000130701/14, 2000.

13. Shamsutdinova M. E., Miroshnichenko I. V., Ivanov K. M., Kunarbaeva A. K., Sidorova M. A., Sivozhelezova O. K. Sposob otsenki effektivnosti raboty dykhatelnykh myshts [Method for assessing the efficiency of the respiratory muscles]. Patent RF, no. 2016129437, 2017.

14. Grishin O. V., Grishin V. G., Kovalenko Yu. V. Variabel'nost' legochnogo gazoobmena i dykhatel'nogo ritma [Variability of pulmonary gas exchange and respiratory rhythm]. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*, 2012, vol. 38, no. 2, pp. 87–93.

15. Shortliffe E. H., Sepulveda M. J. Clinical Decision Support in the Era of Artificial Intel16. ligence. *JAMA.* 2018, no. 320(21), pp. 2199-2200.

16. Hamet P., Tremblay J. Artificial intelligence in medicine. Metabolism. ArticlePubMed/NCBIGoogle Scholar. United States, 2017, pp. 36–40.

17. Tárnok A. Machine Learning, COVID-19 (2019-nCoV), and multi-OMICS. *ArticleGoogle Scholar*, 2020, no. 19, pp. 215–216.

18. Wynants L., Van Calster B., eds. Prediction models for diagnosis and prognosis of COVID-19 infection: systematic review and critical appraisal. *B. M. J.,* 2020, no. 369, p. 1328.

19. Tomakova R. A., Yemelyanov S. G., Filist S. A. Intellektual'nye tekhnologii segmentatsii i klassifikatsii biomeditsinskikh izobrazhenii [Intellectual technologies of segmentation and classification of biomedical images]. Kursk, Southwest State University Publ., 2012. 222 p.

20. Grakhov A. A., Kuzmin A. A., Pihlap S. V., Filist S. A. Ispol'zovanie metoda adaptivnogo kvantovaniya mod pri issledovanii veivlet-izobrazhenii elektrokardiosignalov bol'nykh ishemicheskoi bolezn'yu serdtsa [Using the adaptive mode quantization method in the study of wavelet images of electrocardiosignals of patients with ischemic heart disease]. *Izvestiya Yuzhnogo Federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Tematicheskii vypusk "Meditsinskie informatsionnye sistemy" = Proceedings of the Southern Federal University. Technical Sciences. Thematic Issue "Medical Information Systems"*, 2008, no. 5 (82), pp. 76–79.

21. Myasnyankin M. B, Filist S. A., Kiselev A. V., Kuzmin A. A. Formirovanie deskriptorov dlya klassifikatorov funktsionalnogo sostoyaniya sistemy dykhaniya na osnove spektralnogo analiza elektrokardiosignala [Formation of descriptors for classifiers of the functional state of the respiratory system based on the spectral analysis of the electrocardiosignal]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceeding of the Southwest State University*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 8-28.

22. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya neironnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskikh prilozhenii [Hybrid neural network with macro-layers for medical applications]. *Neirokomp'yutery. Razrabotka i primenenie = Neurocomputers. Development and Application*, 2014, no. 6, pp. 35–39.

23. Tomakova R. A., Efremov M. A., Filist S. A., eds. Gibridnye tekhnologii vydeleniya medlennykh voln iz kvaziperiodicheskikh signalov [Hybrid technologies for the isolation of slow waves from quasi-periodic signals]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceeding of the Southwest State University*, 2011, no. 1 (34), pp. 66–73.

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

Alexey V. Kiselev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

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

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

Мяснянкин Максим Борисович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: 79606039503@mail.ru

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

Маслак Анатолий Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры математики, информатики, естественно-научных и общетехнических дисциплин, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Российская Федерация,
e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Anatoly A. Maslak, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Mathematics, Computer Sciences, Natural Sciences and General Technical Disciplines, Branch of the Kuban State University in Slavyansk-on-Kuban, Slavyansk-on-Kuban, Russian Federation,
e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.ru

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.ru

Рыбочкин Анатолий Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: truten01@yandex.ru

Anatoly F. Rybochkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: truten01@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-33-53

CC BY 4.0

Разработка и реализация web-ресурса для стоматологической клиники

А. В. Малышев[1], Т. Н. Конаныхина[1] ✉, С. А. Немченко[1]

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

✉ e-mail: govtn@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является разработка web-ресурса для стоматологической клиники с возможностью онлайн-записи клиентов на прием в рамках реализации на территории Курской области мероприятий национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», проектов по внедрению цифровых технологий и платформенных решений в экономике, социальной сфере, в том числе здравоохранении, на основе решений, включенных в «базу эффективных кейсов» организации «Цифровая экономика».*

Методы. *Web-ресурс стоматологической клиники с системой онлайн-записи на прием состоит из двух основных модулей: web-сервис для пациента, а также панель администратора, разработанная для сайта клиники.*

При создании программно-информационной системы применялся язык PHP для построения логики системы, HTML,CSS, JS и фреймворк Bootstrap для моделирования интерфейса.

Web-ресурс может быть установлен на персональный компьютер с использованием кросс-платформенного дистрибутивом Apache «XAMPP версии от 7.3.x», требуемое место на жестком диске – не менее 100 Мб, загружен HTTP-сервер.

Программный продукт предназначен для использования широким кругом лиц, занимающихся приемом клиентов, в дальнейшем может использоваться не только для работы в стоматологических клниках и частных медицинских центрах.

Результаты. *В разработанном программном продукте для пользователя реализованы следующие возможности: навигация в меню, запись на прием, оставление отзыва, возможность написать письмо, авторизация для пользователя и администратора, добавление клиента на прием, удаление клиента с приема, обновление данные о клиенте или приеме, добавление пользователя, удаление пользователя, обновление прав доступа, выход из аккаунта.*

Заключение. *В ходе выполнения работы был разработан и реализован web-ресурс для стоматологической клиники с возможностью онлайн-записи клиентов на прием. В результате проведенных тестов было выявлено, что программная система полностью удовлетворяет функциональным требованиям.*

Ключевые слова: *web-ресурс; стоматологическая клиника; программно-информационная система.*

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

Для цитирования: Малышев А. В., Конаныхина Т. Н., Немченко С. А. Разработка и реализация web-ресурса для стоматологической клиники // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 33–53. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-33-53.

Поступила в редакцию 10.01.2022 *Подписана в печать 11.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

© Малышев А. В., Конаныхина Т. Н., Немченко С. А., 2022

Development and Implementation of a Web Resource for the Dental Clinic

Alexander V. Malyshev[1], Tatyana N. Konanykhina[1]✉, Stepan A. Nemchenko[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: govtn@mail.ru

Abstract

The purpose of research *is to develop a web-resource for a dental clinic with the ability to make online appointments for clients as part of the implementation of the national program "Digital Economy of the Russian Federation" in the Kursk region, projects for the introduction of digital technologies and platform solutions in the economy, social sphere, including healthcare, based on solutions included in the "base of effective cases" of the organization "Digital Economy".*
Methods. *The web resource of a dental clinic with an online appointment system consists of two main modules: a web service for the patient, as well as an administrator panel developed for the clinic website.*
When creating a software-information system, the PHP language was used to build the system logic, HTML, CSS, JS and the Bootstrap framework to model the interface.
The web resource can be installed on a personal computer using the cross-platform distribution kit Apache "XAMPP version from 7.3.x", the required hard disk space is at least 100 MB, the HTTP server is loaded.
The software product is intended for use by a wide range of people involved in the reception of clients, in the future it can be used not only for work in dental clinics and private medical centers.
Results. *The following features are implemented in the developed software product for the user: menu navigation, making an appointment, leaving feedback, the ability to write a letter, authorization for the user and administrator, adding a client to an appointment, deleting a client from an appointment, updating client or appointment data, adding a user , deleting a user, updating access rights, logging out of an account.*
Conclusion. *In the course of the work, a web-resource for a dental clinic was developed and implemented with the ability to make online appointments for clients. As a result of the tests, it was found that the software system fully meets the functional requirements.*

Keywords: *web resource; dental clinic; software and information system.*

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

For citation: Malyshev A. V., Konanykhin T. N., Nemchenko S. A. Development and implementation of a web resource for the dental clinic. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 33–53. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-33-53.

Received 10.01.2022 *Accepted 11.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

Здравоохранение – одна из самых быстроразвивающаяся отраслей во всех странах. Переход на онлайн-запись в медицинские учреждения – один из ключевых процессов в модернизации этой отрасли в связи с распространением COVID-19. Актуальность выбранной

темы определяется также необходимостью цифровизации региона и развитием в нем новых технологий в рамках проекта «Цифровая экономика Российской Федерации»[1], тем самым повышая уровень цифровой вовлеченности граждан. Во многих стоматологических клиниках запись на прием осуществляется при помощи телефонных звонков или посещения регистратуры, что крайне неудобно, особенно когда нужна экстренная помощь, нет времени для посещения регистратуры, а также в связи с необходимостью минимизировать число контактов.

Данный проект является актуальным не только для стоматологических клиник, но и для иных коммерческих организаций и структур, которые ведут запись на прием клиентов. Он позволит повысить доступность за счет наличия онлайн-записи, которая является более комфортной в настоящее время, это также повысит лояльность клиентов, которые дорожат своим временем и избегают лишних контактов.

Целью данной работы является разработка и реализация Web-ресурса для стоматологической клиники с возможностью онлайн-записи клиентов на прием. Для реализации проекта использован язык PHP для построения логики системы, HTML, CSS, JS и фреймворк Bootstrap для моделирования интерфейса [1; 2].

Web-ресурс стоматологической клиники системой онлайн-записи клиентов на прием предназначен решить сложности введения бумажной записи на прием путем создания специализированного программного обеспечения для управления системой записи на прием; это значительно облегчит процедуру взаимодействия клиники с пациентами, сократив очередь на прием в самой клинике, улучшив качество и эффективность обслуживания пациентов.

Web-ресурс стоматологической клиники системой онлайн-записи на прием должен состоять из двух основных модулей.

Один модуль – web-сервис, будет разработан для пациента, который содержит информацию о заболеваниях полости рта, а также методов профилактики и лечения заболеваний. Пациент должен иметь возможность просматривать кандидатуры лечащих врачей стоматологической клиники, детально изу-

[1] О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726 (дата обращения: 28.12.2021); О Стратегии цифровой трансформации ключевых отраслей экоомики, социальной сферы и государственного управления Курской области на период с 2021 по 2024 годы: постановление Администрации Курской области № 880-па от 20.08.2021 г. URL: https://adm.rkursk.ru/index.php?id=109&mat_id=123917 (дата обращения: 28.12.2021).

чить каждого специалиста, его специализацию и профессиональные навыки, а также опыт работы и отзывы других пациентов [2; 3]. Также он сможет записаться на прием в предпочтительные для него дату и время, которые впоследствии будут зарезервированы за пациентом.

Второй модуль – панель администратора, которая должна быть разработана для сайта клиники. Администратор будет видеть отзывы и рейтинг пациентов о специалистах, просматривать сведения о пациенте, его персональные данные, а также может просматривать дату и время посещения [4]. При возникновении трудностей у пациентов с онлайн-записью администратор сможет самостоятельно записать пациента на прием через панель администратора. В разрабатываемом программном продукте должны быть реализованы следующие функции, представленные на диаграммах вариантов использования для администратора и для клиента (рис. 1) [5].

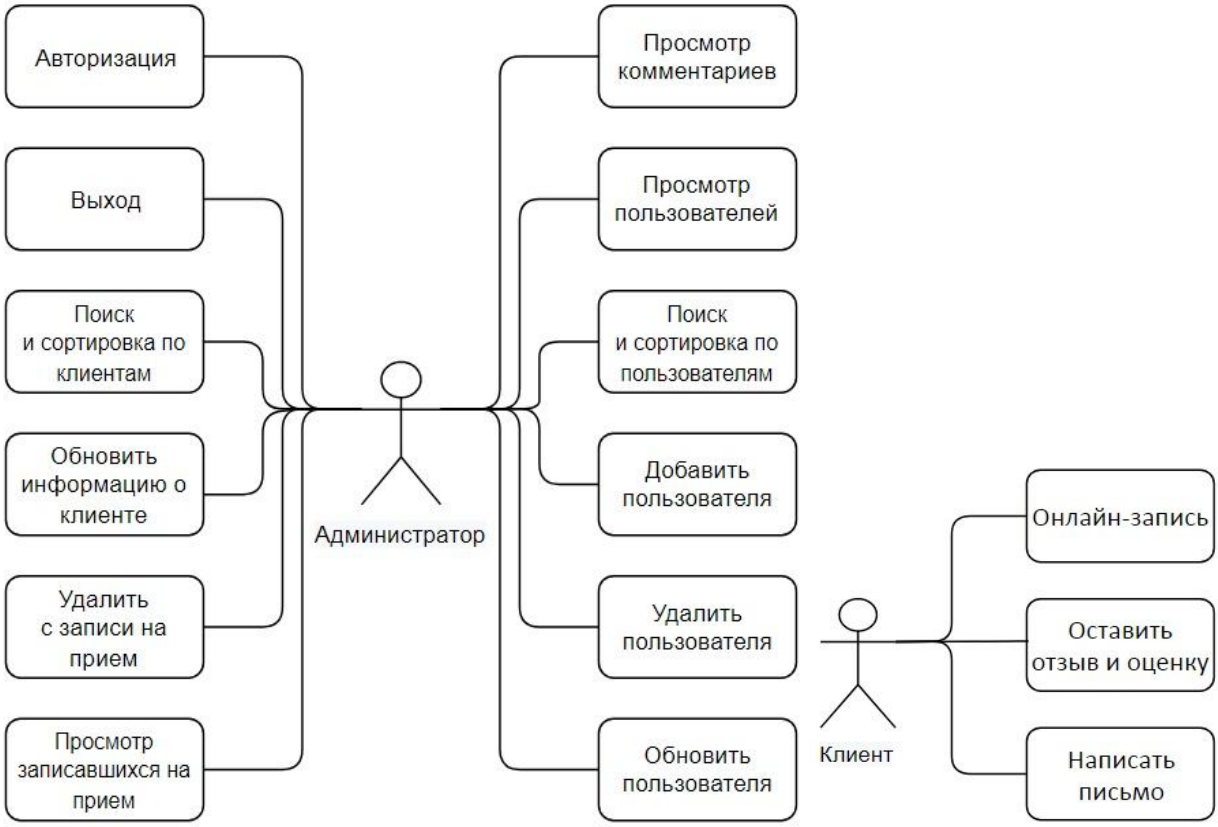


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования для панели «Администратор» и «Клиент»

Fig. 1. Use Case Diagram for Admin and Client Panel

В web-ресурсе должны присутствовать: онлайн-запись на приём; обратная связь; отзывы; вход в систему с помощью авторизации; главная страница с данными статистики; страница с записью на прием; страница с комментариями к врачам.

Онлайн-запись на прием экономит время пациента, что позволяет клиентам быстрее получать доступ к услугам стоматологической клиники.

Онлайн-запись реализована с помощью форм и состоит из нескольких блоков, где пациент должен последовательно заполнять информацию [6; 7].

Первый блок – «Выбор медицинской услуги», второй блок онлайн-записи – «Персональная информация». Нажав «Далее», пациент должен перейти в блок выбора специалиста[1], который зависит от выбора медицинской услуги [8].

Следующий блок предлагает пациенту выбрать дату посещения клиники. После того как пациент определился с выбором даты посещения клиники, ему будет предложен выбор времени.

Записавшись на нужное время, пациент видит дату и время своего посещения стоматологической клиники, а также Ф.И.О. выбранного стоматолога.

Обратная связь важна как для стоматологической клиники, так и для пациентов, она позволяет пациентам получить консультацию или разъяснения по их вопросам, а для клиники получить предложения относительно их работы или обслуживания [9].

Это, в свою очередь, помогает улучшить качество обслуживания и удовлетворенность пациентов и в конечном итоге способствует привлечению и удержанию новых клиентов.

Часто пациенты стараются найти отзывы о специалистах (стоматологах), чтобы убедиться в его высокой квалификации и качественном лечении [10; 11; 12].

Читая об опыте других, пациенты могут понять, какой специалист им больше подходит, и записаться к нему на прием. Для этого было решено реализовать макет формы «Отзывы».

После авторизации пользователь попадает на главную страницу, где видит общее количество записавшихся на прием пациентов, а также общее количество оставленных комментариев к врачам [13; 14].

Следующая страница – запись на приём, в ней в табличном виде отображаются данные пациентов: Ф.И.О., телефон, полис, СНИЛС, врач, к которому была запись, дата и время посещения [15].

Если пациент решил изменить дату, время, врача или личные данные, специалист регистратуры может воспользоваться поиском по пациентам, далее в столбце «Действия» выбрать форму

[1] Говорухина Т. Н. Модели, методы и алгоритмы управления и обработки информации адаптивными реконфигурируемыми модулями в телеметрических системах: дис. ... канд. техн. наук / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2013. 133 с.

«Обновить данные о приеме» и изменить нужные данные [16; 17].

Когда пациент отказывается от приема, предупредив специалиста регистратуры по телефону или личным визитом, специалист может удалить запись о приеме в столбце «Действия», подтвердив в сплывающем модальном окне свои действия [18; 19].

При каких-либо трудностях с онлайн-записью на прием или незнании о существовании такой возможности пациент может позвонить в регистратуру для записи, сотрудник клиники, выбрав форму «Новый клиент», запишет на прием пациента.

Для введения отчетности о посещении клиники данные из таблицы можно экспортировать в Microsoft Excel.

На странице «Комментарии» в табличной форме отображается следующая информация: имя пользователя, mail, отзывы, оценка и Ф.И.О. врача.

Материалы и методы

Хранение информации о записи на прием, отзывах и данных о пользователях должны обеспечивается с помощью базы данных.

Для реализации базы данных предлагается использовать СУБД MySQL в связи с тем, что она распространяется под «Универсальной общественной лицензией», т. е. является бесплатной, что позволяет снизить финансовую нагрузку на клинику, использующую разработанный продукт, обладает высокой скоростью обработки данных, отличается стабильностью работы, обеспечивая высокий уровень кросс-платформенности данных и кода.

На основании анализа предметной области из технического задания была разработана база данных.

База данных включает в себя следующие таблицы:

– admin_accounts – содержит пароли для входа в панель Administrator;

– bron – время и дата бронирования;

– ots – отзывы и рейтинг клиентов о врачах;

– vrach – список врачей клиники;

– zapis – полная информация о пациенте, даты и времени записи на прием, а также о выбранном специалисте.

Во время разработки программно-информационной системы для наилучшего результата был использован принцип системного подхода.

Системный подход в программировании – это метод анализа объектов в процессе проектирования, основной смысл которого заключается в объединении стандартных приёмов создания структурированных программ.

Чтобы понять, каким образом системный подход был применен в разработке программы, следует рассмотреть, какие основные принципы и решения данного подхода были использованы.

В основе системного подхода лежат следующие методы системного проектирования.

Структурное программирование: сложная задача разбивается на достаточно простые части, поэтапное составление программы и алгоритма, логика программы опирается на простые структуры, такие как следование, ветвление и цикл.

Во время разработки был реализован нисходящий подход к программированию вместе с пошаговой разработкой алгоритма. Таким образом, было получено описание необходимой программно-информационной системы в модульном виде, что позволило перевести это описание в окончательный программный вид гораздо проще и точнее, чем без пошаговой детализации.

Программно-информационная система состоит из большого количества модулей, выполняющих определенные функции, обычно по одной на модуль. При разработке придерживались следующими основными принципами модулей:

– модуль должен выполнять некую функцию;

– модуль должен иметь имя;

– модуль может быть вызван другими модулями;

– работоспособность модуля должна быть независима от его предыдущих вызовов;

– модуль должен иметь один выход и один вход.

Одной из решенных задач является система, состоящая из автономных элементов с простыми и согласованными структурными связями между ними. Чтобы достичь этого результата, при разработке программно-информационной системы отдельное внимание уделялось критериям декомпозиции, композиции, понятности, непрерывности, защищенности

Таким образом, принципы системного подхода были полностью удовлетворены при разработке программно-информационной системы.

Разрабатываемая программно-информационная система включает в себя клиентскую и серверную части.

Клиентская часть представляет собой веб-браузер, серверная часть представляет собой хранилище компонентов веб-ресурса стоматологической клиники, а также компонентов панели Administrator (представленные на рис. 2), на котором происходит обработка запросов и ответов, предоставляя доступ к страницам для клиентской части по протоколу HTTP и HTTPS, а также обращается к хранилищам данных для операций с данными.

При проектировании сайта были рассмотрены вопросы по структуре сайта и разработке меню.

Разработанный web-ресурс для стоматологической клиники bvttn – древовидный вид структуры, потому что это форма представления данных, выраженная в форме многоуровневой иерархии, т. е. вся структура может содержать большое количество разделов и подразделов, внутренних страниц любой вложенности и в произвольной последовательности.

Структура меню и разделы web-ресурса представлены на рисунке 3.

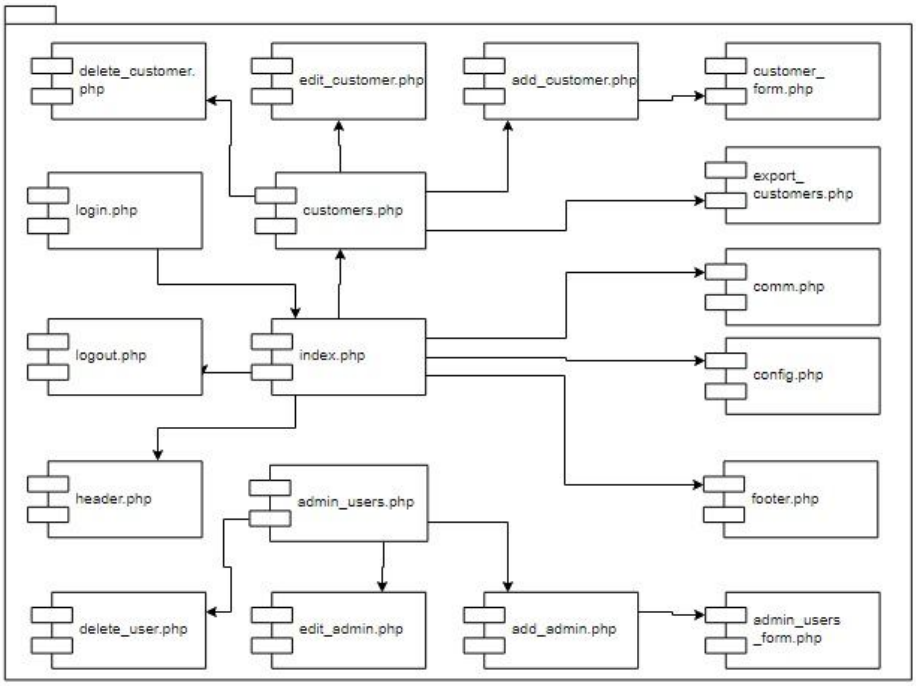


Рис. 2. Диаграмма компонентов

Fig. 2. Component diagram

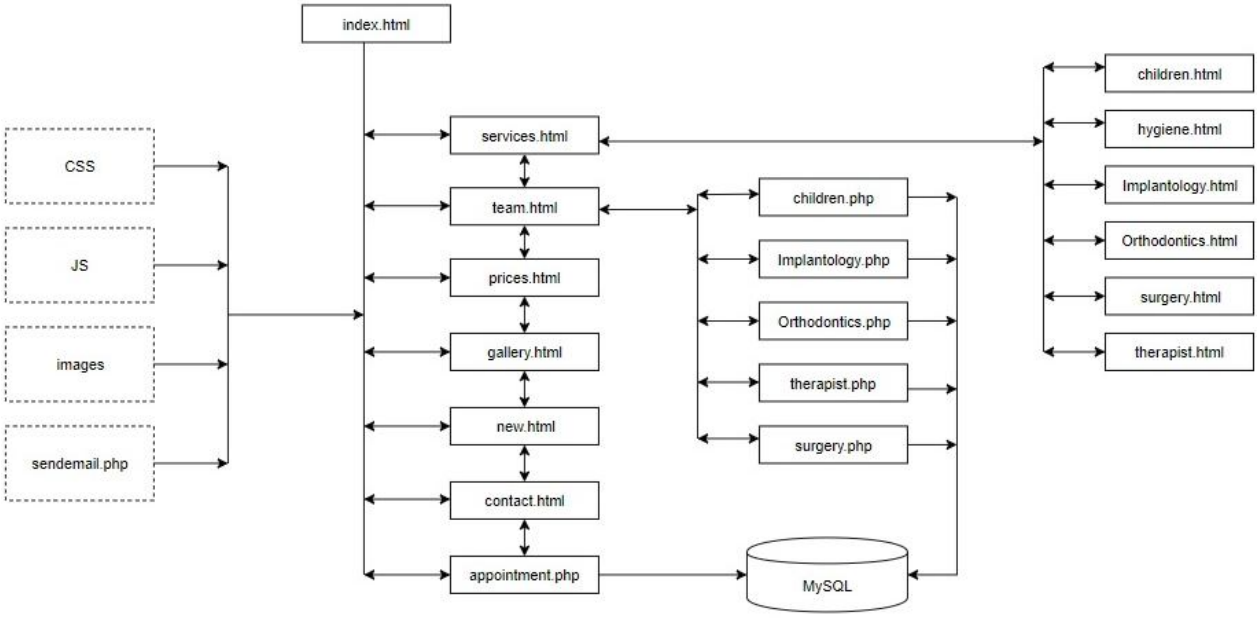


Рис. 3. Структура меню и разделы web-ресурса

Fig. 3. Menu structure and sections of the web resource

Диаграмма классов (рис. 4) отражает взаимодействие между классами системы. Класс создается для каждого типа объектов.

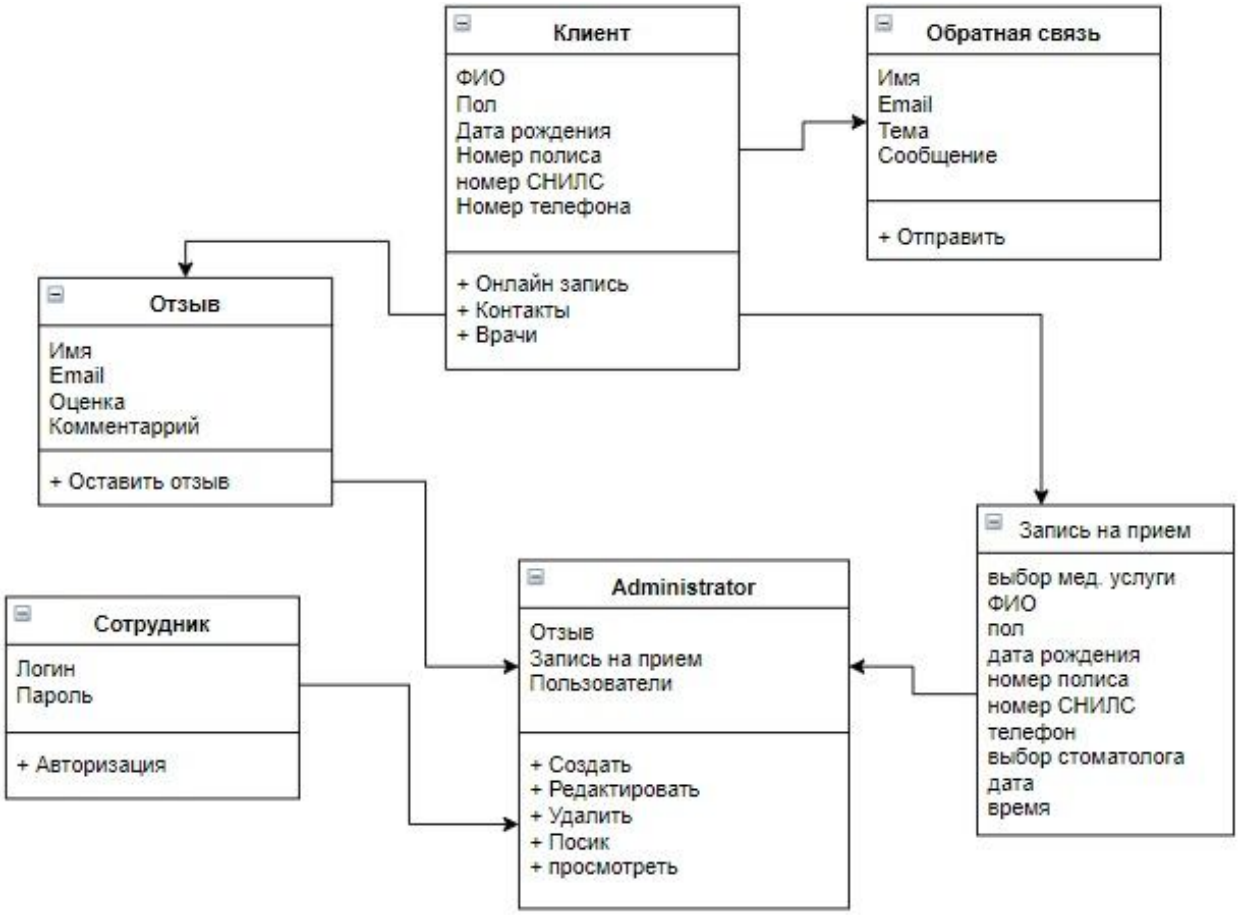


Рис. 4. Диаграмма классов программно-информационной системы

Fig. 4. Software information system class diagram

Диаграмма классов показывает набор классов, интерфейсов, сотрудничеств и их отношений.

Диаграмма классов отражает, в частности, различные взаимосвязи между отдельными сущностями предметной области, такими как объекты и подсистемы, а также описывает их внутреннюю структуру и типы отношений.

Форма обратной связи приведена ниже (рис. 5). Данная форма предназначена для получения консультации или разъяснения по каким-либо вопросам.

После заполнения предложенных полей формы письмо отправляется на e-mail администратора сайта. Все дальнейшее общение происходит посредством обмена электронными письмами или выходом в офлайн-телефон и т. п.

Числами на рисунке 5 обозначены номера объектов интерфейса.

В таблице 1 представлено описание объектов данного интерфейса.

Страница «Запись на прием» панели Administrator представлена ниже (рис. 6).

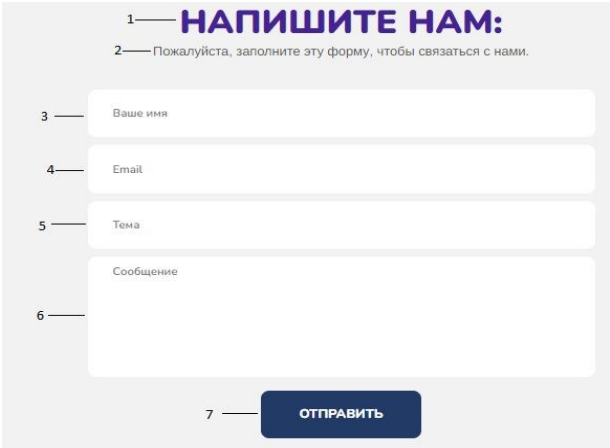


Рис. 5. Интерфейс формы обратной связи

Fig. 5. Feedback form interface

Таблица 1. Описание формы обратной связи

Table 1. Description of the feedback form

Номер объекта	Тип объекта	Имя объекта (id или name)	Действие/описание объекта
1	h2	h2	Заголовок
2	<p class="mb-0">	<p class="mb-0">	Заголовок
3	input	fname	Поле ввода информации
4	input	email	Поле ввода информации
5	input	subject	Поле ввода информации
6	input	contact_message	Поле ввода информации
7	button	submit	Отправка сообщения

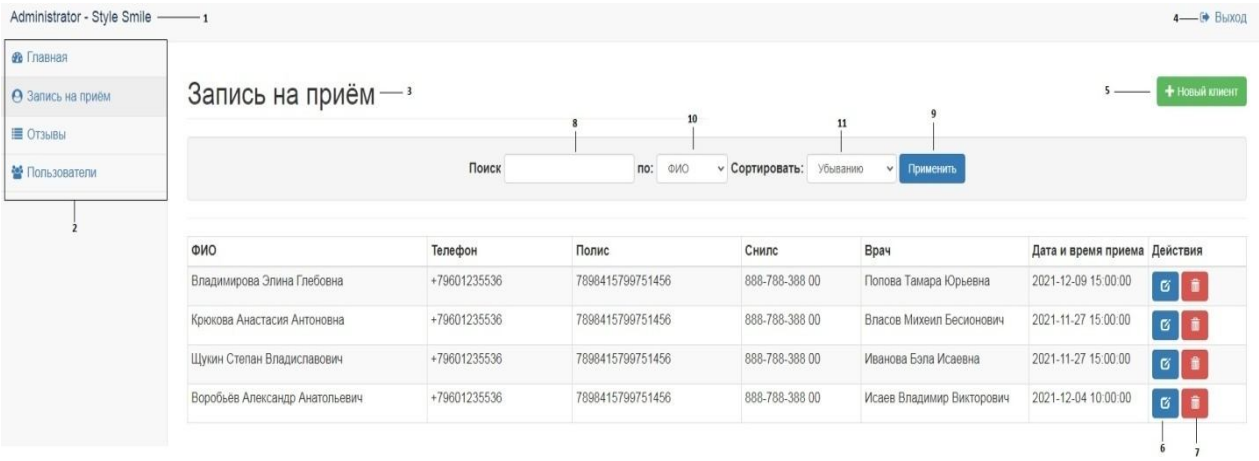


Рис. 6. Интерфейс страницы «Запись на прием»

Fig. 6. Interface of the "Appointment" page

Данная страница предназначена для сотрудника стоматологической клиники, для отслеживания записавшихся на прием клиентов, для ведения поиска по базе данных, а также для записи на прием вручную (табл. 2).

Таблица 2. Описание объектов страницы «Запись на прием»

Table 2. Description of the objects of the "Appointment" page

Номер объекта	Тип объекта	Имя объекта (id или name)	Действие/описание объекта
1	h3	h3	Наименование ИС
2	ul	ul	Список меню
3	h1	h1	Наименование страницы
4	button	button	Выход из системы
5	button	button	Форма добавления клиента
6	button	button	Форма обновления данных
7	button	button	Удаление строки
8	input	input_search	Поле ввода поиска
9	input	radio	Переключатель выбора информации
10	select	filter_col	Фильтр поиска
11	select	input_order	Выпадающий список

Результаты и их обсуждение

При посещении web-ресурса стоматологической клиники, зайдя на страницу «Онлайн-запись» (рис. 7), клиенту предлагается выбрать медицинскую услугу.

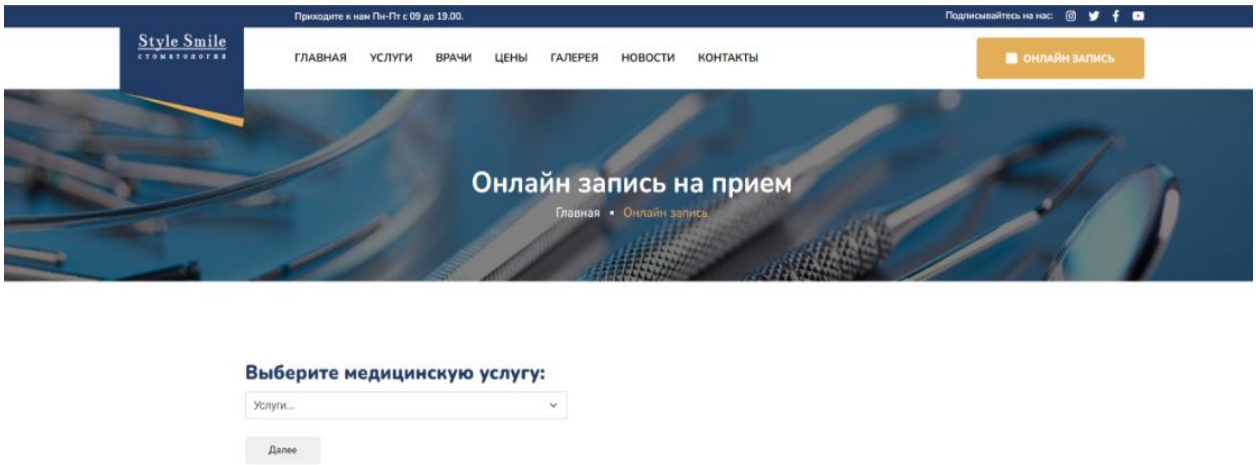


Рис. 7. Страница «Онлайн-запись»

Fig. 7. The "Online Recording" page

После того как клиент нажмет кнопку «Далее», появится форма персональной информации о клиенте (рис. 8).

Заполнив данную форму, клиент переходит к выбору специалиста (рис. 9, а). После того как клиент выбрал стоматолога, ему предлагается выбрать дату посещения (рис. 9, б).

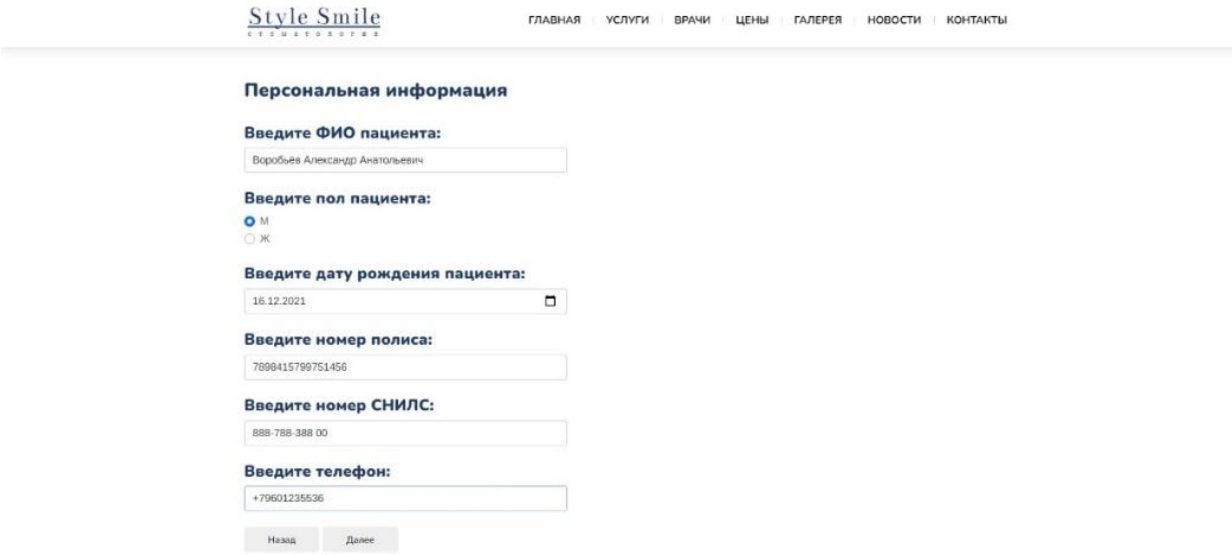
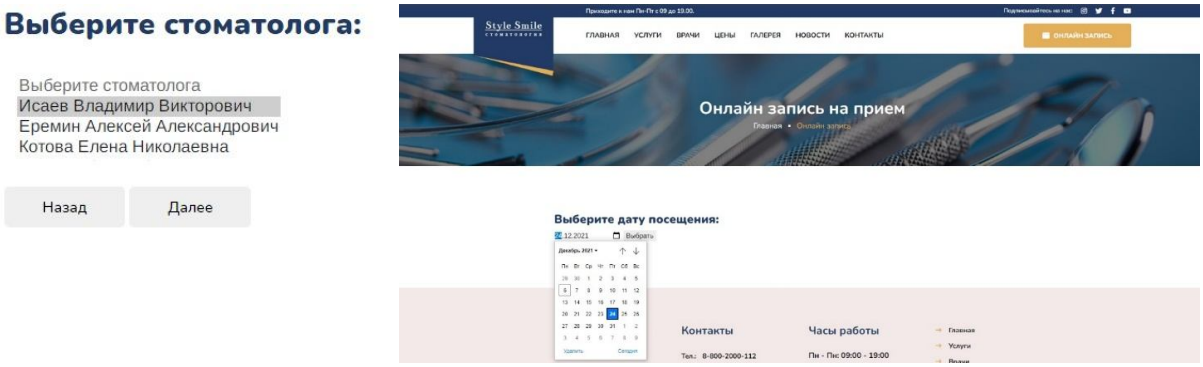


Рис. 8. Форма персональной информации

Fig. 8. Personal information form

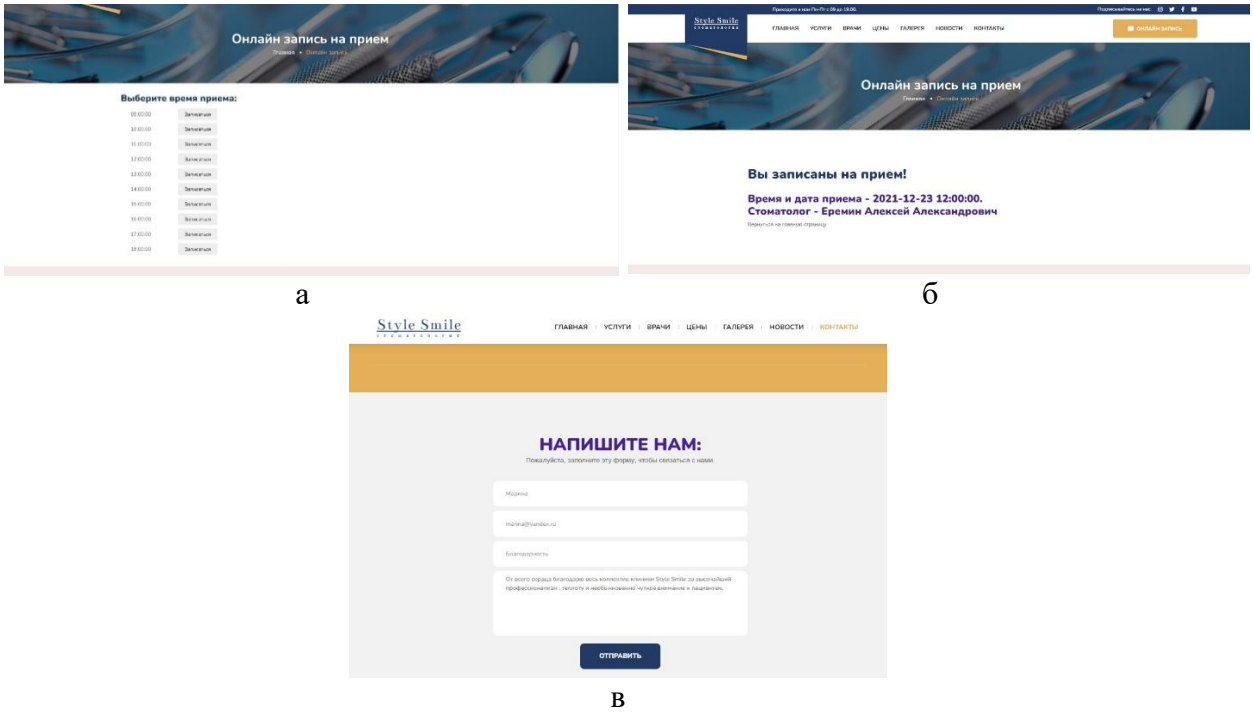


а б

Рис. 9. Выбор: а – стоматолога; б – даты посещения

Fig. 9. Choice: a – dentist; b – dates of visit

Когда клиент определился с выбором даты посещения, ему будет предложено доступное время для записи на этот день (рис. 10, а). После того как клиент заполнит всю информацию, выберет дату и время посещения, ему высветится сообщение о том, что он записан на прием (рис. 10, б).



а б в

Рис. 10. Онлайн-запись на прием: а – выбор времени посещения; б – сообщение об удачной записи на прием; в – форма отправки сообщения

Fig. 10. Online appointment booking: a – choosing the time of the visit; b – a message about a successful appointment; c – message sending form

На странице «Контакты» клиент может написать сообщение, заполнив соответствующую форму, как показано ниже (рис. 10, в).

После того как клиент отправил сообщение, оно придет на электронный адрес сотрудника клиники (рис. 11).

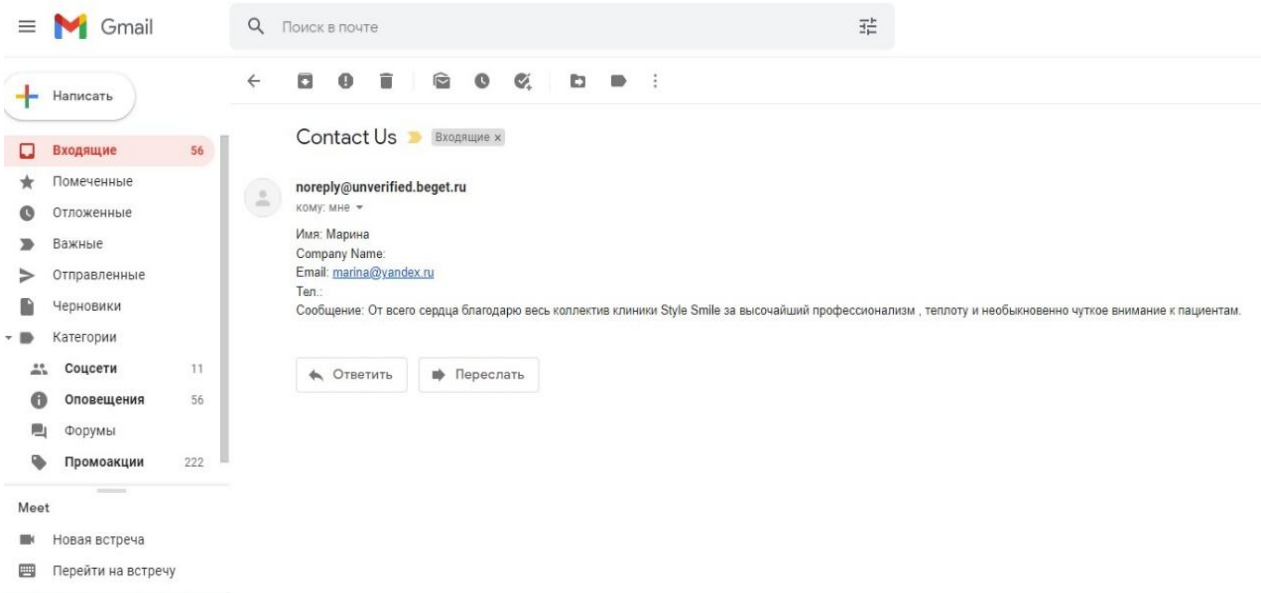


Рис. 11. Сообщение, отправленное через форму

Fig. 11. Message sent through the form

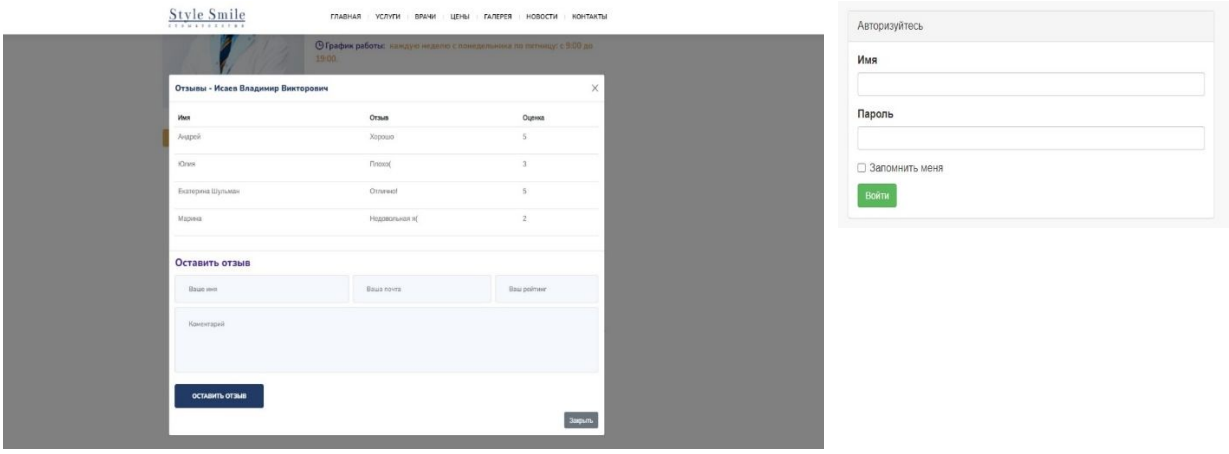
На странице о специалисте клиент может оставить свой отзыв и оценку, нажав на кнопку «Отзыв» (рис. 12, а).

После того как клиент оставит отзыв, он будет виден всем посетителям web-ресурса.

При открытии панели Administrator открывается страница «Авторизации» пользователя (рис. 12, б).

После того как пользователь авторизовался, используя логин и пароль, попадает на страницу «Главная» (рис. 13, а). На данной странице отображается общее количество записанных на прием и оставленных комментариев.

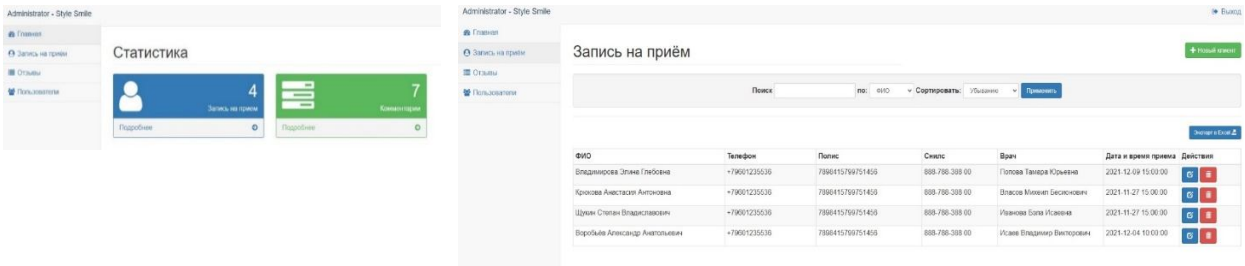
Перейдя на страницу «Запись на прием» (рис. 13, б), пользователь видит таблицу с данными о пациентах, кому осуществлена запись на прием, а также видит дату и время.



а б

Рис. 12. Страница специалиста: а – окно отзыва; б – «Авторизация»

Fig. 12. Specialist page: a – review window; b – “Authorization”

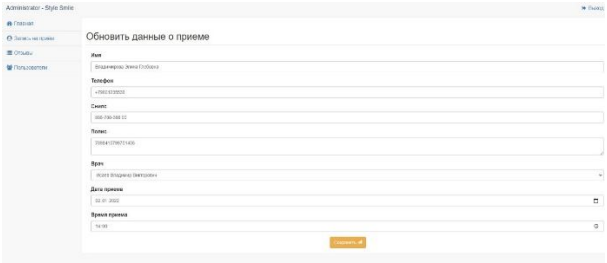


а б

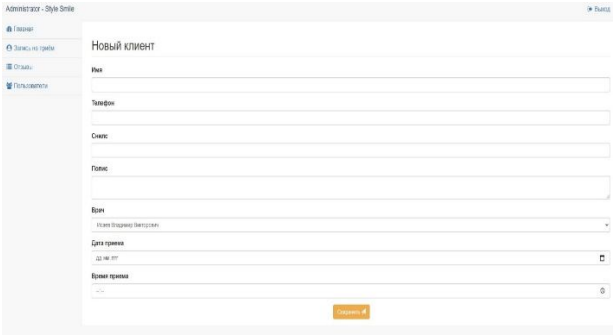
Рис. 13. Страница: а – «Главная»; б – «Запись на прием»

Fig. 13. Page: a – "Main"; b – "Appointment"

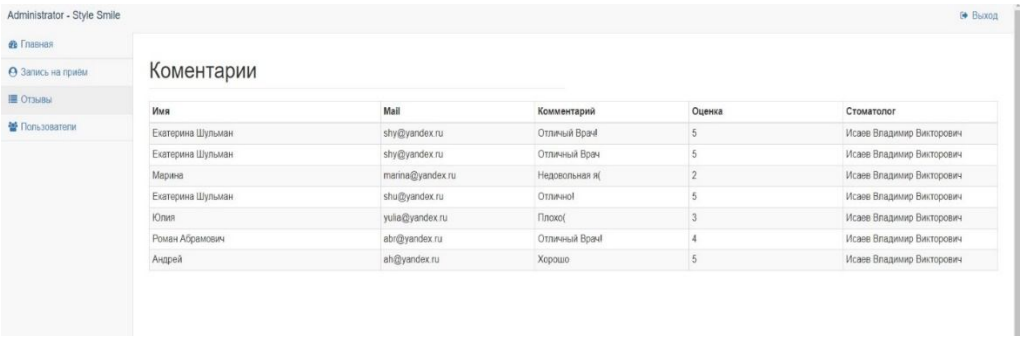
На данной странице сотрудник клиники может редактировать данные о клиентах, изменять дату или время приема, нажав на соответствующую кнопку в колонке «Действия», после чего откроется страница формы «Обновить данные о приеме», как показано ниже (рис. 14, а).



а



б



в

Рис. 14. Страница: а – формы «Обновить данные о приеме»; б – «Новый клиент»; в – «Отзывы»

Fig. 14. Page: a – "Update reception data"; b – "New client"; in – "Reviews"

После изменения нужных данных, нажав кнопку «Сохранить», данные сохраняются в базу данных и обновляются в таблице. Также пользователь может добавить нового клиента самостоятельно, нажав на кнопку «Новый клиент». Откроется страница с формой «Новый клиент» (рис. 14, б).

Перейдя на страницу «Отзывы» (рис. 14, в), пользователь видит таблицу с отзывами и оценками клиентов о специалистах и контактные данные клиента. В случае наличия негативного отзыва этот раздел позволит специалисту связаться с клиентом для решения конфликтной ситуации.

На странице «Пользователи» (рис. 15) сотрудник клиники может создавать новые учетные записи для других сотрудников, просматривать имеющиеся или редактировать их, меняя им логин, пароль или тип доступа к панели Administrator.

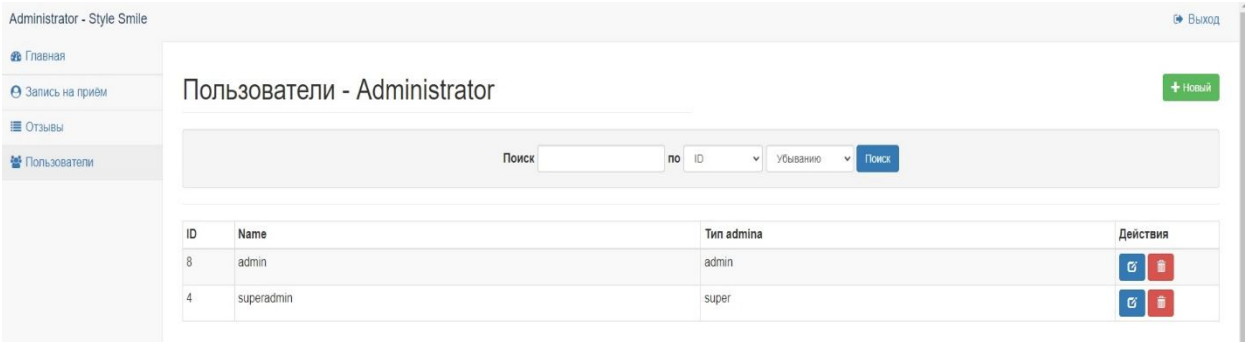


Рис. 15. Страница «Пользователи»

Fig. 15. Users page

Выводы

Были протестированы все функции, реализующие функциональные требования программно-информационной системы.

В результате проведенных тестов было выявлено, что программная система полностью удовлетворяет функциональным требованиям.

Программно-информационная система может быть установлена на персональный компьютер или на HTTP-сервер с процессором 4 ядра, тактовая частота 2,90 ГГц и выше, платформа 32- или 64-разрядная, размер оперативной памяти не менее 2 Гб, жесткий диск 200 МБ свободного объема и выше.

Операционная система: Astra Linux, FreeBSD, Windows Server 2016, Windows Server 2019, Windows 10.

Список литературы

1. Чаплыгин А. А., Малышев А. В. Операционная система с ядром на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 8-20.

2. Шкрыль А. PHP – это просто. Программируем для web-сайта. М.: БХВ-Петербург, 2015. 368 с.

3. Новиков Б. А., Горшкова Е. А., Графеева Н. Г. Основы технологий баз данных / под ред. Е. В. Рогова. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2020. 583 с.

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

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

6. Макфарланд Д. JavaScript и jQuery. Исчерпывающее руководство. 3-е изд. М.: Эксмо, 2017. 688 с.

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

8. Морето Сильвио. Bootstrap в примерах. М.: ДМК Пресс, 2017. 314 с.

9. Бурмака А. А., Цыплаков Ю. В., Говорухина Т. Н. Обнаружение видеосигналов на фоне аддитивной шумовой помехи при априорной неопределенности характеристик входного воздействия // Радиотехника. 2017. № 2. С. 47-52.

10. Модели подсистем и целенаправленных процессов, реализуемых в информационно-логических измерительных системах распределенного типа / А. А. Бурмака, Н. А. Кореневский, Т. Н. Говорухина, О. А. Терехова // Телекоммуникации. 2013. № 8. С. 8-12.

11. Говорухина Т. Н., Кореневский Н. А., Терехова О. А. Подход к оцениванию информативности признаков коммутируемых сигналов в многоканальной информационно-логической системе // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 6 (108). С. 24-27.

12. Бурмака А. А., Говорухина Т. Н. Информационно-логическая измерительная система с нечетким множеством состояний // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 134-138.

13. Бурмака А. А., Говорухина Т. Н., Михайлов А. В. Модели целенаправленных процессов, реализуемых в телеметрических системах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 1 (18). С. 103-109.

14. Бурмака А. А., Говорухина Т. Н., Разумова К. В. Системная модель распознавания и идентификации состояния предстательной железы по ее изображениям УЗИ и ТРУЗИ / // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 13-20.

15. Бурмака А. А., Говорухина Т. Н., Терехова О. А. Многоканальная измерительная система с нечетким описанием её состояний // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 28-31.

16. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска / Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 145-152.

17. Бурмака А. А., Цыплаков Ю. В., Говорухина Т. Н. Аналитическая и структурная модели принятия решения в процессе обнаружения последовательности видеоимпульсов с использованием процедуры дифференцирования входного воздействия // Радиотехника. 2017. № 10. С. 163-168.

18. Нечеткие модели оценки уровня эргономики технических систем и её влияния на состояние здоровья человека-оператора с учетом функционального резерва организма / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 1 (24). С. 39-53.

19. Бурмака А. А., Говорухина Т. Н., Михайлов А. В. Алгоритмы управления и обработки информации адаптивными реконфигурируемыми модулями // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 9 (135). С. 49-54.

References

1. Chaplygin A. A., Malyshev A. V. Operacionnaya sistema s yadrom na osnove virtual'noj mashiny s umen'shennym naborom komand [Operating system with a kernel based on a virtual machine with a reduced instruction set]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering,* 2020, vol. 10, no. 1, pp. 8-20.

2. Shkryl' A. PHP – eto prosto. Programmiruem dlya Web-sajta [PHP is simple. Programming for the web-site]. Moscow, BHV-Peterburg Publ., 2015. 368 p.

3. Novikov B. A., Gorshkova E. A., Grafeeva N. G. Osnovy tekhnologij baz dannyh [Fundamentals of Database Technologies]. 2nd ed. Moscow, DMK Press Publ., 2020. 583 p.

4. Kuznecov M. V., Simdyanov I. V. Samouchitel' PHP [Self-Study Guide PHP]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2018. 448 p.

5. Dunaev V. V. Bazy dannyh. Yazyk SQL dlya studenta [SQL language for student]. Moscow, BHV-Peterburg Publ., 2017. 288 p.

6. Makfarland D. JavaScript i jQuery. Ischerpyvayushchee rukovodstvo [JavaScript and jQuery. A Comprehensive Guide]. Moscow, Eksmo Publ., 2017. 688 c.

7. Prajs D. Oracle Database 11g: SQL. Operatory SQL i programmy PL/SQL Programs [Oracle Database 11g: SQL. SQL statements and PL/SQL programs]. Moscow, LORI Publ., 2018. 660 p.

8. Moreto Sil'vio. Bootstrap v primerah [Bootstrap in Examples]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 314 p.

9. Burmaka A. A., Cyplakov Yu. V., Govoruhina T. N. Obnaruzhenie videosignalov na fone additivnoj shumovoj pomekhi pri apriornoj neopredelennosti harakteristik vhodnogo vozdejstviya [Detection of video signals against the background of additive noise interference with a priori uncertainty of the characteristics of the input action]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*, 2017, no. 2, pp. 47-52.

10. Burmaka A. A., Korenevskij N. A., Govoruhina T. N., Terekhova O. A. Modeli podsistem i celenapravlennyh processov, realizuemyh v informacionno-logicheskih izmeritel'nyh sistemah raspredelennogo tipa [Models of subsystems and purposeful processes implemented in information-logical measuring systems of distributed type]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2013, no. 8, pp. 8-12.

11. Govoruhina T. N., Korenevskij N. A., Terekhova O. A. Podhod k ocenivaniyu informativnosti priznakov kommutiruemyh signalov v mnogokanal'noj informacionno-logicheskoj sisteme [Approach to assessing the informativeness of the signs of switched signals in a multichannel information-logical system]. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2013, no. 6 (108), pp. 24-27.

12. Burmaka A. A., Govoruhina T. N. Informacionno-logicheskaya izmeritel'naya sistema s nechetkim mnozhestvom sostoyanij [Information-logical measuring system with a fuzzy set of states]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, computer technology, informatics. Medical instrumentation = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering,* 2012, no. 2-3, pp. 134-138.

13. Burmaka A. A., Govoruhina T. N., Mihajlov A. V. Modeli celenapravlennyh processov, realizuemyh v telemetricheskih sistemah [Models of purposeful processes implemented in telemetric systems] *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 1 (18), pp. 103-109.

14. Burmaka A. A., Govoruhina T. N., Razumova K. V. Sistemnaya model' raspoznavaniya i identifikacii sostoyaniya predstatel'noj zhelezy po ee izobrazheniyam UZI i TRUZI [A systemic model for recognizing and identifying the state of the prostate gland by its images USS AND TRUS]. *Naukoemkie tekhnologii = Science-Intensive Technologies*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 13-20.

15. Burmaka A. A., Govoruhina T. N., Terekhova O. A. Mnogokanal'naya izmeritel'naya sistema s nechetkim opisaniem eyo sostoyanij [Multichannel measuring system with a fuzzy

description of its states]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2014, no. 9, pp. 28-31.

16. Govoruhina T. N., Myasoedova M. A., Grigorov I. Yu., Polyakov A. V. Matematicheskie modeli prognozirovaniya i rannej diagnostiki professional'nyh zabolevanij nervnoj sistemy, provociruemyh kombinirovannym vozdejstviem raznorodnyh faktorov riska [Mathematical models for predicting and early diagnosis of occupational diseases of the nervous system provoked by the combined effect of heterogeneous risk factors]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Control in Biomedical Systems*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 145-152.

17. Burmaka A. A., Cyplakov Yu. V., Govoruhina T. N. Analiticheskaya i strukturnaya modeli prinyatiya resheniya v processe obnaruzheniya posledovatel'nosti videoimpul'sov s ispol'zovaniem procedury differencirovaniya vhodnogo vozdejstviya [Analytical and Structural Decision-Making Models in the Process of Detecting a Video Impulse Sequence Using the Input Action Differentiation Procedure]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*, 2017, no. 10, pp. 163-168.

18. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Govoruhina T. N., Myasoedova M. A. Nechetkie modeli ocenki urovnya ergonomiki tekhnicheskih sistem i eyo vliyaniya na sostoyanie zdorov'ya cheloveka-operatora s uchetom funkcional'nogo rezerva organizma [Fuzzy models for assessing the level of ergonomics of technical systems and its impact on the health status of a human operator]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*, 2019, vol. 7, no. 1 (24), pp. 39-53.

19. Burmaka A. A., Govoruhina T. N., Mihajlov A. V. Algoritmy upravleniya i obrabotki informacii adaptivnymi rekonfiguriruemymi modulyami [Algorithms for control and information processing by adaptive reconfigurable modules]. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 9 (135), pp. 49-54.

Информация об авторе / Information about the Author

Малышев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alta76@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-9938-3456

Alexander V. Malyshev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alta76@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-9938-345

Конаныхина Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: govtn@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-2755-0163

Немченко Степан Алексеевич, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: st-nemchenko@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-6435-7146

Tatyana N. Konanykhina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: govtn@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-2755-0163

Stepan A. Nemchenko, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: st-nemchenko@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-6435-7146

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-54-64

CC BY 4.0

Влияние агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на пропускную способность и энергопотребление беспроводной сенсорной сети

А. М. Павлов[1] ✉

[1] Курский государственный университет
ул. Радищева 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: vka_off@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Беспроводные сенсорные сети представляют собой перспективное направление в сфере телеметрического мониторинга промышленных объектов. Важнейшими ограничением при их проектировании и развертывании остается объем передаваемой через беспроводные каналы связи информации. Для его уменьшения применяются различные методы. Одним из них является метод агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов. Данная статья посвящена актуальному на сегодняшний день вопросу влияния агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на объем передаваемой информации и общее энергопотребление беспроводной сенсорной сети. Целью работы является оценка полученных от агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов изменений объема информации, передаваемой через беспроводные каналы связи и энергетического выигрыша.*

Методы. *Для теоретической и экспериментальной оценки влияния агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на объем информации, передаваемой через беспроводные каналы связи и общее энергопотребление беспроводной сенсорной сети, в работе использовались методы экспертного анализа, положения теорий: статистических оценок, принятия решений, информации, а также онлайн-сервис быстрого прототипирования Circuito.io и интегрированная среда разработки Arduino IDE.*

Результаты. *Оценено влияние агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на объем информации, передаваемой через беспроводные каналы связи и энергопотребление беспроводной сенсорной сети, выявлен характер взаимосвязи между основными показателями агрегирования.*

© Павлов А. М., 2022

Заключение. *В рамках исследования проведена оценка влияния агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на изменение объема информации, передаваемой через беспроводные каналы связи и энергетический выигрыш. Достигнутое в ходе эксперимента уменьшение объема исходных измерительных данных находилось в пределах 9,8 - 18, 7 %, снижение энергопотребления составило диапазон 7 – 15 %. Таким образом, отмечается прямая функциональная зависимость между оцениваемыми параметрами агрегирования, что объясняется изменениями коммуникационной активности сенсорных узлов в процессе осуществления беспроводной связи.*

Ключевые слова: *агрегирование; беспроводная сенсорная сеть; беспроводной канал связи; квазистационарные измерительные данные; сенсорный узел; телеметрический мониторинг.*

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

Для цитирования: Павлов А. М. Влияние агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на пропускную способность и энергопотребление беспроводной сенсорной сети // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 54–64. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-54-64.

Поступила в редакцию 18.01.2022 *Подписана в печать 16.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

Influence of the Quasi-Stationary Measurement Data Aggregation in Sensor Nodes on the Throughput and Power Consumption of the Wireless Sensor Network

Alexey M. Pavlov[1] ✉

[1] Kursk State University
33 Radischeva str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: vka_off@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *Wireless sensor networks are promising direction in the telemetric monitoring field of industrial objects. The most important limitation in their design and deployment is the amount of transmitted information via wireless communication channels. Various methods are used to reduce it. One of them is the method of the quasi-stationary measurement data aggregation in sensor nodes. This article is devoted to the current issue of the influence of the quasi-stationary measurement data aggregation in sensor nodes on the amount of transmitted information and the total power consumption of a wireless sensor network. The aim of the study is to evaluate the changes in the amount of transmitted information via wireless communication channels and energy gain obtained from the quasi-stationary measurement data aggregation in sensor nodes.*

Methods. *For a theoretical and practical assessment of the influence of the quasi-stationary measurement data aggregation in sensor nodes on the amount of transmitted information via wireless communication channels and the total energy consumption of a wireless sensor network, the methods of expert analysis, statistical assessments theory, decision-making information theory, rapid prototyping online service "Circuito.io" and the integrated development environment "Arduino IDE" were used.*

Results. *The assessment of the influence of the quasi-stationary measurement data aggregation in sensor nodes on the amount of transmitted information and power consumption of a wireless sensor network is carried out, the character of relation between main aggregation values was defined.*

Conclusion. *In the research the assessment of the influence of the quasi-stationary measurement data aggregation in sensor nodes on the changes of transmitted information via wireless communication channels and energy gain is carried out. In the experiment the basic measuring data amount was reduced on 9,8–18,7% and the decrease in energy consumption was the 7–15%.*

Keywords: *aggregation; wireless sensor network; wireless communication channel; quasi-stationary measurement data; sensor node; telemetric monitoring.*

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

For citation: Pavlov A. M. Influence of the Quasi-Stationary Measurement Data Aggregation in Sensor Nodes on the Throughput and Power Consumption of the Wireless Sensor Network. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 54–64. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-54-64.

Received 18.01.2022 *Accepted 16.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

В условия современной урбанизации в значительной мере возрастает роль беспроводных сенсорных сетей (БСС) [1; 2], которые составляют основу всевозможных систем телеметрического мониторинга (СТМ) [3] промышленных объектов. Области применения БСС различны [4; 5]: транспортировка и логистика, сельское хозяйство и окружающая среда, энергетика, медицина и др. Важнейшим ограничением при проектировании и развертывании БСС остается объем информации, передаваемой через беспроводные каналы связи (БКС) [6]. Кроме того, измерительные данные сенсорных узлов (СУ) на протяжении длительных промежутков времени по различным причинам могут оставаться квазистационарными [7], что вносит дополнительную избыточность их представления.

Преодоление этого ограничения непосредственно связано с разработкой новых методов и алгоритмов, позволяющих решать задачу экономии пропускной способности БКС за счёт агрегирования квазистационарных измерительных данных (КИД) СУ. При решении такой задачи выбор критериев оптимизации [8] играет существенную роль. Оценка эффективности агрегирования измерительных данных СУ может определяться по тому или иному критерию оптимизации, характеризующему её качество.

В настоящее время не существует единого общепринятого критерия оптимизации всесторонне учитывающего все показатели агрегирования. В подавляю-

щем большинстве случаев главным показателем агрегирования является объём измерительных данных V. Тогда первый критерий оптимизации – исходный объем измерительных данных $V_{исх}$.

Поскольку уменьшение объема передаваемых через БКС измерительных данных приводит к снижению энергопотребления БСС, то целесообразно учитывать и показатель E, характеризующий количество потребляемой энергии при передаче фиксированного объема измерительных данных. Тогда второй критерий оптимизации – исходное количество потребляемой энергии $E_{исх}$.

Поэтому целью работы является оценка полученных от агрегирования КИД СУ изменений объема информации, передаваемой через БКС и энергетического выигрыша.

Материалы и методы

Для теоретического оценивания изменений выбранных показателей агрегирования целесообразно использовать методы экспертного анализа и придерживаться основных положений теорий: статистических оценок, принятия решений, информации. Проведение экспериментальной оценки показателей агрегирования рационально осуществить путем проектирования БСС, состоящей из N макетов СУ, объединенных в сеть посредством радиоканала. При этом для создания макетов СУ представляется возможным использовать онлайн-сервис быстрого прототипирования Circuito.io и интегрированную среду разработки Arduino IDE.

Результаты и их обсуждение

В качестве метода, реализованного в виде алгоритма и обеспечивающего агрегирование КИД СУ в макетах СУ, выберем метод, предлагаемый в работе [9]. В связи с тем, что первоочередным этапом макетирования является выбор элементной базы, определим номенклатуру устройств макета СУ.

В [10] отмечается, что в качестве основы аппаратной части СУ используются недорогие процессоры с малой производительностью. Исходя из изложенного в качестве маломощной аппаратно-программной платформы будем использовать Arduino Mega 2560 на базе микроконтроллера ATmega 2560 с процессорным ядром AVR. В качестве автономного элемента электропитания выберем адаптер внешнего питания TZT 90 DC (9 В) с подключенной к нему аккумуляторной батареей РЕЙМАКС 6LR61. Для обеспечения географического позиционирования макета СУ на местности воспользуемся GPS-модулем GY-NEO6MV2. Регистрацию КИД СУ с возможностью их долговременного хранения для последующей цифровой обработки обеспечим модулем Catalex microsd card adapter. В качестве датчиков будем применять модуль цифрового сенсора определения температуры и влажности DHT22 (AM2302), а также модуль сенсора дыма, метана и сжиженного газа MQ135. С целью упрощения

коммутации устройств макета разместим их на беспаечной 830-контактной монтажной плате Breadboard. Беспроводной канал связи макета СУ организуем с помощью применения Wi-Fi модуля ESP8266 (ESP-01). Внешний вид собранного макета СУ показан ниже (рис. 1).

Схема соединений макета, разработанная в онлайн-сервисе быстрого прототипирования Circuito.io, приведена ниже (рис. 2).

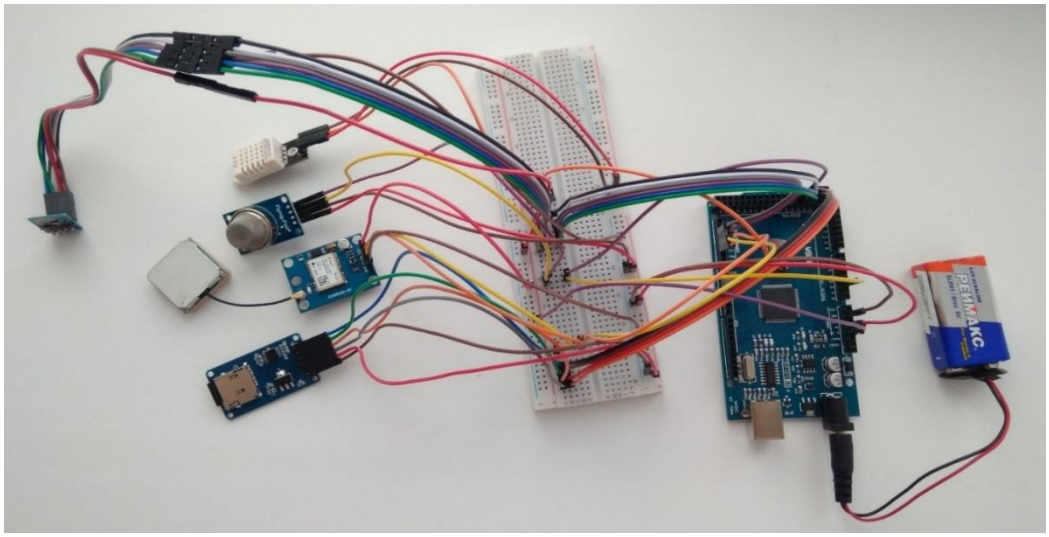


Рис. 1. Внешний вид макета СУ

Fig. 1. Appearance of the sensor node model

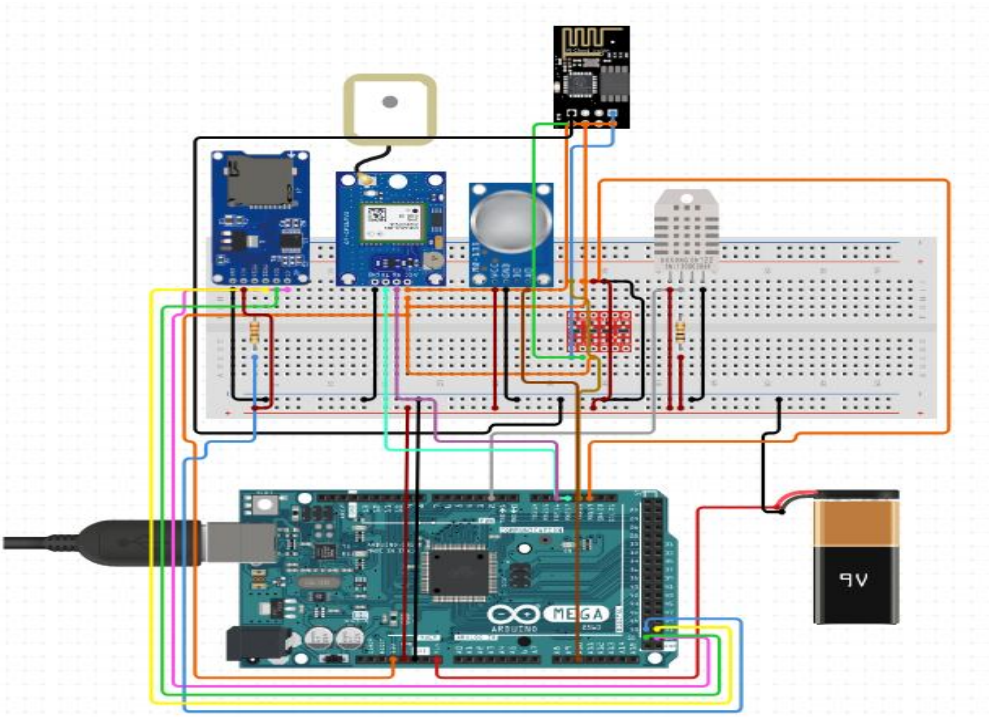


Рис. 2. Схема соединений макета СУ

Fig. 2. Connection scheme of the sensor node model

Для обеспечения синхронизированной записи КИД макетом СУ предлагается формировать в файле формата .txt структуру данных, показанную ниже (рис. 3).

Синхронизация	Идентификатор СУ	Тип сенсора	Состояние сенсора	Уровень заряда	GPS pos. 1 (широта)	GPS pos. 2 (долгота)	GPS pos. 3 (высота)	Длина ИП
ИП № 1	…							ИП № N

Рис. 3. Структура данных макета СУ

Fig. 3. Data structure of the sensor node model

Оценим экспериментальным путем показатели агрегирования (объём измерительных данных V и количество потребляемой энергии E) до и после выполнения процедуры агрегирования. Для этого выполним десять контрольных примеров, используя тестовые выборки КИД СУ, выбранные случайным образом. В процессе измерения показаний сенсоров DHT22 будем осуществлять их плавный нагрев и охлаждение, в процессе регистрации показаний сенсоров MQ135 будем отслеживать их реакцию на пары растворов аммиака (10 %), бензина АИ-95 (Pulsar), спирта этилового (90 %).

Гистограмма соотношения объемов исходных $V_{исх}$ и агрегированных $V_{агр}$ КИД СУ в ходе проведенного эксперимента показана ниже (рис. 4).

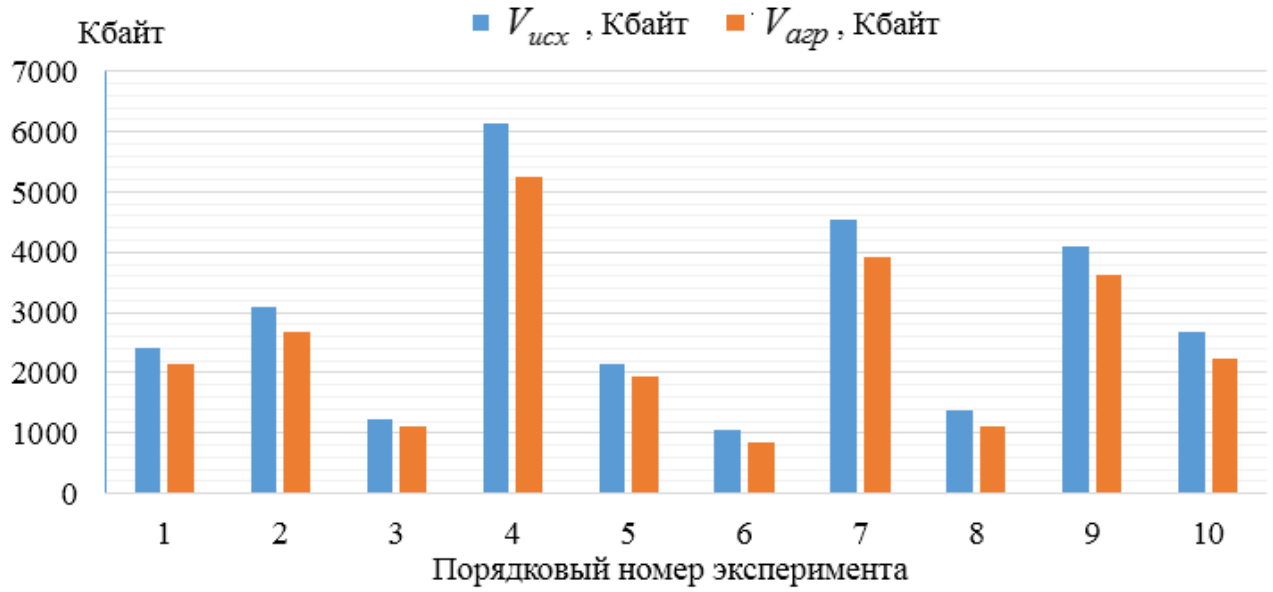


Рис. 4. Соотношения объемов исходных $V_{исх}$ и агрегированных $V_{агр}$ КИД СУ

Fig. 4. Amounts ratios of basic $V_{исх}$ and aggregated $V_{агр}$ quasi-stationary measurement data

Исходя из гистограммы (см. рис. 4) видно, что за счет агрегирования КИД СУ достигается уменьшение объема информации, передаваемой через БКС. При проведении экспериментов установлено, что объем КИД СУ, передаваемых через БКС макета БСС, уменьшился на 9,8–18, 7%. Полученный при этом совмещенный график погрешностей, т. е. минимальных и максимальных значений суммы квадратов ошибок SSE (Sum of Squared Erros), описываемой выражением (1), показан на рисунке 5:

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \hat{x}_i)^2 , \qquad (1)$$

где x_i – фактическое значение критериала, т. е. элемента выборки КИД СУ; $\bar{x}_i$ – среднее значение критериала.

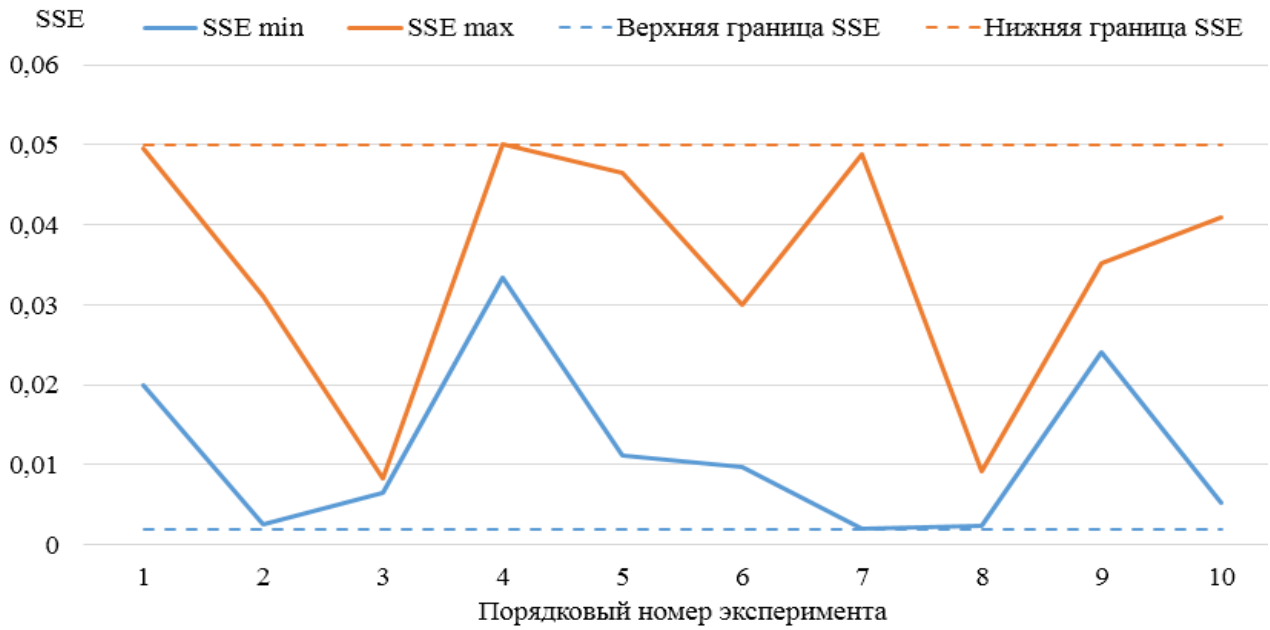


Рис. 5. Совмещенный график минимальных и максимальных значений SSE

Fig. 5. Combined graph of minimum and maximum SSE values

Стоит отметить, что эффективность агрегирования измерительных данных выбранным методом [9] зависит от степени их квазистационарности и может выходить за пределы полученного в ходе эксперимента диапазона. Это связано с динамическими изменениями количества СУ в сети, различием топологий БСС, изменением физических характеристик объектов телеметрического мониторинга в зависимости от времени (например, естественное осушение рек, таяние ледников, разрушение горных пород, изменение структуры производств и др.), а также неустранимыми сбоями и выходом из строя СУ. Полученное при этом снижение энергопотребления за счет агрегирования КИД СУ графически показано ниже (рис. 6).

Рис. 6. Снижение энергопотребления за счет агрегирования КИД СУ

Fig. 6. Reduction of energy consumption due to aggregation of quasi-stationary measurement data of sensor nodes

Из рисунке 6 нетрудно заметить, что применение агрегирования КИД СУ привело к снижению энергетических затрат макета БСС примерно на 7–15 %. Таким образом, снижение общего энергопотребления БСС непосредственно связано с объемом передаваемой через БКС информации. Очевидна следующая закономерность: при агрегировании КИД СУ уменьшается объем передаваемой через БКС информации, что приводит к снижению общего энергопотребления сети.

Таким образом, отмечается наличие прямой функциональной зависимости между оцениваемыми параметрами агрегирования – объёмом измерительных данных V и количеством потребляемой энергии E. Достигнутая в ходе проведенного эксперимента на макете БСС оптимизация составила 9,8–18,7% по объему исходных измерительных данных и 7–15% по затрачиваемой энергии сети.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в выявлении характера взаимосвязи показателей агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов, определении их влияния на объем информации, передаваемой через беспроводные каналы связи и энергопотребление беспроводной сенсорной сети, а также в доведении предложенных теоретических конструкций до уровня программ, что подтверждается свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ [11].

Выводы

Проведенное исследование позволило оценить влияние агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на изменение объема информации, передаваемой через беспроводные каналы связи и энергетический выигрыш. Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи между количеством передаваемых избыточных квазистационарных измерительных данных внутри сети и её энергопотреблением, что объясняется изменениями коммуникационной активности сенсорных узлов в процессе осуществления беспроводной связи.

Список литературы

1. Тарханова О. Ю. Применение беспроводных сенсорных сетей в прецизионном сельском хозяйстве // Проблемы информатики. 2017. Т. 37, № 4. С. 16–46.

2. Зенин А. Н., Власова В. А. Беспроводные сенсорные сети как часть инфокоммуникационной структуры. URL: https://docplayer.ru/53368014-Ris-1-arhitektura-besprovodnoy-sensornoy-seti.html (дата обращения: 20.12.2021).

3. Москвитин С. П., Комраков Д. В. Построение систем телеметрии промышленного назначения с использованием беспроводных сенсорных сетей // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2014. № 52. С. 87–91.

4. Ефименко М. С. Беспроводные сенсорные сети / М. С. Ефименко, С. И. Клымив, Р. Б. Саткенов // Молодой учёный. 2018. Т. 51, № 237. С. 40–42.

5. Tomioka Katsumi, Kenji Kondo. Ubiquitous Sensor Network System // Nec Technical Journal. 2006. Vol. 1, N 1. P. 78–82.

6. Смурыгин И. М. Концепция организации беспроводных сенсорных сетей и их применение // Молодежный научно-технический вестник. 2012. № 9. С. 31.

7. Павлов А. М., Пожидаева И. А. Оценка энергоэффективности агрегирования разнородных данных в беспроводных сенсорных сетях // Известия БелГу. 2021. Т. 48, № 1. С. 156–167.

8. Муромцев Д. Ю., Шамкин В. Н. Методы оптимизации и принятие проектных решений. Тамбов: Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2015. 80 с.

9. Павлов А. М. Метод интеллектуального квазииндифферентного агрегирования данных гетерогенных беспроводных сенсорных сетей // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 9. С. 709–719.

10. Смольников М. А., Скудняков Ю. А. Использование агрегации данных в мобильных сенсорных сетях // Информатика. 2016. № 4. С. 111–116.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021610705 РФ. Программа оценки энергоэффективности агрегирования данных в беспроводных сенсорных сетях / А. М. Павлов. № 2021610112; заявл. 11.01.21; опубл. 19.01.21.

References

1. Tarhanova O. Yu. Primenenie besprovodnyh sensornyh setej v precizionnom selskom hozyajstve [Application of Wireless Sensor Networks In Precision Agriculture]. *Problemy informatiki = Information Science Problems*, 2017, vol. 37, no. 4, pp. 16–46.

2. Zenin A. N., Vlasova V. A. Besprovodnye sensornye seti kak chast infokommunikacionnoj struktury [Wireless Sensor Networks as Part of Infocommunication Structure]. Available at: https://docplayer.ru/53368014-Ris-1-arhitektura-besprovodnoy-sensornoy-seti.html. (accessed 20.12.2021)

3. Moskvitin S. P., Komrakov D. V. Postroenie sistem telemetrii promyshlennogo naznacheniya s ispolzovaniem besprovodnyh sensornyh setey [Construction of Industrial Telemetry Systems Using Wireless Sensor Networks]. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo = Questions of Modern Science and Practice. University named after V. I. Vernadsky*, 2014, no. 52, p. 87–91

4. Efimenko M. S., Klymiv S. I., Satkenov R. B. Besprovodnye sensornye seti [Wireless Sensor Networks]. *Molodoj uchyony = Young Scientist*, 2018, vol. 51, no. 237, pp. 40–42.

5. Tomioka Katsumi, Kenji Kondo. Ubiquitous Sensor Network System. *Nec Technical Journal*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 78–82.

6. Smurygin I. M. Koncepciya organizacii besprovodnyh sensornyh setej i ih primenenie [The Concept of Organizing Wireless Sensor Networks and Their Application]. *Molodezhnyj nauchno-tekhnicheskij vestnik = Youth Scientific and Technical Bulletin*, 2012, no. 9, p. 31.

7. Pavlov A. M., Pozhidaeva I. A. Ocenka energoeffektivnosti agregirovaniya raznorodnyh dannyh v besprovodnyh sensornyh setyah [Aggregation Energy Efficiency Assessment of Heterogeneous Data in Wireless Sensor Networks]. *Izvestia BelGu = Proceeding of the BelGu*, 2021, vol. 48, no. 1, p. 156–167.

8. Muromtsev D. Yu., Shamkin V. N. Metody optimizatsii i ptinyatie proektnyh recheniy [Optimization Methods and Acceptance of Design Solutions]. Tambov, Publishing House of the Tambov State Technical University Publisher, 2015. 80 p.

9. Pavlov A. M. Metod intellektualnogo kvaziindifferentnogo agregirovaniya dannyh geterogennyh besprovodnyh sensornyh setej [Method of Intelligent Quasi-Indifferent Data Aggregation of Heterogeneous Wireless Sensor Networks]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Proceedings of Universities. Instrumentation*, 2021, vol. 64, no. 9, p. 709–719.

10. Smolnikov M. A., Skudnyakov Yu. A. Ispolzovanie agregacii dannyh v mobilnyh sensornyh setyah [Using Data Aggregation in Mobile Sensor Networks]. *Informatika = Informatics*, 2016, no. 4, p. 111–116.

11. Pavlov A. M. Programma ocenki energoeffektivnosti agregirovaniya dannyh v besprovodnyh sensornyh setyah [Program for Assessing the Energy Efficiency of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks]. Certificate RF, no. 2021610112, 2021.

Информация об авторе / Information about the Author

Алексей Михайлович Павлов, ассистент кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vka_off@mail.ru

Alexey M. Pavlov, Assistant of the Department of Software and Information Systems Administration, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vka_off@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83

CC BY 4.0

Метод и алгоритм обучения сверточной нейронной сети, предназначенной для интеллектуальной системы распознавания меланомы

Р. А. Томакова[1] ✉, И. А. Дзюбин[1], А. В. Брежнев[2]

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

[2] Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
Стремянный пер. 36, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в разработке интеллектуальной информационной системы, позволяющей реализовать процесс диагностики меланомы на основе сверточной нейронной сети.*

Методы. *В основу формирования интеллектуальной информационной системы диагностики положено использование сверточных нейронных сетей, основанных на бинарной классификации. В ходе исследования был проанализирован набор из 21000 изображений, где 10500 изображений – изображения меланомы (злокачественного образования), и 10500 изображений невуса (доброкачественного образования). В результате исследований разработан модуль, содержащий сверточную нейронную сеть, которая принимает на вход информативные признаки анализируемого патологического образования на изображении и формирует ответ, состоящий из набора вероятностных характеристик принадлежности выделенного образования к одному из классов образований – меланомы или невуса. Для обеспечения повышения уровня точности классификации была использована сверточная нейронная сеть Xception. Было проведено дообучение последних слоев используемой нейронной сети, а также выполнена регуляризация сети и реализован метод исключения нейронов в целях снижения функции потерь.*

Результаты. *На основе обработки патологических объектов на изображениях сформирован набор входных информационных признаков, предназначенный для интеллектуальной системы распознавания. Применение сверточной нейронной сети позволило установить точность классификации патологических объектов – 94,59%. Максимальное значение функции потерь в процессе исследований достигало 18,79%. Был сформирован модуль, представляющий Linux-контейнер с интерфейсом взаимодействия посредством протокола HTTP. На основе анализа входного изображения модуль формирует ответ, состоящий из вероятностной характеристики принадлежности исследуемого объекта к одному из исследуемых классов – меланомы и невуса.*

© Томакова Р. А., Дзюбин И. А., Брежнев А. В., 2022

Заключение. *Представлены результаты последовательного формирования сверточной нейронной сети посредством анализа изменения ключевых показателей (функции потерь и точности модели) в ходе изменения размера слоев сети.*

Ключевые слова: *меланома; невус; распознавание образов; сверточные нейронные сети; рак кожи.*

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

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

Поступила в редакцию 07.01.2022 *Подписана в печать 04.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

A Method and Algorithm for Training a Convolutional Neural Network Designed for an Intelligent Melanoma Recognition System

Rimma A. Tomakova[1] ✉, Ilya A. Dzyubin[1], Alexey V. Brezhnev[2]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

[2] Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny per., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of research *is to develop an intelligent information system that allows to implement the process of melanoma diagnosis based on a convolutional neural network.*

Methods. *The basis for the formation of an intelligent diagnostic information system is the use of convolutional neural networks based on binary classification. During the study, a set of 21,000 images was analyzed, where 10,500 images were an image of a melanoma (malignant formation), and 10,500 images of a nevus (benign formation).As a result of the research, a module containing a convolutional neural network has been developed, which accepts informative signs of the analyzed image as input and forms a response consisting of a set of probabilistic characteristics of the selected pathological formation belonging to one of the classes of formations – melanoma or nevus. To ensure an increase in the level of classification accuracy, the convolutional neural network Xceptionwas used. The last layers of the neural network used were retrained, the network was regularized and the method of excluding neurons was implemented in order to reduce the loss function.*

Results. *Based on the processing of pathological objects in the images, a set of input information features designed for an intelligent recognition system has been formed. The use of convolutional neural network allowed to establish the accuracy of classification of pathological objects - 94.59%. The maximum value of the loss function during the research reached 18.79%. A module was formed representing a Linux container with an interface for interaction via the HTTP protocol. Based on the analysis of the input image, the module generates a response consisting of a probabilistic characteristic of the belonging of the studied object to one of the studied classes - melanoma and nevus.*

Conclusion. *The results of the sequential formation of a convolutional neural network by analyzing changes in key indicators (loss function and model accuracy) during the change in the size of the network layers are presented.*

Keywords: *melanoma; nevus; pattern recognition; convolutional neural networks; skin cancer.*

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

For citation: Tomakova R. A., Dzyubin I. A., Brezhnev A. V. A Method and Algorithm for Training a Convolutional Neural Network Designed for an Intelligent Melanoma Recognition System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 65–83. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83.

Received 07.01.2022 *Accepted 04.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

В постановления «О Стратегии цифровой трансформации ключевых отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления Курской области на период с 2021 по 2024 годы» [1] были зафиксированы положения, в рамках которых требуется внедрить следующие технологии: искусственный интеллект, большие данные, дополненную реальность и иные технологии. Данные технологии должны быть внедрены в ключевые отрасли экономики, социальной сферы и государственного управления.

Важно отметить огромное значение для внедрения данных технологий в медицинскую сферу региона: на территории региона действует онкологический научно-клинический центр имени Г. Е. Островерхова, который принимает большое количество больных. По данным Минздрава РФ, Курская область находится на 8 позиции по показателям выявленных случаев онкологии (537,7 человека на 100 тысяч населения) [2]. Данные показатели свидетельствуют о проблеме в регионе с онкологическими заболеваниями. Как следствие, работа в данном направлении является крайне важной и необходимой для улучшения здоровья населения нации. Одним из видов онкологий, широко распространенных на текущий момент, является меланома.

Меланома представляет собой одну из наиболее распространенных злокачественных опухолей, которая может образовываться на различных участках кожи и развиваться под воздействием разнообразных факторов из клеток, находящихся в эпидермисе и вырабатывающих меланин, необходимый для защиты от ультрафиолетовых лучей [3]. На рисунке 1 приведены разнообразные виды меланомы, возникшие на различных участках тела человека.

Рис. 1. Виды меланомы

Fig. 1. Melanomakinds

Основная опасность меланомы заключается в стремительном развитии новообразования. Важная характеристика, на которую необходимо обратить пристальное внимание, – изменение размеров и цвета образования. Поскольку меланома зачастую «маскируется» под родимое пятно или большую родинку, многие пациенты обращают на нее внимание слишком поздно – в момент распространения раковых клеток в лимфатические узлы и далее по всему организму.

При выполнении исследований следует учитывать отличительные признаки не только между меланомой и раком кожи, но и между меланомой и родинкой. Во-первых, основная разница между меланомой и раком кожи заключается в способе образования: в то время как меланома образуется из пигментных меланоцитов, рак кожи формируется из клеток эпителиальной ткани [4; 5]. Во-вторых, важно понимать, чем отличаются родинки и родимые пятна от меланомы. Основные отличительные признаки меланомы от родинок и родимых пятен приведены ниже (табл. 1).

В настоящее время разработан и широко применяется алгоритм метода оценки пигментных образований A, B, C, D, E [6; 7], который дает возможность при первоначальном осмотре выявить «подозрительные» образования на теле человека. При этом анализируются 5 основных характеристик образования в соответствии с пояснениями, приведенными на рисунке 2.

Таблица 1. Основные отличительные показатели меланомы от родинок

Table 1. The main distinguishing characteristics of melanoma from moles

Показатели	Невусы	Меланома
1. Сроки появления	Появляются у человека в первые месяцы жизни	В основном в зрелом возрасте
2. Место расположения	Располагаются по всему телу и на конечностях	Новообразования локализуются на открытых частях тела, конечностях и лице
3. Цвет	От бледно-коричневого до тёмно-коричневого, при этом окраска равномерная по всей поверхности	Всегда очень темная, чёрная, окрашена неравномерно, местами цвет более выражен
4. Размер	Не превышает 1 см	Превышает 1 см, имеет тенденцию к разрастанию
5. Форма	Правильная, почти с круглым контуром и ровными краями	Неправильная форма и неравномерно очерченные края
6. Расположение в слоях эпидермиса	Находятся в верхних слоях эпидермиса и не выступают выше уровня кожи	Пигментная меланома выступает над поверхностью кожи на пару миллиметров
7. Поверхность образования	Обладают гладкой поверхностью, не шелушатся и не утолщаются, на месте расположения имеются волоски	Верхний слой меланомы бугристый и шероховатый, склонный к кровотечению при контакте с тканями
8. Окружающие ткани	Кожные покровы вокруг не изменены	Могут проявляться воспаления, уплотнения, жжение или зуд

Рис. 2. Метод ABCDE для распознавания меланомы: a – появление асимметрии новообразования; b – наличие неровных, «рваных» краев; c – неравномерность пигментации с включением темных и голубоватых оттенков; d – диаметр новообразования, больше 6 мм; e – изменение размеров новообразования с течением времени

Fig. 2. ABCDE technique for melanoma recognition: a – the appearance of asymmetry of the neoplasm; b – the presence of uneven, "ragged" edges; c – uneven pigmentation with the inclusion of dark and bluish shades; d – the diameter of the neoplasm, more than 6 mm; e – the change in the size of the neoplasm over time

Материалы и методы

Анализ исследований, проведенный в [8; 9; 10; 11], позволяет разрабатывать интеллектуальные системы классификации на основе нейронных сетей различного типа. При этом важной задачей является создание набора информативных признаков, предназначенных для обучения нейронной сети [12; 13; 14]. С целью формирования обучающего набора информативных признаков были использованы и проанализированы открытые данные, полученные отделением дерматологии медицинского университета Вены (Medical University of Vienna), совместно с клинической больницей Барселоны (Hospital Clínic Barcelona) [15; 16; 17]. Всего было проанализировано 25330 изображений с новообразованиями, которые подразделялись на 9 категорий [5], в зависимости от поставленного врачом диагноза:

1. Melanoma (меланома).
2. Melanocyticnevus (меланоцитарный невус).
3. Basalcellcarcinoma (рак кожи базальных клеток).
4. Actinickeratosis (актинический кератоз).
5. Benignkeratosis (solarlentigo / seborrheickeratosis / lichenplanus-likekeratosis) (доброкачественный кератоз (пигментные пятна / себорейный кератоз / красный плоский лишай, подобный кератозу)).
6. Dermatofibroma (дерматофиброма).
7. Vascularlesion (поражение сосудов).
8. Squamous cell carcinoma (плоскоклеточная карцинома).
9. Noneoftheabove (ничего из вышеперечисленного).

Проведенный статистический анализ распределения наиболее часто встречаемых зон обнаружения меланомы у пациентов (рис. 3) показал, что преимущественно новообразования сосредоточены в таких областях, как: нижние конечности; голова, шея; верхние конечности и передняя часть туловища.

Полученная информация свидетельствует о том, что отмеченные участки тела человека наиболее открыты летом и, как следствие, подвергаются воздействию солнечных лучей, что может способствовать возникновению меланомы.

В рамках проведенных исследований были обработаны изображения с наличием новообразований у 13170 мужчин (52%) и 12160 женщин (48%). При этом минимальный возраст для мужчины и женщины составил меньше года для каждого из полов (26 мужчин и 31 женщина). Максимальный возраст в исследовании составил 85 лет для обоих полов (781 мужчина и 538 женщин). Медианный возраст в исследовании составил 60 лет для мужчин (781 мужчина) и 50 лет для женщин (1276 женщин).

На рисунке 4 проиллюстрировано количественное распределение зон новообразований по частям тела у обследованных пациентов в зависимости от пола.

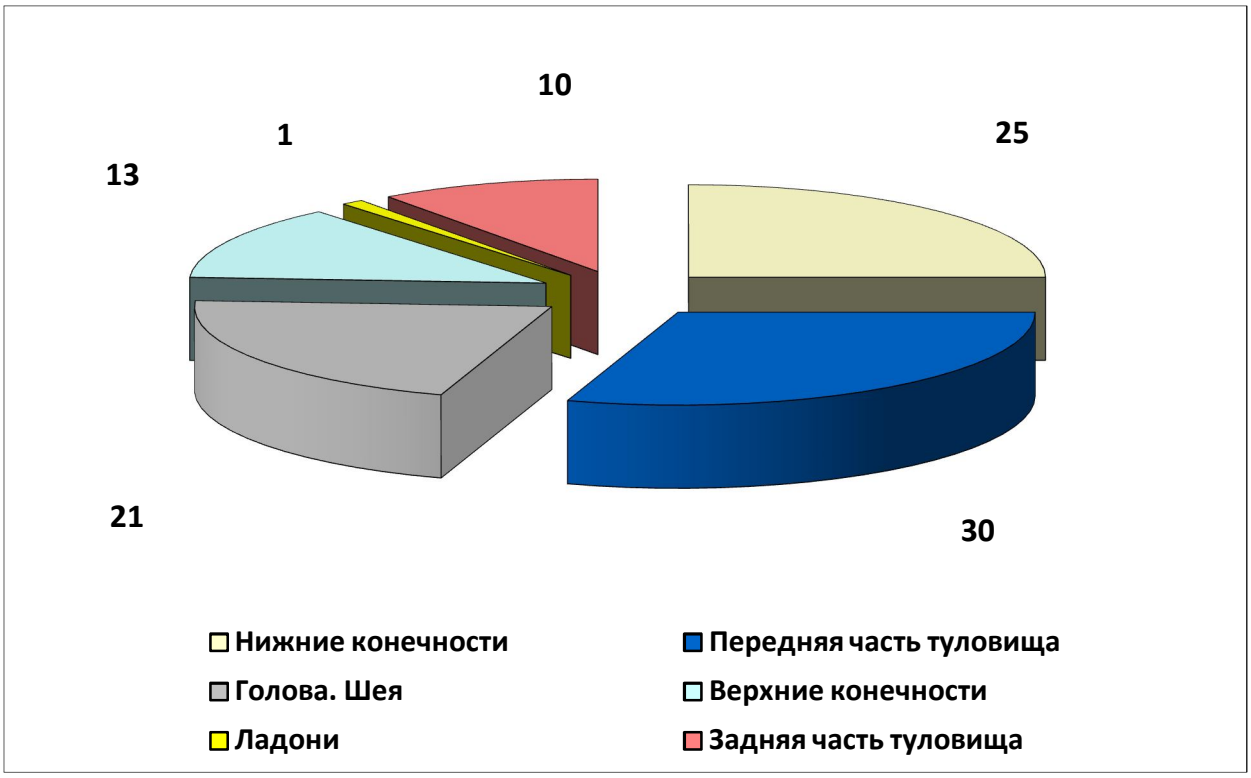


Рис. 3. Распределение зон новообразований по участкам тела, % у обследованных пациентов

Fig. 3. Distribution of neoplasm zones by body parts, % in the examined patients

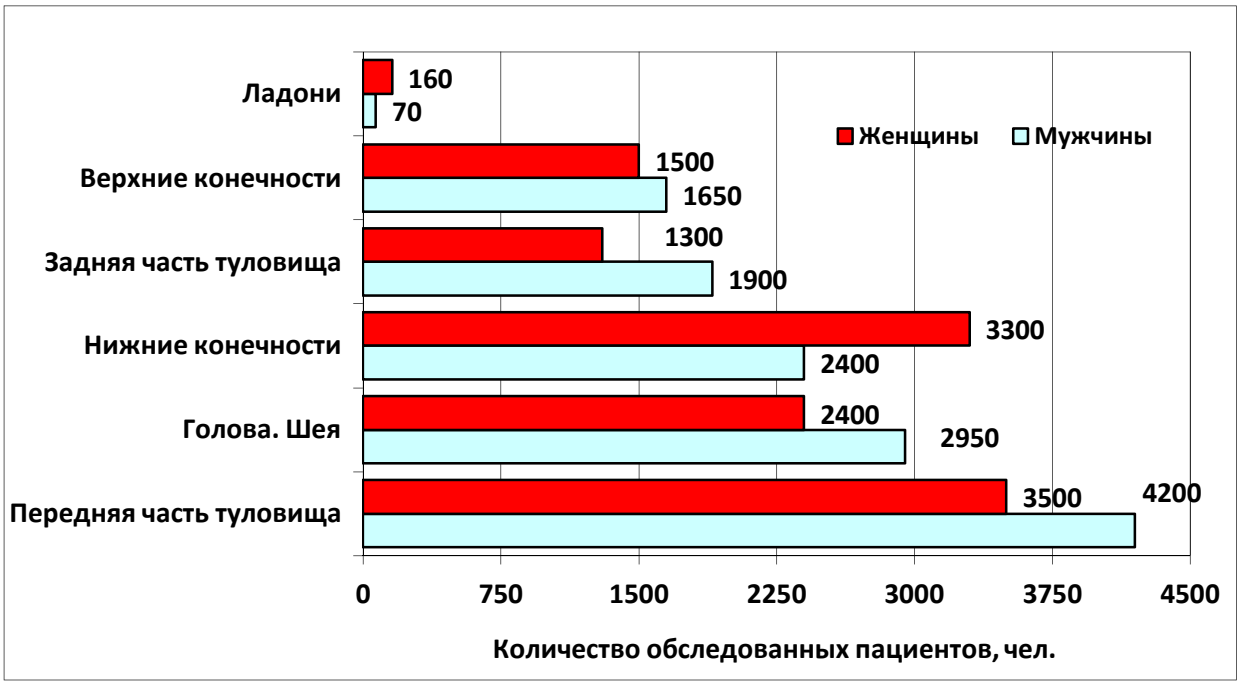


Рис. 4. Количественное распределение зон новообразований по частям тела у обследованных пациентов в зависимости от пола

Fig. 4. Quantitative distribution of neoplasm zones by body parts in the examined patients, depending on gender

Такое представление информации свидетельствует о том, что мужчины наиболее подвержены возникновению злокачественных новообразований. При этом в четырех из шести наиболее часто встречаемых зон появления новообразований доля обнаружения поражения у мужчин превышает долю поражений у женщин.

В таблице 2 приведены сформированные объемы выборок, содержащие исходный набор анализируемых изображений с новообразованиями и распределенные по 9 категориям.

Таблица 2. Объемы выборок исходного набора изображенийпо категориям

Table 2. Batch sizes of the original datasetby category

Наименование категории	Объем выборки
Меланома	4522
Меланоцитарный невус	12875
Рак кожи базальных клеток	3323
Актинический кератоз	867
Доброкачественный кератоз	2624
Дерматофиброма	239
Поражение сосудов	253
Плоскоклеточная карцинома	628
Ничего из вышеперечисленного	0

Для проведения исследований в качестве архитектуры были выбраны сверточные нейроннные сети, включающие различное число слоев. Поскольку в процессе распознавания необходимо провести классификацию множества, содержащего значительное число патологических объектов на изображениях, то принято решение для этой цели использовать сверточную нейронную сеть Xception, архитектура которой приведена ниже (рис. 5).

В рамках проводимых исследований для обучения сверточной нейронной сети анализировались 2 класса новообразований – меланома и невус, поскольку объемы выборок, состоящие из числа изображений с другими новообразованиями [6], содержащиеся в других классах, недостаточны для эффективного обучения нейронной сети, что может препятствовать точности и корректности итоговой модели. Также в целях повышения качества модели дополнительно был задействован набор данных [7], содержащий только 2 класса новообразований. После объединения двух наборов данных была сформирована выборка из 21000 изображений, разделенная на 3 набора: обучающий, включающий 19000 изображений; контрольный, состоящий из 1000 изображений; тестовый, заключающий 1000 изображений.

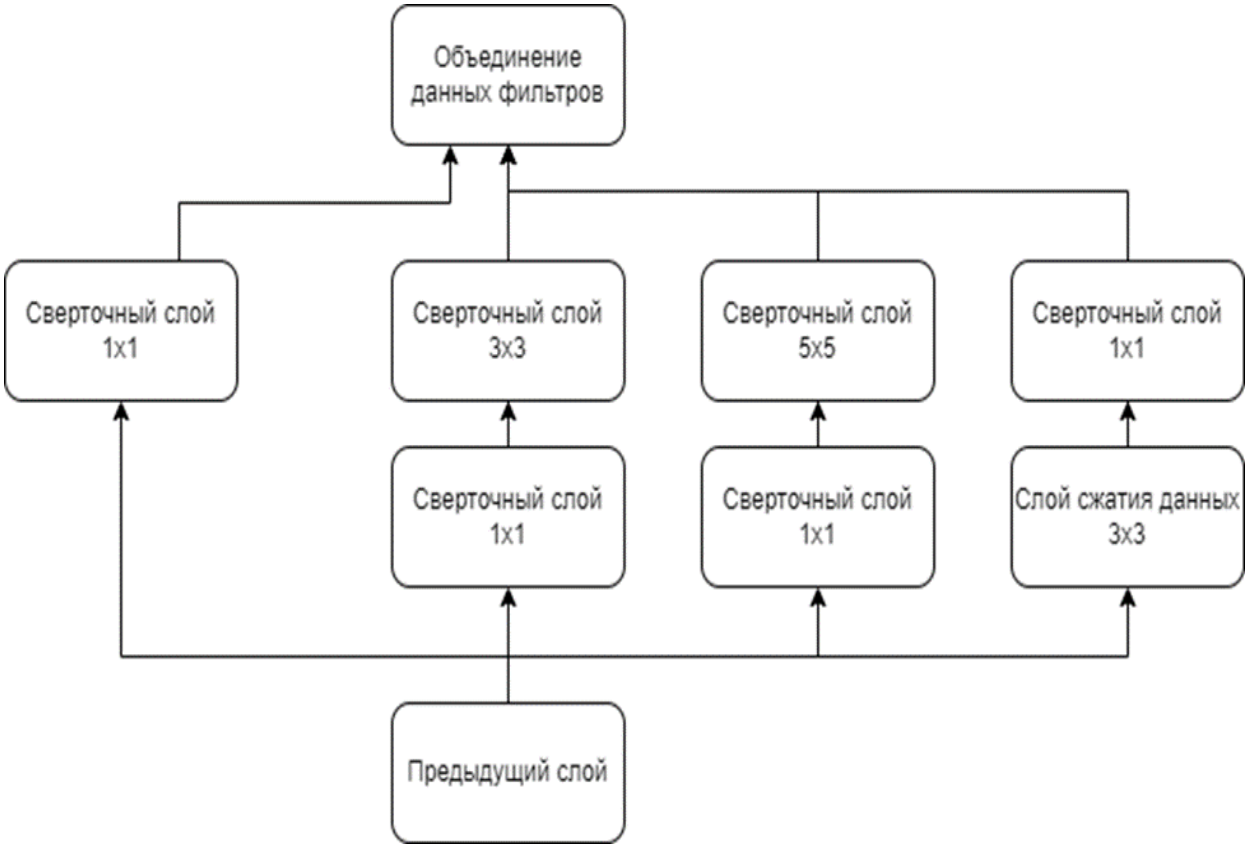


Рис. 5. Архитектура сверточной нейронной сети Xception

Fig. 5. Xception convolutional neural network architecture

Методы обучения сверточной нейронной сети

В процессе обучения сверточной нейронной сети были реализованы следующие эксперименты: проводилось изменение размера слоев сети, реализован метод исключения нейронов (англ. Dropout), также выполнялась регуляризация весов, в частности проводилась L2-регуляризация. При этом было проведено сравнение результатов двух оптимизаторов: оптимизатора RMSprop, который является версией алгоритма прогрессивного спуска с импульсом, и Adam [18], в основе которого реализуется метод стохастического градиентного спуска. Важной составляющей является то, что в качестве основы сверточной сети была использована сеть Xception [7]. Выбор основывался на соотношении объема обучаемых параметров к объему занимаемой памяти ЭВМ и точности, предоставляемой нейронной сетью до начала обучения на новых данных.

В рамках проведения исследований по изменению числа слоев нейронной сети были сформированы соотношения нейронов в полносвязных слоях нейронной сети:

– 1 слой, содержащий 512 нейронов;

– 2 слоя, где каждый слой содержит по 256 нейронов;

– 2 слоя, где каждый слой содержит по 128 нейронов;

– 1 слой, содержащий 128 нейронов.

Поскольку обучить нейронную сеть без оптимизирующей функции не представляется возможным, то получаемые значения этой функция являются важными параметрами, характеризующими процесс обучения. Результаты проведенных исследования представлены в таблице 3.

Таблица 3. Основные показатели нейронной сети при изменении числа нейронов в слоях

Table 3. Target neural networkindicators in the process of changing layer size

Количество нейронов в слое 1	Количество нейронов в слое 2	Оптимизатор	Точность	Значение функции потерь
512	-	Adam	0,9230	0,2411
512	-	RMSprop	0,9100	0,6245
256	256	Adam	0,9010	0,4233
256	256	RMSprop	0,9060	0,6177
128	128	Adam	0,9070	0,2495
128	128	RMSprop	0,9139	0,5524
128	-	Adam	0,9340	0,2131
128	-	RMSprop	0,9369	0,2685

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы: при слишком большом количестве нейронов в нейронной сети наступает процесс переобучения. В ходе данного процесса нейронная сеть перестает обучаться, поскольку запомнила весь набор входных данных. Для решения данной проблемы, помимо уменьшения количества нейронов, применяют следующие подходы к оптимизации – метод исключения нейронов (Dropout) и регуляризация весовых коэффициентов.

Также было установлено влияние оптимизатора на процесс обучения: оптимизатор Adam [18] показывает сопоставимый уровень точности модели, в то время как значение функции потерь может быть снижено более чем в 2,5 раза. При рассмотрении лучших показателей у образцов с 128 нейронами точность модели с оптимизатором Adam уступает на 0,003%, а значение функции потерь оказывается лучше на 21%.

В процессе проведения исследований был реализован метод исключения нейронов (Dropout) из процесса обучения сети [19]. Основной целью применяемого метода является снижение эффекта переобучения сети в тех случаях, когда объем обучающих данных мал и велика вероятность того, что нейронная сеть запомнит входные данные, после чего процесс обучения перестает иметь смысл. В таблице 4 приведены основные нейронной сети при использовании метода исключения нейронов.

Таблица 4. Ключевые показатели нейронной сети при использовании метода исключения нейронов

Table 4. Target neural networkindicators in the process of using dropout technique

Количество нейронов	Оптимизатор	Dropout коэффициент	Точность	Значение функции потерь
128	Adam	–	0,9340000153	0,2131339461
128	Adam	0,2	0,9269999862	0,2129483223
128	Adam	0,4	0,9179999828	0,2853314281
128	Adam	0,5	0,8870000243	0,380569905
128	Adam	0,7	0,9060000181	0,2771539688

В целях улучшения точности модели при переобучении был реализован метод *L*2-регуляризации весов. В основе метода *L*2-регуляризации лежит расчет значений функции потерь по формуле (1) и введение штрафов, накладываемых на наибольшие весовые коэффициенты, которые приводят к снижению точности модели в процессе обучениясети [20].

$$L2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\hat{Y}_i - Y_i)^2 + \lambda\sum_{i=1}^{N}\theta_i^2 , \qquad (1)$$

где N – размер слоя, к которому применяется регуляризация; Y – фактическое значение *i*-го выхода текущего слоя; $\hat{Y}$ – прогнозируемое значение *i*-го выхода текущего слоя; λ – коэффициент регуляризации; θ – весовой коэффициент *i*-го нейрона текущего слоя.

В таблице 5 приведены результаты обучения нейронной сети при использовании метода *L*2-регуляризации

Таблица 5. Показатели обучения нейронной сети при использовании метода *L*2-регуляризации

Table 5. Neural network learning indicators using the L2 regularization method

Количество нейронов	Оптимизатор	Коэффициент L2-регуляризации	Точность	Значение функции потерь
128	Adam	–	0,9340	0,2131
128	Adam	0,01	0,9460	0,1880
128	Adam	0,001	0,9300	0,2117
128	Adam	0,0001	0,9120	0,3031

В качестве среды разработки программного обеспечения была применена интегрированная среда разработки JetBrainsPyCharm. Целевым фреймворком глубокого обучения был использован Google Tensorflow. Для обучения нейронной сети применялся сервер со следующими характеристиками: Xeone5 2678v3, 128Гб DD3 ECCREG, NVidia 3080Ti.

Разработанная нейронная сеть содержит API, написанный на основе библиотеки FastAPI. Данный API содержит единственный модуль, реализующий метод predict. Входными параметрами при реализации метода являются элементы

патологических образований на анализируемых изображениях, представленные в виде массива, измеряемого в байт. Выходным является вектор, компоненты которого характеризуют вероятности принадлежности анализируемого объекта к одному из видов новообразований.

Результаты и их обсуждение

На основе проведенных исследований были построены графики изменения значений функции потерь для различных значений коэффициента исключения нейронов (рис. 6).

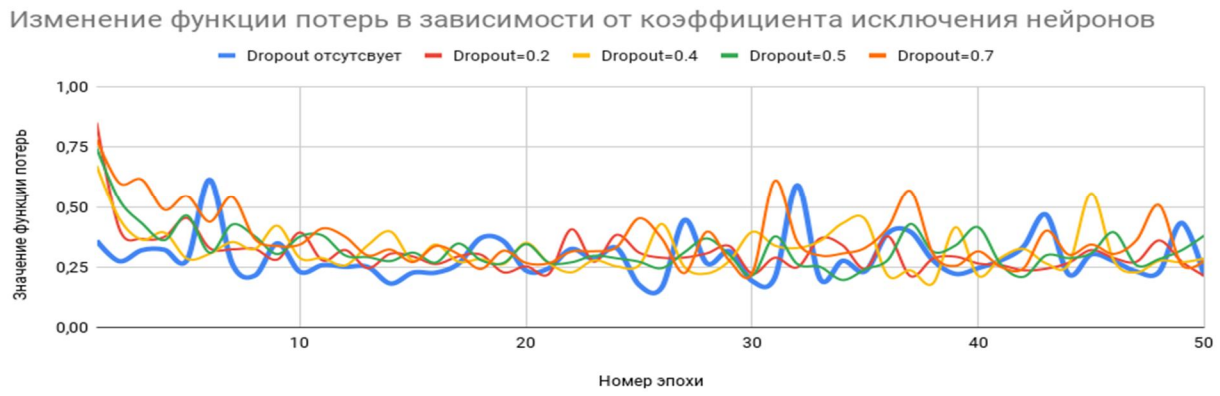


Рис. 6. Изменение функции потерь в зависимости от коэффициента исключения нейронов

Fig. 6. Variation of the loss function depending on the exclusion coefficient of neurons

При анализе полученных данных удалось выяснить следующее: применение метода исключения нейронов улучшило значение функции потерь только при коэффициенте, равном 0,2, при этом не снизив точность (рис. 7). Все остальные коэффициенты привели к значительному росту значения данной функции.

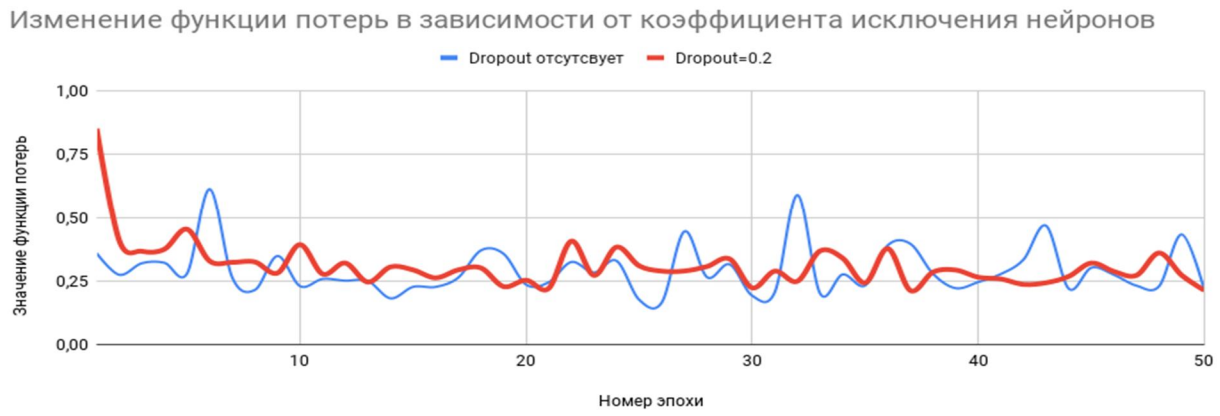


Рис. 7. Изменение функции потерь в зависимости от коэффициента исключения нейронов (пример для коэффициента, равного 0,2)

Fig. 7. Variation of the loss function depending on the exclusion coefficient of neurons (example where coefficient value is 0,2)

На рисунке 8 приведены графики изменения точности предложенной модели для случаев изменения различных значений коэффициента исключения нейронов.

Рис. 8. Изменение точности модели в зависимости от коэффициента исключения нейронов

Fig. 8. Variation of the model accuracy depending on the exclusion coefficient of neurons

Рассмотрим изменение точности модели в зависимости от коэффициента исключения нейронов для коэффициента, равного 0,2 (рис. 9).

При анализе полученных данных установлено, что применение метода L2-регуляризации (рис. 10, рис. 11) улучшило значение функции потерь только при коэффициенте, равном 0,01, при этом одновременно повысив точность модели (рис. 12, рис. 13). Все остальные коэффициенты привели к деградации модели.

Рис. 9. Изменение точности модели в зависимости от коэффициента исключения нейронов (пример для коэффициента, равного 0,2)

Fig. 9. Variation of the model accuracy depending on the exclusion coefficient of neurons (example where coefficient value is 0,2)

Рис. 10. Изменение значения функции потерь в зависимости от коэффициента *L*2-регуляризации

Fig. 10. Variation of the loss function depending on the exclusion *L2* regularization coefficient

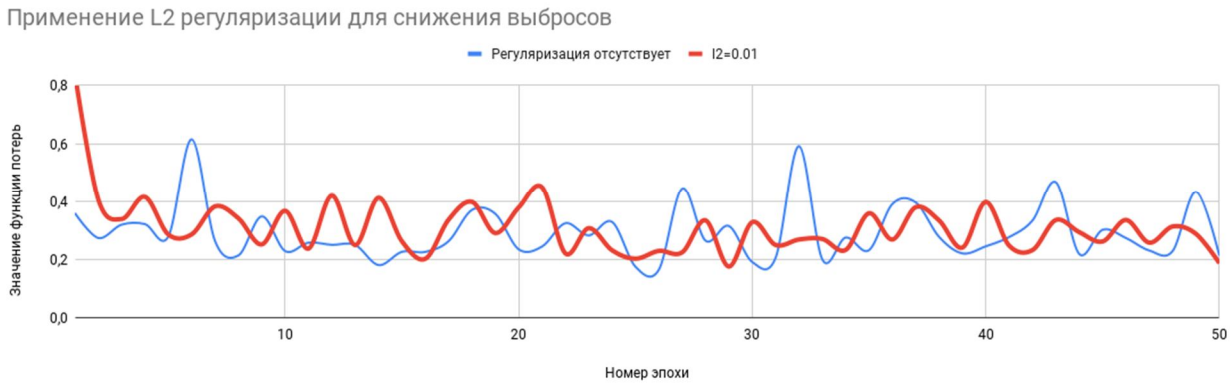


Рис. 11. Изменение значения функции потерь в зависимости от коэффициента *L*2 регуляризации (для коэффициента, равного 0,01)

Fig. 11. Variation of the loss function depending on the exclusion *L*2 regularization coefficient (example where coefficient value is 0,01)

Рис. 12. Изменение точности модели в зависимости от коэффициента *L*2-регуляризации

Fig. 12. Variation of the model accuracy depending on the exclusion *L*2 regularization coefficient

Рис. 13. Изменение точности модели в зависимости от коэффициента L2-регуляризации (для коэффициента, равного 0,01)

Fig. 13. Variation of the model accuracy depending on the exclusion L2-regularization coefficient (example where coefficient value is 0,01)

Выводы

Проведено обучение сверточной нейронной сети на основе предоставленного набора данных в целях многоклассовой классификации новообразований, как доброкачественных, так и злокачественных.

Достоинства разработанного модуля, содержащего в себе сверточную нейронную сеть, состоят в следующем:

– простота использования: требуется только загрузить изображение новообразования. В качестве результата будет получен набор вероятностей, к какому классу относится новообразование;

– точность распознавания входных данных составляет 94,59%;

– значение функции потерь составляет 18,79%.

В перспективе разработанный модуль может быть использован в более крупных информационных решениях, нацеленных на медицинскую диагностику. Весомой перспективой развития данного модуля является установление принадлежности новообразования к доброкачественному или злокачественному классу опухолей.

Список литературы

1. Данные по онкологическим заболеваниям в Курской области. URL: https://adm.rkursk.ru/index.php?id=13&mat_id=108524 (дата обращения: 07.12.2021).

2. О Стратегии цифровой трансформации ключевых отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления Курской области на период с 2021 по 2024 годы: постановление № 880-па Администрации Курской области от 20.08.2021 г. URL: https://adm.rkursk.ru/index.php?id=109&mat_id= 123917 (дата обращения: 22.12.2021).

3. Меланома кожи. URL: https://nmicr.ru/meditsina/onkologicheskie-zabolevaniya-i-programmy-lecheniya-raka/programma-protiv-raka-kozhi-i-skeleta/melanoma-kozhi/ (дата обращения: 11.12.2021).

4. Пауков, В. С. Патологическая анатомия. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. Т. 2. С. 359-360.

5. Стадии меланомы. URL: https://daily-med.com.ua/stati/stati-chto-takoe-melanoma-kozhi-i-kak-ee-lechit (дата обращения: 12.12.2021).

6. Метод ABCDE в диагностике меланомы. URL: https://melanomaunit.moscow/onkologiya/melanoma/ (дата обращения: 12.12.2021).

7. Классификация меланомы по А. Бреслоу меланомы. URL: https://melanomaunit.ru/melanoma-diagnostics/klassifikatsiya-melanomy/ (дата обращения: 13.12.2021).

8. Иванов А. В., Томакова Р. А., Мишустин В. Н. Интеллектуальная система морфологического анализа патологических изменений при ретинопатии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-1(41). С. 19–27.

9. Томакова Р. А., Филист С. А., Томаков М. В. Гибридные технологии в интеллектуальных системах идентификации лекарственных средств // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 6. С. 31-66.

10. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, N 22. P. 6039-6041.

11. Нейронные сети с макрослоями для классификации и прогнозирования патологий сетчатки глаза / Н. А. Кореневский, Р. А. Томакова, С. П. Серегин, А. Ф. Рыбочкин // Медицинская техника. 2013. № 4(280). С. 16-18.

12. The Role of Hybrid Classifiers in Problems of Chest Roentgenogram Classification / R. Tomakova, S. Filist, R. Veynberg, A. Brezhnev [et al.] // Advance in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 902. P. 293-303.

13. Intelligent Medical Decision Suport System Based on Internet-Technology / R. A. Tomakova, S. A. Filist, A. I. Pykhtin, A. N. Shutkin // 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGE 2016. Albena, 2016. P. 263-270.

14. Томакова Р. А., Ефремов М. А., Жилин В. В. Нечеткие нейросетевые технологии для классификации форменных элементов крови // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 84-89.

15. The HAM10000 Dataset, Alarge Collection of Multi-Sourcedermatos Copicimages of Common Pigmented Kinlesions. URL: https://www.nature.com/articles/sdata2018161 (дата обращения: 14.12.2021).

16. Melanoma data set 256x256px. URL: https://www.kaggle.com/cdeotte/jpeg-melanoma-256x256/ (дата обращения: 13.12.2021).

17. Keras applications. URL: https://keras.io/api/applications/ (дата обращения: 14.12.2021).

18. Adam – latest trends in deep learning optimization. URL: https://towardsdatascience.com/adam-latest-trends-in-deep-learning-optimization-6be9a291375c (дата обращения: 14.12.2021).

19. Dropout. URL: https://keras.io/api/layers/regularization_layers/dropout/ (дата обращения: 14.12.2021).

20. Layer weigh tregularizers. URL: https://keras.io/api/layers/regularizers/ (дата обращения: 14.12.2021).

References

1. Dannye po onkologicheskim zabolevaniyam v Kurskoi oblasti [Data on oncological diseases in the Kursk region]. Available at: https://adm.rkursk.ru/index.php?id=13&mat_id=108524. (accessed 07.12.2021)

2. O Strategii tsifrovoi transformatsii klyuchevykh otraslei ekonomiki, sotsi-al'noi sfery i gosudarstvennogo upravleniya Kurskoi oblasti na period s 2021 po 2024 gody [On the Strategy of digital Transformation of key Sectors of the economy, social sphere and Public Administration of the Kursk region for the period from 2021 to 2024]. Resolution of the Administration of the Kursk region of August 08, 2021 N 880-pa. Available at: https://adm.rkursk.ru/index.php?id=109&mat_id=123917. (accessed 22.12.2021)

3. Melanoma kozhi [Melanoma of the skin]. Available at: https://nmicr.ru/meditsina/onkologicheskie-zabolevaniya-i-programmy-lecheniya-raka/programma-protiv-raka-kozhi-i-skeleta/melanoma-kozhi. (accessed 11.01.2021)

4. Paukov V. S. Patologicheskaya anatomiya [Pathological anatomy]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2015, vol. 2, pp. 359-360.

5. Stadii melanomy [Stages of melanoma]. Available at: https://daily-med.com.ua/stati/stati-chto-takoe-melanoma-kozhi-i-kak-ee-lechit. (accessed 12.01.2021)

6. Metod ABCDE v diagnostike melanomy [The ABCDE method in the diagnosis of melanoma]. Available at: https://melanomaunit.moscow/onkologiya/melanoma. (accessed 12.12.2021)

7. Klassifikatsiya melanomy po A. Breslou melanomy [Classification of melanoma according to A. Breslow melanoma]. Available at: https://melanomaunit.ru/melanoma-diagnostics/klassifikatsiya-melanomy. (accessed 13.12.2021)

8. Ivanov A. V., Tomakova R. A., Mishustin V. N. Intellektual'naya sistema morfologicheskogo analiza patologicheskikh izmenenii pri retinopatii [Intelligent system of morphological analysis of pathological changes in retinopathy]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, no. 2-1(41), pp. 19-27.

9. Tomakova R. A., Filist S. A., Tomakov M. V. Gibridnye tekhnologii v intellektual'nykh sistemakh identifikatsii lekarstvennykh sredstv [Hybrid technologies in intelligent drug identification systems]. *Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers: Development, Application,* 2014, no. 6, pp. 31-66.

10. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 6039-6041.

11. Korenevsky N. A., Tomakova R. A., Seregin S. P., Rybochkin A. F. Nejronnyeseti s makrosloyami dlya klassifikaciii prognozirovaniya patologij setchatki glaza [Neural networks with macro layers for classification and prediction of retinal pathologies]. *Medicinskayatekhnika = Medical Equipment*, 2013, no. 4(280), pp. 16-18.

12.Tomakova R., Filist S., Veynberg R., Brezhnev A., eds. The Role of Hybrid Classifiers in Problems of Chest Roentgenogram Classification. *Advance in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 902, pp. 293-303.

13. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I., Shutkin A. N. Intelligent Medical Decision Suport System Based on Internet-Technology // 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGE 2016. Albena, 2016, pp. 263-270.

14. Tomakova R. A., Efremov M. A., Zhilin V. V. Echetkie neirosetevye tekhnologii dlya klassifikatsii formennykh elementov krovi [Fuzzy neural network technologies for classification of shaped blood elements]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogouniversiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering,* 2013, no. 4, pp. 84-89.

15. The HAM10000 Dataset, Alarge Collection of Multi-Sourcedermatos Copicimages of Common Pigmented Kinlesions. Available at: https://www.nature.com/articles/sdata2018161. (accessed 14.12.2021)

16. Melanoma data set 256x256px. Available at: https://www.kaggle.com/cdeotte/jpeg-melanoma-256x256/. (accessed 13.12.2021)

17. Keras Applications. Available at: https://keras.io/api/applications/. (accessed 14.01.2021)

18. Adam – latest trends in deep learning optimization. Available at: https://towardsdatascience.com/adam-latest-trends-in-deep-learning-optimization-6be9a291375c. (accessed 14.12.2021)

19. Dropout. Available at: https://keras.io/api/layers/regularization_layers/dropout/. (accessed 14.12.2021)

20. Layer weight regularizers. Available at: https://keras.io/api/layers/regularizers/. (accessed 14.12.2021)

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-0152-4714,
Researcher ID WoS: O-6164-2015,
AuthorID: 739221

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-0152-4714,
Researcher ID WoS: O-6164-2015,
Author ID: 739221

Дзюбин Илья Александрович, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: idzyubin@yahoo.com,
ORCID: 0000-0003-3679-2313

Ilya A. Dzyubin, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: idzyubin@yahoo.com,
ORCID: 0000-0003-3679-2313

Брежнев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: brezhnev.av@rea.ru,
ORCID: 0000-0002-3679-7379

Alexey V. Brezhnev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation,
e-mail: brezhnev.av@rea.ru,
ORCID: 0000-0002-3679-7379

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-84-98

CC BY 4.0

Восстановление непрерывного изображения с использованием оценок максимального правдоподобия и интерполяции по атомарным функциям в соответствии с апертурой светочувствительного элемента датчика

И. Н. Ефремова[1], В. В. Ефремов[1] ✉

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

✉ e-mail: v2@bk.ru

Резюме

Цель исследования *– разработать метод эффективной обработки изображения, полученного с помощью оптической системы, на компьютере.*

Методология. *Представлены два последовательно применяемых метода для представления цифрового изображения как непрерывно приближающегося к исходным значениям сигнала. Квантованная интенсивность света рассматривается как сгруппированные данные. Метод максимального правдоподобия на сгруппированных данных позволяет получить наилучшую оценку исходного аналогового значения интенсивности света для каждого светочувствительного элемента датчика. Интенсивность света, измеряемая каждым светочувствительным элементом, рассматривается как двойной интеграл исходного оптического сигнала по области, определяемой апертурой элемента. Интерполяция атомарными функциями может использовать интегрированные данные для получения приближения к исходному оптическому сигналу.*

Результаты. *Актуальной проблемой в системах технического зрения является потеря информации при преобразовании оптического сигнала в цифровой вид. Поэтому актуальна задача эффективной обработки цифрового изображения.*

Необходимо разработать метод, исследовать его путем проведения статистического моделирования, сделать выводы.

Для того чтобы оценить эффективность разработанного метода, было проведено статистическое моделирование, после чего произведен сравнительный анализ полученных результатов для разработанного метода и метода моментов. В целом результаты эксперимента согласуются с теоретическими расчетами.

Заключение. *Использование интерполяции, интерполяционного полинома, который получен в результате работы предложенного метода для представления оптического изображения, позволяет получить дополнительную информацию об оптическом сигнале и об используемой оптической системе. В свою очередь, это дает возможность уменьшить требования к дорогостоящему оптическому оборудованию и снизить материальные затраты или увеличить качественные характеристики получаемого оптического изображения без увеличения производительности оборудования для работы с изображениями.*

Ключевые слова: *оптический сигнал; квантование; дискретизация; сгруппированные данные; оценки максимального правдоподобия; интерполяция; атомарные функции.*

© Ефремова И. Н., Ефремов В. В., 2022

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

Для цитирования: Ефремова И. Н., Ефремов В. В. Восстановление непрерывного изображения с использованием оценок максимального правдоподобия и интерполяции по атомарным функциям в соответствии с апертурой светочувствительного элемента датчика // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 84–98. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-84-98.

Поступила в редакцию 18.01.2022 *Подписана в печать 15.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

Reconstruction of a Analog Image Using Maximum Likelihood and Interpolation by Atomic Functions According to the Aperture of the Photosensitive Element of the Sensor

Irina N. Efremova[1], Vladislav V. Efremov[2] ✉

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: v2@bk.ru

Abstract

***The purpose of research** is develop a method for efficient processing of an optical image on a digital computer.*
***Methodology.** Two sequentially applied methods are presented for representing a digital image as continuously approaching the original signal values. The quantized light intensity is considered as grouped data. The maximum likelihood method on grouped data allows you to get the best estimate of the original analog value of the light intensity for each photosensitive element of the sensor. The light intensity measured by each photosensitive element is considered as a double integral of the original optical signal over the area defined by the element aperture. Interpolation by atomic functions can use the integrated data to obtain an approximation to the original optical signal.*
***Results.** An urgent problem in vision systems is the loss of information when converting an optical signal into a digital form. Therefore, the problem of efficient digital image processing is relevant.*
It is necessary to develop a method, to investigate it by conducting statistical modeling, to draw conclusions.
In order to evaluate the effectiveness of the developed method, statistical modeling was carried out, after which a comparative analysis of the results obtained for the developed method and the method of moments was carried out. On the whole, the results of the experiment agree with the theoretical calculations.
***Conclusion.** The use of interpolation, an interpolation polynomial, which is obtained as a result of the proposed method for representing an optical image, allows you to obtain additional information about the optical signal and the optical system used. In turn, this makes it possible to reduce the requirements for expensive optical equipment and reduce material costs or increase the quality characteristics of the resulting optical image without increasing the performance of the imaging equipment.*

***Keywords:** optical signal; sampling; quantization; grouped data; maximum likelihood estimates; interpolation; atomic functions.*

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

For citation: Efremova I. N., Efremov V. V. Reconstruction of a Analog Image Using Maximum Likelihood and Interpolation by Atomic Functions According to the Aperture of the Photosensitive Element of the Sensor. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 84–98. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/ 2223-1536-2022-12-1-84-98.

Received 18.01.2022 *Accepted 15.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

В системах технического зрения, построенных на принципах цифровой обработки оптических изображений, для дискретизации получаемого с оптического фотоприемника непрерывного сигнала применяются датчики CMOS или CCD. Квантование сигнала производится аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

К факторам, сопровождающимся потерей данных, относятся частоты дискретизации и размер апертуры светочувствительных элементов [1]. Уменьшение потери данных возможно достичь улучшением характеристик оптического сенсора или повышением эффективности алгоритмов обработка оцифрованного изображения. Улучшение характеристик оптического сенсора связано со значительным удорожанием оборудования [2], а также попутно с возможным ухудшением некоторых характеристик системы в целом. С помощью обработки оцифрованных изображений, учитывающей имеющиеся характеристики сенсора, можно улучшить искажения, вызванные размером апертуры светочувствительных элементов. Последнее может быть особенно ценно в условиях, когда возможность улучшения характеристик сенсора ограниченна.

Аналого-цифровое преобразование также может привести к информационным потерям. Пути уменьшения потерь те же – улучшение характеристик оборудования или увеличение эффективности процедур обработки оцифрованного изображения с учетом особенностей сигнала и АЦП. Улучшение характеристик влечет за собой удорожание оборудования, и, кроме того, может привести к увеличению времени преобразования. Между тем это неэффективно, например, при высокой зашумленности сигнала [3; 4].

Повышение производительности системы компьютерного зрения для увеличения количества информации в изображении сцены часто выполняется методами сверхвысокого разрешения, которые учитывают данные из нескольких смещенных изображений сцены, вероятностные модели яркости сцены и другие дополнительные источники информации [5]. В этой статье основное внимание уделяется максимальному использованию информации, полученной в фиксированных условиях из одного изобра-

жения, для восстановления распределения интенсивности света сцены без каких-либо предварительных предположений о сцене с использованием только физических параметров оптико-электронного пути. Подобные вопросы рассматривались в [6].

Предлагаемый метод интерполяции неявно включает численное дифференцирование, поэтому для него разумно получить как можно более точные входные данные. Благодаря этому метод интерполяции дополняется методом повышения точности измерения значений функции яркости. Подобные задачи рассматривались в [4], [7], [8], но в предлагаемой работе учтена специфика распределения вероятностей несущих сигналов.

Материалы и методы

Процесс аналого-цифрового преобразования последовательности напряжений на входе АЦП, получаемых с выходов оптической системы, в ходе серии измерений, можно представить как операции группирования и цензурирования случайной величины:

$$ADC = \begin{cases} 0, U_{in}(\mathrm{i,j,k}) \le \mathrm{u}_1, \\ n, u_{n-1} < U_{in}(\mathrm{i,j,k}) \le \mathrm{u}_n, \\ 2^m - 1, u_{2^m-1} < U_{in}(\mathrm{i,j,k}), \end{cases} \quad (1)$$

где U – напряжение на входе АЦП; i, j – номера строки и элемента, соответственно, в строке дискретного изображения; k – идентификатор кадра; m – число разрядов АЦП; U_n – величина n-го порогового значения АЦП. Ценность сигнала корреспондируется с оценкой математического ожидания сигнала с использованием сгруппированного и цензурированного набора значений. Операции группировки и цензурирования могут повлечь за собой информационные потери. Между тем выполнение группировки способно увеличить надежность оценок математического ожидания [9]. Чаще всего для определения оценки используется метод моментов. Оценка, полученная таким способом, не является ни эффективной, ни непротиворечивой, ни несмещенной. Однако лучший методом определения оценки математического ожидания – метод максимального правдоподобия [8]. Оценка, полученная таким методом, в случае распределения Пуассона и непротиворечива, и эффективна, и можно откорректировать ее смещение. Вычисления производятся согласно

$$L(a) = \prod_{n=0}^{2^m-1} p_n^{N_n}(\alpha), \quad (2)$$

где $p_n(a)$ – вероятность того, что случайная величина с параметром α находится в интервал группировки n; N_n – число совпадений в n-м интервале;

$$p_n(a) = \sum_{u_n \le k \le u_{n+1}} \frac{a^k e^{-a}}{k!}. \quad (3)$$

Оценка максимального правдоподобия этого параметра – это значение параметра, дающее экстремальное значение

функции максимального правдоподобия. Логарифмическая функция правдоподобия

$$LogL(a) = \sum_{n=0}^{2^m-1} N_n Logp_n(\alpha) \qquad (4)$$

имеет оптимальное решение при том же значении параметра.

Сложность численного решения задачи максимизации можно определить следующим образом:

$$\hat{\alpha} = \arg_{\alpha \geq 0} \max L(\alpha). \qquad (5)$$

Для снижения сложности этой задачи возможно применение одношаговых оценок, которые являются результатом первой итерации определения максимального значения [10].

В системах технического зрения применяются матрицы светочувствительных элементов. Изображение представлено функцией распределения освещенности элементов сцены L(x,y). Если частота не более Найквиста, искажения появляются только за счет конечности апертуры. Сигнал L (i, j), считываемый с оптической матрицы, состоящей из N_x строк и N_y столбцов, представлен интегралами функции распределения освещенности по апертуре элемента, находящегося в строке i и столбце j матрицы. Выборка задается как суперпозиция функции распределения освещенности и функции апертур P (x, y, i, j):

$$L(i,j) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} L(x,y)P(x,y,i,j)dx,dy. \qquad (6)$$

Допустим идентичность элементов матрицы и прямоугольность их форм. Тогда функцию распределения освещенности можно описать как свертку с прямоугольной функцией. Такую свертку можно получить путем фильтрации нижних частот. При этом фильтрацию можно реализовать, умножив спектр изображения на sin (x)/x апертурной функции. Выборка изображения с детекторами с конечной апертурой эквивалентна выборке изображения с использованием набора дельта-функций Дирака с последовательно применяемым фильтром с импульсной характеристикой в соответствии с апертурной функцией детектора. Из-за фильтрации сигнал с частотой Найквиста не может быть разрешен, а верхняя частота среза значительно ниже, чем частота Найквиста. При заданном разрешении влияние апертуры приводит к необходимости увеличения числа светочувствительных элементов до двух раз от необходимого количества по критерию Найквиста.

Интерполяция может быть выполнена с использованием метода приближения атомарных функций. Целесообразность использования этого метода обусловлена одновременно его невысокой сложностью и отличными аппроксимационными свойствами.

В рамках метода предполагается применение атомарных функций fup(x). Эти функции являются симметричными, бесконечно дифференцируемыми, конечными, с sup = n + 2. Суммируя их

сдвиги, формируется полином, с порядком n. Интерполяция исходного сигнала, взятого из матрицы значений сигналов, состоящей из N_x строк и N_y столбцов, с использованием суммы сдвигов атомарных функций, описана с помощью выражения

$$P^{(m,0)}(x,y) = \\ = \sum_{j=0}^{2N_y-2} fup_{N_y-1}(\Delta yj) \sum_{k=0}^{2N_x-2-m} D_{k,j}^{m} fup_{N_x-1-m}(\Delta xk_m), \quad (7)$$

где $\Delta x_i = x - i + ((N_x - 1)/2)$, $\Delta y_j = y - j + ((N_y - 1)/2)$; D – массив коэффициентов интерполяционного полинома, которые вычисляются путем решения системы линейных уравнений (7). Первоначально в этой системе $D_{i,j}$ – неизвестные коэффициенты; $fup_n(\Delta xi)\cdot fup_n(\Delta yj)$ – известные коэффициенты; f(x,y) – набор данных из $N_x\cdot N_y$ значений пикселей цифрового изображения в виде постоянных членов. Количество коэффициентов равно $(2\cdot N_x - 2)\cdot(2\cdot N_y - 2)$.

Вычислим производную функцию.

$$P^{(m,0)}(x,y) = \\ = \sum_{j=0}^{2N_y-2} fup_{N_y-1}(\Delta yj) \sum_{k=0}^{2N_x-2-m} D_{k,j}^{m} fup_{N_x-1-m}(\Delta xk_m), \quad (8)$$

где $\Delta xkm = x - k + ((N_x - 1 - m)/2)$.

$$D_{k,j}^{m} = \sum_{i=0}^{m} C_m^i (-1)^i D_{k-i,j}, \quad (9)$$

где C_m^i – биномиальные коэффициенты; $D_{k-i,j}$ – коэффициенты полинома.

Вычислим интеграл функции

$$\iint_S f(x,y)dx,dy = \\ = \sum_{i=0}^{2N_y-2} \sum_{k=0}^{2N_x-2-m} D_{i,j} Iup_{Nx-1,Ny-1}(i,j), \quad (10)$$

где

$$Iup_{N_x-1,N_y-1}(i,j) = \\ = \iint_S fup_{N_x-1}(\Delta xi) fup_{N_y-1}(\Delta yi)dx,dy. \quad (11)$$

Возможно оценить спектр как следующую функцию, описывающую двумерное преобразование Фурье:

$$\hat{F}\{f(x,y)\} = \\ = \hat{F}\{D\}\cdot\hat{F}\left\{fup_{N_x-1}(x_1) fup_{N_y-1}(y_1)\right\}. \quad (12)$$

Информация об изображении, получаемая от светочувствительного сенсора, по сути представляет собой интегралы по площади элементов датчика (6). В связи с этим предлагается применение системы (10) для вычисления коэффициентов интерполяционного полинома, при этом величины L используются как постоянные члены, а Iup – как известные коэффициенты. Чтобы производные можно было приравнять к нулю, в указанную систему следует добавить уравнения типа (8), где постоянные члены следует приравнять к нулю. Гармоники спектра, которые превышают частоту Найквиста, будем также считать равными нулю (12) [11; 12; 13].

Примеры элементарных изображений на каждом шаге обработки при применении предлагаемого метода представлены на рисунке.

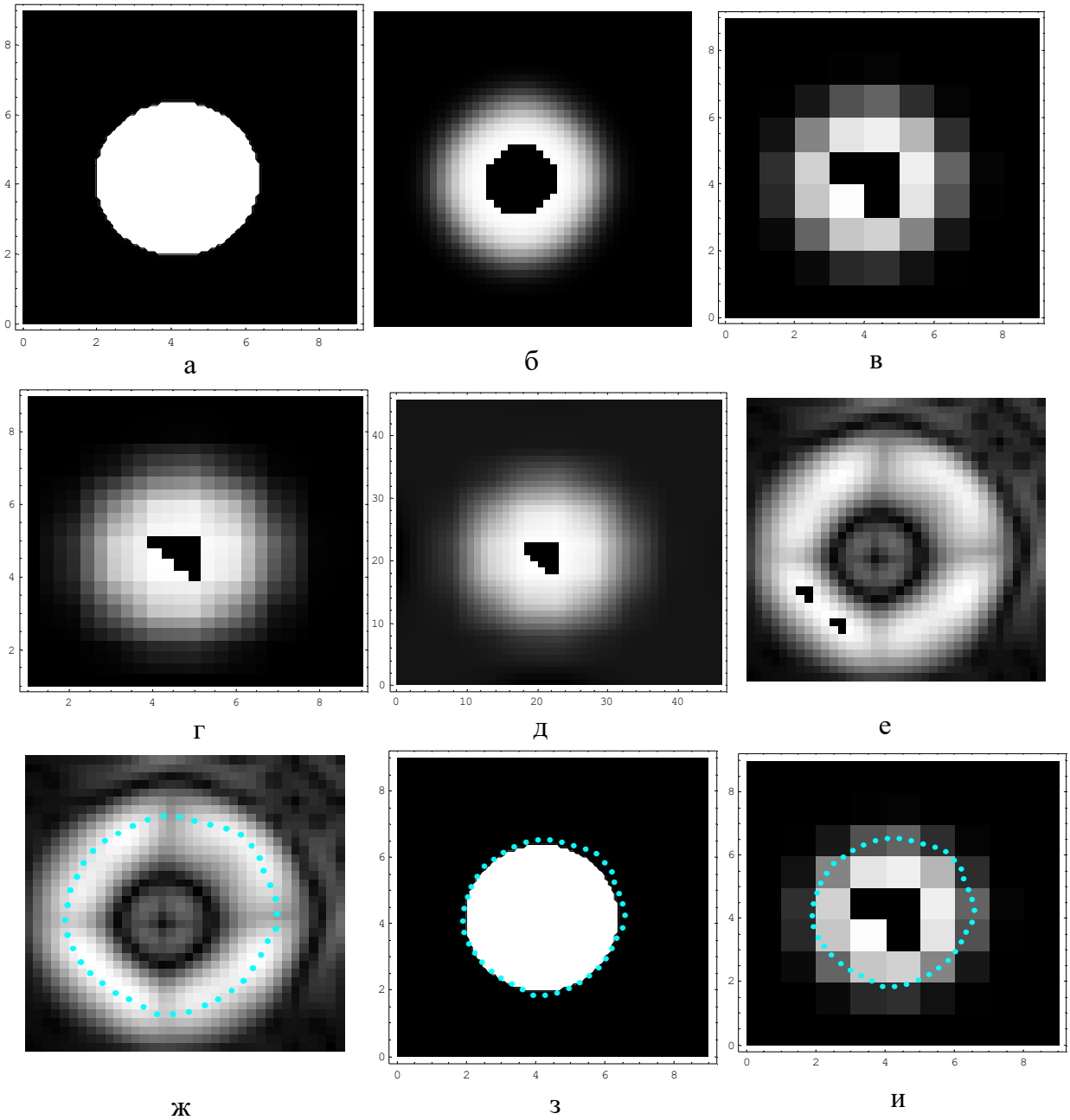


Рис. Примеры изображений: а – круг диаметром 4,5 пикселя; б – круг с искажениями, обусловленными оптической системой; в – профиль изображения на фотоприёмнике – дискретизованное изображение круга; г – билинейная интерполяция дискретизованного изображения; д – интерполяция атомарными функциями с учётом апертуры элементов; е – смешанная производная второго порядка, изображение интерполированно с помощью атомарных функций; ж – рассировка границы круга по максимуму смешанной производной; з – определённая граница на исходном неискажённом изображении; и – определённая граница на дискретизированном изображении

Fig. Examples of images: a – a circle with a diameter of 4,5 pixels; б – a circle with distortions caused by the optical system; в – Image profile on the photodetector – a sampled image of a circle; г – bilinear interpolation of the sampled image; д – interpolation by atomic functions taking into account the aperture of elements; e – mixed derivative of the second order, the image is interpolated using atomic functions; ж – the alignment of the circle boundary along the maximum of the mixed derivative; з – a certain boundary on the original undistorted image; и – a defined boundary on the discretized image

На рисунке представлены: исходное изображение круга диаметром 4,5 пикселя; круг с искажениями, обусловленными погрешностями оптической системы; дискретизированное изображение круга; дискретизированное изображение, подвергшееся билинейной интерполяции; дискретизированное изображение, подвергшееся интерполяции с помощью атомарных функций с учетом апертуры элементов; смешанная производная второго порядка для изображения, интерполированного атомарными функциями; трассировка границы круга по максимуму смешанной производной; определенные границы круга на исходном и дискретизированном изображениях.

Погрешность интерполяции с помощью атомарных функций для функции $C(N_x;\ N_y)$ имеет непрерывные частные производные порядка не более r + 1. Будем вычислять ее по формуле

$$\left\| f(x,y) - \varphi(x,y) \right\|_{C(N_x \cdot N_y)} \le$$
$$\le B \begin{pmatrix} h_x^{Nx} \max\limits_{x \ldots x' \in [1, N_x]\ |x - x'| < h_x} \left| \Delta\varphi_x^{(N_x)} \right| + \\ + h_y^{Ny} \max\limits_{y \ldots y' \in [1, N_y]\ |y - y'| < hy} \left| \Delta\varphi_y^{(N_y)} \right| \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где B не зависит от величин N, h, f, а значения элементов выражения вычисляются по следующим формулам:

$$\Delta\varphi_x^{(N_x)} = \frac{\partial^{(N_x)}(\varphi(x, \mathrm{y}) - \varphi(\mathrm{x}', \mathrm{y}))}{\partial x^{(N_x)}}, \quad (14)$$

$$\Delta\varphi_y^{(N_y)} = \frac{\partial^{(N_y)}(\varphi(x, \mathrm{y}) - \varphi(x, \mathrm{y}'))}{\partial y^{(N_y)}}. \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения эксперимента проводилось статистическое моделирование методов. При этом наблюдался критерий относительной погрешность измерения. В качестве исходных данных были взяты двадцать наборов из двадцати случайных значений. Случайные величины были распределены по Пуассону. Был выбран динамический диапазон от 0 до 100000, использовалось деление на 256 уровней, шкала деления — линейная.

Относительные погрешности при оценке параметра распределения Пуассона методом моментов и методом максимального правдоподобия по интервалу данных, полученные в ходе эксперимента, представлены в таблице 1. Результаты подтверждают то, что применение разработанного метода способно уменьшить относительную погрешность измерений более чем на треть. Сокращение максимальной относительной погрешности достигает приблизительно десяти процентов.

Для оценки ошибок интерполяции при применении различных методов двумерной интерполяции использованы следующие функции:

$$f_1 = e^{x+y}, \quad (16)$$

$$f_2 = 0{,}1 + \frac{\sin 10(x+y)}{12(x+y+1)}. \quad (17)$$

Для определения эффективности предложенного подхода интерполяция с использованием атомарных функций

была проведена двумя методами, использующими отличающиеся системы уравнений. Первый метод использовался для сравнения, он применял функции (7), (8). Второй метод (предлагаемый) – (8), (10), (12). В качестве входных значений применялись точные значения в точках интерполяции функций (16), (17), а также интегралы по прямоугольным областям [14; 15; 16; 17; 18; 19; 20].

Под точками интерполяции понимаются вершины квадратной сетки с размером стороны N, расположенные в единичном квадрате. Величина шага интерполяции определена как h = (1/ N). Количество узлов N варьируется от 3 до 11 (берутся нечетные значения). Ошибки в точках, которые не были заданы, были рассчитаны с шагом (h/ 5) по x и y. Значения, полученные в ходе проведенного эксперимента, отражены в таблице 2.

Таблица 1. Относительные погрешности при оценке параметра распределения Пуассона методом моментов (1) и методом максимального правдоподобия по интервалу данных (2)

Table 1. Relative errors in estimating the Poisson distribution rate parameter by the method of moments and the maximum likelihood method on interval data

Метод	Полученная относительная погрешность измерения			
	минимальное значение	максимальное значение	среднее значение	доверительный интервал – 90%
1	0,00000281	0,41004201	0,00886731	±0,00312631
2	0,00000051	0,37439101	0,00574821	±0,00238471

Таблица 2. Сравнение теоретических и экспериментальных оценок ошибок интерполяции f1 и f2 атомарными функциями на точных и интегрированных входных данных

Table 2. Comparison of theoretical and experimental estimates of interpolation errors f1 and f2 by atomic functions on exact and integrated input data

		Стандартное отклонение		
		оценка по (13)	интерполяция по точным значениям	интерполяция по предложенному методу
f_1	3	2,165341E-01	3,707471E-02	2,679321E-01
	5	1,047011E-03	1,723081E-04	6,567581E-03
	7	2,755661E-06	5,589501E-06	8,966231E-05
	9	3,110001E-09	7,936291E-09	7,566541E-07
	11	4,827501E-12	6,028591E-11	4,545611E-09
f_2	3	6,442111E-01	6,694161E-02	3,540561E-02
	5	4,615741E-01	7,645171E-02	4,013081E-02
	7	1,330871E-01	1,536471E-02	9,009091E-03
	9	2,201441E-02	2,963111E-03	1,499431E-03
	11	2,722921E-03	3,331071E-04	1,571491E-04

В целом результаты эксперимента согласуются с теоретическими расчетами.

Если продолжаать увеличивать количество точек, это приведет к существенному увеличению погрешности.

Выводы

В статье описываются методы приближения дискретизированного и квантованного изображения к исходному непрерывному оптическому сигналу. На первом этапе работы метода производится набор данных из последовательности кадров. На основе собранных данных определяется наилучшая оценка (по среднеквадратическому отклонению) интегральной освещенности каждого элемента светочувствительной матрицы, для чего используется метод максимального правдоподобия. На следующем этапе по полученным на предыдущем этапе оценкам формируется интерполяционный полином. Таким образом, изображение, полученное с выходов оптической системы с разрешением N_x по вертикали на N_y по горизонтали и подвергшееся квантованию на 2m уровня с помощью АЦП, который имеет m разрядов, представляется в цифровом компьютере набором данных из $((2 \cdot Nx - 2) \cdot (2 \cdot Ny - 2))$ коэффициентов интерполяционного полинома.

Предложенный метод предполагает извлечение дополнительной информации из имеющегося сигнала с учетом особенностей использующейся оптической системы. Поэтому метод позволяет достичь более точное приближение к оригинальному аналоговому оптическому изображению и улучшить соответственно, качество его обработки. Таким образом, улучшение достигается при паритете аппаратных затрат, если этот критерий значим, т. е. если определен необходимый уровень точности, возможно приобретение более экономически выгодных аппаратных средств. Также метод может быть использован для повышения качества изображения без увеличения производительности, а с использованием уже имеющегося оборудования. Метод может применяться в различных системах обработки изображений.

Список литературы

1. Li H., Chen S. A new CMTF evaluation model for dynamic target in photoelectric imaging system // IEEE Sens. J. 2017. Vol. 17, P. 6571-6577.

2. Gove R. J. Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensors for mobile devices // High Performance Silicon Imaging / ed. by D. Durini. Elsevier, 2014. P. 191234.

3. Senten P. Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) and charge coupled device (CCD) image sensors in high-definition TV // High Performance Silicon Imaging / ed. by D. Durini. Elsevier, 2014. P. 373-410.

4. A 10.5-b ENOB 645 nW 100kS/s SAR ADC with statistical estimation based noise reduction / L. Chen, X. Tang, A. Sanyal, Y. Yoon, J. Cong, N. Sun // Custom Integr. Circuit Conf. (CICC), 2015. P. 1–4.

5. Chopade P. B., Patil P. M. Single and multi frame image super-resolution and its performance analysis: a comprehensive survey // Int. J. Comput. Appl. 2015. Vol. 111, no. 15.

6. Fahmy M. F., Fahmy G. Exponential spline perfect reconstruction decomposition with applications in compression and de-noising // J. of Signal, Image and Video Process. 2014. Vol. 8, is. 6. P. 1111–1120.

7. Efremov V., Efremova I., Malyshev A. Reconstruction of Continuous Image Using Maximum Likelihood Estimates from Grouped Data for Measuring Light Intensity and Interpolation by Atomic Functions According to Aperture of Photosensitive Element of Sensor (2019) // Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon. P. 8867662.

8. A 0.7-V 0.6- μW 100kS/s low-power SAR ADC with statistical estimationbased noise reduction / L. Chen, X. Tang, A. Sanyal, Y. Yoon, J. Cong, N. Sun // J. IEEE Solid-State Circuits. 2017. Vol. 52, no. 5, pp. 1388–1398.

9. Орлов А. И. Основные черты новой парадигмы математической статистики // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 90 (10). С. 45-71.

10. Орлов А. И. Оценивание параметров: одношаговые оценки предпочтительней оценок максимального правдоподобия // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 109(5). С. 208-237.

11. Ефремов В. В., Ефремова И. Н. О способах цифровой обработки изображений для снижения потерь от дискретизации и квантования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 2. С. 52-60.

12. Ефремов В. В., Ефремова И. Н. О представлении непрерывного оптического изображения в цифровом компьютере // Математические методы и инновационные научно-технические разработки: сборник статей / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. С. 82-88.

13. Ефремов В. В., Ефремова И. Н., Емельянова Н. Н. К вопросу автоматизации микробиологических исследований // Научный альманах. 2016. № 4-3 (18). С. 320-323.

14. Буторин В. М., Ефремов В. В., Ефремова И. Н. О представлении непрерывного оптического изображения в цифровом компьютере // Научные ведомости Белгородского государстенного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2012. Т. 23, № 13-1. С. 210-215.

15. Ефремов В. В., Ефремова И. Н., Емельянова Н. А. О методах цифровой обработки информации в медицине // Наука и образование в жизни современного общества: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Тамбов, 2015. Т. 7. С. 57-59.

16. Углицкий Я. Г., Киреев И. А., Ефремова И. Н. Роль информационных технологий в производстве современной одежды и аксессуаров // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2020): сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-летию создания кафедры программной инженерии. Курск: Университетская книга, 2020. С. 83-86.

17. Analysis and classification of x-ray images on the basis of intelligent agents in distributed systems / R. A. Tomakova, I. S. Egorov, M. V. Tomakov, N. A. Korsynskiy // Journal of Physics: Conference Series. International scientific conference artificial intelligence and digital technologies in technical systems. Volgograd, 2020. Vol. 1801. P. 012042.

18. Automated analysis of x-ray images using transparency marks / A. R. Dabagov, R. A. Tomakova, V. A. Alekseev, D. S. Kondrashov // Journal of physics: Conference Series. International conference on high-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production, HPCST 2020. St. Petersburg, 2020. P. 012011.

19. Classification of multichannel images based on cellular processes / R. A. Tomakova, S. A. Filist, A. I. Pykhtin, S. V. Ostrotskaia // 19th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019. Conference Proceedings. Sofia, 2019. P. 145-152.

20. Hybrid intelligent models for chest x-ray image segmentation / S. A. Filist, R. A. Tomakova, S. V. Degtyarev, A. F. Rybochkin // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 51, no. 5. P. 358-363.

References

1. Li H., Chen S. A new CMTF evaluation model for dynamic target in photoelectric imaging system. *IEEE Sens. J.*, 2017, vol. 17, pp. 6571-6577.

2. Gove R. J. Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensors for mobile devices. High Performance Silicon Imaging; ed. by D. Durini. Elsevier, 2014, p. 191234.

3. Senten P. Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) and charge coupled device (CCD) image sensors in high-definition TV imaging. High Performance Silicon Imaging; ed. by D. Durini. Elsevier, 2014, pp. 373-410.

4. Chen L., Tang X., Sanyal A., Yoon Y., Cong J., Sun N. A 10.5-b ENOB 645 nW 100kS/s SAR ADC with statistical estimation based noise reduction. Proc. Custom Integr. Circuit Conf. (CICC), 2015, pp. 1–4.

5. Chopade P. B., Patil P. M. Single and multi frame image super-resolution and its performance analysis: a comprehensive survey. *Int. J. Comput. Appl.,* 2015, vol. 111, no. 15.

6. Fahmy M. F., Fahmy G. Exponential spline perfect reconstruction decomposition with applications in compression and de-noising. *J. of Signal*, *Image and Video Process*., 2014, vol. 8, is. 6, pp. 1111-1120.

7. Efremov V., Efremova I., Malyshev A. Reconstruction of Continuous Image Using Maximum Likelihood Estimates from Grouped Data for Measuring Light Intensity and Interpolation by Atomic Functions According to Aperture of Photosensitive Element of Sensor (2019). Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon, p. 8867662.

8. Chen L., Tang X., Sanyal A., Yoon Y., Cong J., Sun N. A 0.7-V 0.6- μW 100kS/s low-power SAR ADC with statistical estimationbased noise reduction. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 1388-1398.

9. Orlov A. I. Osnovnye cherty novoi paradigmy matematicheskoi statistiki [Basic ideas of interval data statistics]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudar-stvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*, 2013, no. 94(10), pp. 55-70.

10. Orlov A. I. Otsenivanie parametrov: odnoshagovye otsenki predpochtitel'-nei otsenok maksimal'nogo pravdopodobiya [Parameters estimation: one-step estimators are more preferable than maximum likelihood estimators]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*, 2015, no. 109(5), pp. 208-237.

11. Efremov V. V., Efremova I. N. O sposobakh tsifrovoi obrabotki izobrazhenii dlya snizheniya poter' ot diskretizatsii i kvantovaniya [About the methods of digital imaging for losses due sampling and quantization reduction]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2014, no. 2, pp. 52-60.

12. Efremov V. V., Efremova I. N. [On the representation of a continuous optical image in a digital computer]. Matematicheskie metody i innovatsionnye nauchno-tekhnicheskie razrabotki. Sbornik statei [Continuous optical image presentation in a digital computer. Mathematical methods and innovative scientific and technical developments. Collection of articles]. Kursk, Southwest State University Publ., 2014, pp. 82-88. (In Russ.)

13. Efremov V. V., Efremova I. N., Emelyanova N. A. K voprosu avtomatizatsii mikrobiologicheskikh issledovanii [About of automation of microbiological research]. *Nauchnyi al'manakh = Scientific Almanac*, 2016, no. 4-3 (18), pp. 320-323.

14. Butorin V. V., Efremov V. V., Efremova I. N. O predstavlenii nepreryvno-go optich-eskogo izobrazheniya v tsifrovom komp'yutere [Continuous optical image presentation in a digital computer]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika = Scientific Bulletin of the Belarusian State University. Series: Economics. Computer Science*, 2012, vol. 23, no. 13-1, pp. 210-215.

15. Efremov V. V., Efremova I. N., Emelyanova N. A. [About methods of digital information processing in medicine]. Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshche-stva. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Science and education in the life of modern society. Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2015, vol. 7, pp. 57-59. (In Russ.)

16. Uglickiy Y. G., Kireev I. A., Efremova I. N. [The role of information technology in the production of modern clothing and accessories]. Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya (PI-2020). Sbornik materialov IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 30-letiyu sozdaniya kafedry programmnoi inzhenerii [Software Engineering: Modern Trends in Development and Application (PI-2020). Materials of the IV Russian scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the creation of the Software Engineering Department]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 83-86. (In Russ.)

17. Tomakova R. A., Egorov I. S., Tomakov M. V., Korsynskiy N. A. Analysis and classification of x-ray images on the basis of intelligent agents in distributed systems. Journal of physics: Conference series. International scientific conference artificial intelligence and digital technologies in technical systems 2020, aidtts 2020. Volgograd, 2021, vol. 1801, p. 012042.

18. Dabagov A. R., Tomakova R. A., Alekseev V. A., Kondrashov D. S. Automated analysis of x-ray images using transparency marks. Journal of Physics: Conference Series. International conference on high-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production, HPCST 2020. St. Petersburg, 2020, p. 012011.

19. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I., Ostrotskaia S. V. Classification of multichannel images based on cellular processes. 19th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019. Conference Proceedings. Sofia, 2019, pp. 145-152.

20. Filist S. A., Tomakova R. A., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F. Hybrid intelligent models for chest x-ray image segmentation. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 358-363.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Ефремов Владислав Владиславович, заведующий лабораториями кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: v2@bk.ru,
ORCID: 0000-0001-6312-8691

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

Vladislav V. Efremov, Head of Laboratories of the Department of Program Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: v2@bk.ru,
ORCID: 0000-0001-6312-8691

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-99-110

CC BY 4.0

Применение CUDA и тензорных ядер в задачах обнаружения и распознавания объектов

С. В. Дегтерев[1] ✉, Т. И. Лапина[1], Ю. А. Криушина[1], Е. А. Криушин[1]

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

✉ e-mail: sergeyd12@gmail.com

Резюме

Цель – *исследование способа ускорения процессов распознавания объектов на изображениях, при помощи аппаратных видеоускорителей, имеющих в своём составе ядра CUDA и TENSOR.*

Методы. *Использован метод программного взаимодействия с аппаратными вычислительными средствами видеоускорителя, обладающего ядрами CUDA и RT, при помощи языка программирования Python; контейнеры Docker из NVIDIA GPU Cloud (NGC), OpenCV для запуска канала с камеры и TensorRT для ускорения вывода потока данных, сеть обнаружения одиночных выстрелов с InceptionV2 в качестве магистрали. Для исследования производительности и ускорения процессов распознавания проектируется среда, взаимодействующая с оборудованием и рядом библиотек для рендеринга изображений. Внутри данной среды происходят процессы распознавания объектов, применяя различные вычислительные ядра CUDA и TENSOR, а также различные алгоритмы и классы точности.*

Результаты. *Применение ядер TENSOR ускоряет процесс распознавания при использовании точности FP16, а также при применении комбинированной точности FP16 и FP32. Одиночная точность INT8 показывает значительно большую производительность при применении TensorRT на ускорителе, имеющем ядра TENSOR.*

Заключение. *Исследованы возможности аппаратных видеоускорителей при применении их для задач распознавания объектов. Проведено исследование производительности ядер CUDA и TENSOR при их взаимодействии с движком TensorRT. Предложено программное решение взаимодействия видеоускорителей, имеющих в своём составе ядра CUDA и TENSOR с движком TensorRT. Данное решение демонстрирует высокие показатели скорости распознавания объектов при точности INT8 и чуть меньшую производительностью при использовании точности FP32.*

Ключевые слова: *искусственный интеллект; FP16; GPU; логический вывод; INT8; Single Shot Detection; машинное обучение; NGC; распознавание объектов; тензорные ядра; TensorRT.*

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

Для цитирования: Применение CUDA и тензорных ядер в задачах обнаружения и распознавания объектов / С. В. Дегтерев, Т. И. Лапина, Ю. А. Криушина, Е. А. Криушин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 99–110. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-99-110.

Поступила в редакцию 17.01.2022 *Подписана в печать 15.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

© Дегтерев С. В., Лапина Т. И., Криушина Ю. А., Криушин Е. А., 2022

Application of CUDA and Tensor Kernels in Object Detection and Recognition Problems

Sergey V. Degterev[1] ✉, Tatyana I. Lapina[1], Yulia A. Kriushina[1], Evgeniy A. Kriushin[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: sergeyd12@gmail.com

Abstract

The purpose of research *is to study a way to accelerate the processes of object recognition in images using hardware video accelerators, which include kernels CUDA and TENSOR.*

Methods. *The method of software interaction with hardware computing means of a video accelerator with CUDA and RT cores using the Python programming language was used; Docker containers from NVIDIA GPU Cloud (NGC), OpenCV to run the feed from the camera and TensorRT to speed up the output of the data stream, the single shot detection network with InceptionV2 as the backbone. To investigate the performance and accelerate the recognition processes, an environment is designed that interacts with equipment and a number of libraries for rendering images. Within this environment, object recognition processes take place, using various computing cores CUDA and TENSOR, as well as various algorithms and accuracy classes.*

Results*. The use of TENSOR kernels accelerates the recognition process when using FP16 accuracy, as well as when using the combined FP16 and FP32 accuracy. Using single precision INT8 shows significantly better performance when using TensorRT on an accelerator with TENSOR cores.*

Conclusion. *The capabilities of hardware video accelerators have been investigated when they are used for object recognition tasks. A study of the performance of the CUDA and TENSOR kernels when interacting with the TensorRT engine has been carried out. A software solution for the interaction of video accelerators with CUDA and TENSOR cores with the TensorRT engine is proposed. This solution demonstrates high rates of object recognition speed with INT8 accuracy and slightly lower performance when using FP32 accuracy.*

Keywords: *artificial Intelligence; FP16; GPU; inference; INT8; Single Shot Detection4 machine learning; NGC; object recognition; Tensor cores; TensorRT.*

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

For citation: Degterev S. V., Lapina T. I., Kriushina Yu. A., Kriushin E. A. Application of CUDA and Tensor Kernels in Object Detection and Recognition Problems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 99–110. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-99-110.

Received 17.01.2022 *Accepted 15.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

Распознавание объектов является актуальным направлением, которое охватывает большое количество областей применения – от распознавания лиц на фотографиях до автономного вождения. Данный процесс требует больших вычислительных мощностей от систем, с помощью которых оно производится. Приложения для обнаружения объектов

требуют существенной подготовки с использованием обширного набора данных для достижения высокого уровня точности. Графические процессоры NVIDIA отличаются производительностью параллельных вычислений, необходимой для обучения больших нейронных сетей, которые генерируют наборы данных для обнаружения и распознавания объектов. В современном GPU содержится порядка 2500 – 5000 ALU на процессоре, что делает возможным выполнение тысяч умножений и сложений одновременно. На сегодняшний день GPU является наиболее популярной архитектурой процессоров для глубинного обучения. Но GPU всё равно остаётся процессором общего назначения, который должен поддерживать миллион различных приложений и ПО. Ядра CUDA, входящие в состав видеоускорителя, используются в различных областях, включая обработку видео и изображений, вычислительную биологию и химию, моделирование динамики жидкостей, восстановление изображений, полученных путем компьютерной томографии, сейсмический анализ, трассировку лучей и многое другое. Тензорные ядра NVIDIA, с недавнего времени включаемые в видеоускорители серии RTX, позволяют выполнять операции различной точности: TF32, FP16, INT8 и INT4, обеспечивая исключительную универсальность и производительность.

Однако при всей мощности аппаратуры многое зависит от программного обеспечения. Алгоритмы распознавания образов базируются чаще всего на обученных нейронных сетях. Также существует масса библиотек, позволяющих задействовать аппаратные ресурсы для тех или иных задач с максимальной производительностью.

Материалы и методы

В рамках данной статьи для распознавания объектов будет использован язык программирования Python. Некоторые из используемых программных инструментов включают контейнеры Docker из NVIDIA GPU Cloud (NGC), OpenCV для запуска канала с камеры и TensorRT для ускорения вывода потока данных, сеть обнаружения одиночных выстрелов с InceptionV2 в качестве магистрали. Понадобится также обладающая ядрами CUDA и RT видеокарта, подключенная к машине (компьютеру) [1; 2; 3].

Для использования контейнера Docker, управляющего средой, предоставлен доступ ко всему оборудованию на главной машине (компьютере). Большая часть обрабатывается автоматически Docker, за исключением веб-камеры, которая добавлена вручную. Также установлено разрешение для Docker с целью доступа к X11, который используется для открытия графического интерфейса для веб-камеры, при помощи переменных среды путем установки разрешений (рис. 1), которые передаются в контейнер во время выполнения команды docker run.

```
xhost +local:docker
XSOCK=/ztr/.X11-unix
XAUTH=/ztr/.docker.xauth
xauth nlist $DISPLAY | sed -e 's/^..../ffff/' |
xauth -f $XAUTH nmerge -
```

Рис. 1. Установка разрешения для Docker

Fig. 1. Setting permission for Docker

Также загружен набор данных PASCAL VOC для калибровки INT8.

Dockerfile содержит следующие компоненты:

1) TensorRT и необходимые библиотеки;

2) программное обеспечение TensorRT;

3) другие зависимости для приложения.

Контейнер содержит необходимые библиотеки, такие как CUDA, cuDNN и NCCL. Объединены несколько других библиотек и пакетов в дополнение к TensorRT, являющие собой пользовательский Dockerfile с контейнером TensorRT в качестве базового образа [4].

Клонирование репозитория TensorRT github требует последующего создания компонентов с помощью cmake и замены существующих версий этих компонентов в контейнере TensorRT новыми версиями: приложения TensorRT ищут основную библиотеку TensorRT, парсеры и плагины по этому пути. Установлены другие зависимости, которые нужны для приложения, представляющего собой OpenCV и его библиотеки рендеринга. OpenCV – это библиотека компьютерного зрения, которая используется для взаимодействия с веб-камерой [5; 6].

Команда *docker build -t object_detection_webcam* собирает все компоненты в файл Dockerfile.

Запуск контейнера открывает новую среду разработки. В этой среде задаётся время выполнения nvidia tolet Docker know, после чего монтируется репозиторий GitHub в контейнер Docker для доступа к коду внутри. Последним этапом передаётся информации о взаимодействии с веб-камерой (рис. 2) через последующее монтирование и переменные среды [7; 8].

```
docker run --runtime=nvidia -it -v `pwd`/:/mnt --device=/dev/video0 -e
DISPLAY=$DISPLAY -v $XSOCK:$XSOCK -v $XAUTH:$XAUTH -e XAUTHORITY=$XAUTH
```

Рис. 2. Передача информации о взаимодействии с веб-камерой

Fig. 2. Transferring information about the interaction with the webcam

Диаграмма работы detect_objects_webcam.py представлена на рисунке 3. Данная диаграмма иллюстрирует этапы создания и саму работу движка TensorRT.

Первый шаг – загрузка статичной модели обнаружения объектов SSD (рис. 4) из набора моделей TensorFlow.

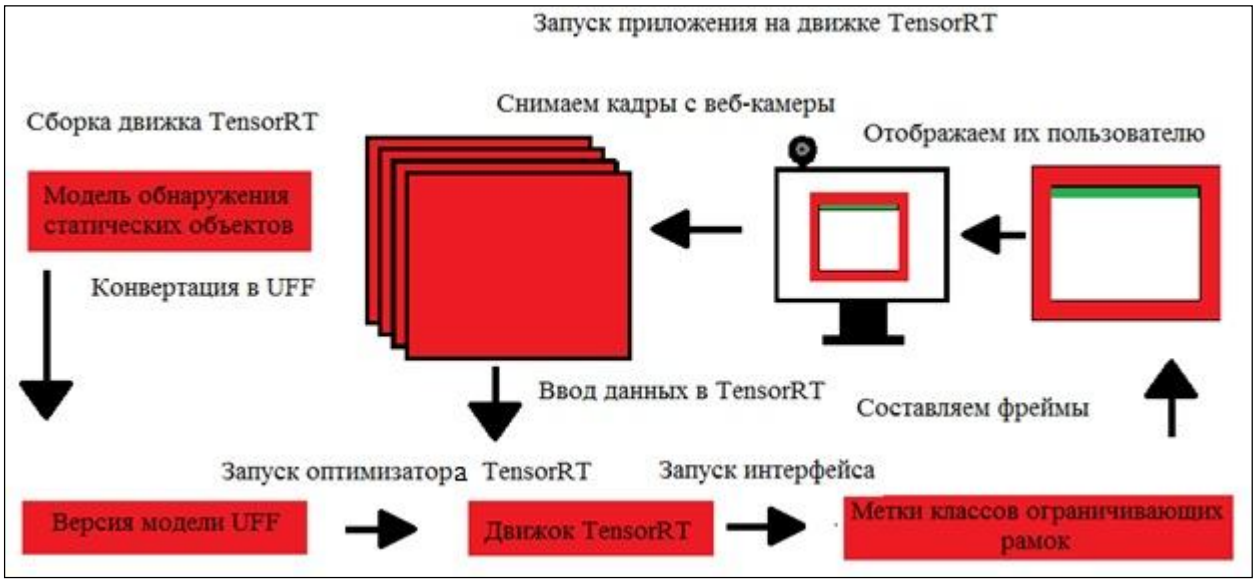


Рис. 3. Этапы рабочего процесса от создания движка TensorRT до его подключения к приложению

Fig. 3. Stages of the workflow from creating the TensorRT engine to connecting it to the application

```
def prepare_ssd_model(model_name="ssd_inception_v2_coco_2020_12_17", silent=False):
if model_name != "ssd_inception_v2_coco_2020_12_17":
raise NotImplementedError(
"Model {} is not supported yet".format(model_name))
download_model(model_name, silent)
ssd_pb_path = PATHS.get_model_pb_path(model_name)
ssd_uff_path = PATHS.get_model_uff_path(model_name)
model_to_uff(ssd_pb_path, ssd_uff_path, silent)
```

Рис. 4. Загрузка статичной модели обнаружения объектов SSD

Fig. 4. Loading a static SSD object detection model

Следующими шагами являются оптимизация этой модели для вывода и создание среды выполнения, которая осуществляется на графическом процессоре [4; 9; 10]. Для этого используются TensorRT, оптимизатор глубокого обучения и движок времени выполнения. TensorRT генерирует время выполнения из данного приложения для каждого графического процессора NVIDIA. Необходимо, чтобы приложение обеспечивало наименьшую задержку, возможную для выполнения вывода в режиме реального времени. Преобразован статичный график TensorFlow в универсальный фор-

мат фреймворка (UFF) с помощью утилиты, доступной в model.py. Импортирован модель UFF в TensorRT с помощью парсера, применяя оптимизацию и генерируя механизм выполнения [9; 11; 12]. Оптимизации применяются автоматически во время процесса сборки.

Для построения runtime engine должны быть указаны 4 параметра:

1) путь к файлу UFF для модели;

2) точность для механизма вывода (FP32, FP16 или INT8);

3) набор данных калибровки (необходим только в случае применения INT8);

4) размер партии, используемый при выводе.

Вывод с более низкой точностью (FP16 и INT8) увеличивает пропускную способность и обеспечивает меньшую задержку [13]. Использование точности FP16 обеспечивает в несколько раз более высокую производительность на тензорных ядрах, чем FP32, практически без снижения точности модели. Вывод в INT8 может привести к дальнейшему повышению производительности при снижении точности модели менее чем на 1%. TensorRT выбирает ядра из FP32 и любую точность, которая допускается задачей. После включения точности FP16 TensorRT выбирает ядра как из точности FP16, так и из точности FP32. Чтобы использовать точность FP16 и INT8, необходимо включить и FP16 и FP32 с целью получения максимально возможной производительности [13; 14; 15].

Калибровка производится для определения динамических диапазонов тензоров на графике для эффективного использования ограниченного диапазона точности INT8. Последний параметр, размер пакета, применяется с целью выбора наилучших ядер для рабочей нагрузки вывода. Важно отметить, что TensorRT автоматически обнаруживает любое специализированное оборудование, установленное в графический процессор; поэтому если графический процессор имеет тензорные ядра, он автоматически обнаружит их и запустит ядра FP16 на этих тензорных ядрах.

Результаты и их обсуждение

Приложение выполняет вывод в несколько раз быстрее при использовании TensorRT на графических процессорах по сравнению с выводом фреймворка. Используя одинарную точность (FP32) для вывода, где каждое число представлено 32 битами, операцию можно произвести существенно быстрее. Использовалась одинарная точность (FP32) для вывода, где каждое число представлено 32 битами. В FP32 значения активации могут лежать в диапазоне +/- 3,4 × 1038 и требуют 32 бита для хранения каждого числа. Большие числа требуют значительно большего объема памяти для выполнения, что ведет к снижению производительности. Использование моделей и методов, предоставленных NVIDIA, позволяет получить максимально воз-

можную производительность с точностью INT8 для вывода. Однако стоит отметить значительно более низкий динамический диапазон, представленный с точностью INT8 в таблице.

Таблица. Динамический диапазон значений, которые могут быть представлены с точностью FP32, FP16 и INT8

Table. Dynamic range of values that can be represented with FP32, FP16 and INT8 precision

Точность	Динамический диапазон	Минимальное положительное значение
FP32	$-3{,}4\cdot10^{38} \sim +3{,}4\cdot10^{38}$	$1{,}4\cdot10^{-45}$
FP16	–65,504 ~ +65,504	$5{,}96\cdot10^{-8}$
INT8	–128 ~ +127	1

Использование точности INT8 для получения точности, аналогичной выводу FP32, означает выполнение дополнительного шага, называемого калибровкой. Во время калибровки выполняется вывод по обучающим данным, подобный окончательному набору данных, идет сбор диапазонов для значений активации [13; 116; 17; 18; 19; 20]. Затем Tensor вычисляет масштабирующий коэффициент для распределения диапазона значений INT8 по этому диапазону значений активации для каждого узла. Рисунок 5 иллюстрирует, что если диапазон активации для узла находится между –6 и +6, необходимо, чтобы 256 значений, которые могут быть представлены с помощью INT8, охватывали только этот диапазон.

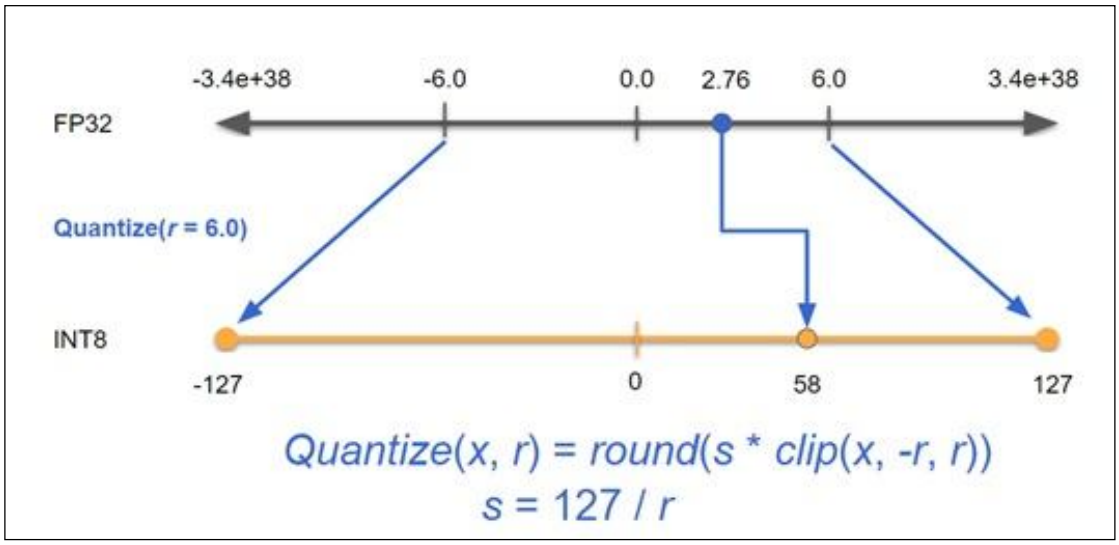


Рис. 5. Калибровка и квантование – шаги преобразования в точность INT8

Fig. 5. Calibration and quantization – conversion steps to INT8 precision

Команда *python detect_objects_ webcam-p 8* перестраивает движок TensorRT для использования INT8 с целью обеспечения точности в приложении, осуществляет калибровку и выполняет логический вывод.

В итоге получен результат с более высокой производительностью, чем достигнутый ранее с точностью FP32. Условный блок включает различные режимы построения в зависимости от точности, включенной для вывода. TensorRT всегда по умолчанию выбирает ядра FP32. Включение режима FP16 означает, что он также пробует ядра, работающие с точностью FP16; то же самое и с INT8. Однако использование ядер с более низкой точностью не означает, что они всегда будут превосходить по производительности ядра с более высокой точностью. Так, даже если будет установлен режим точности на INT8, некоторые ядра FP16 или FP32, работающие быстрее, могут по-прежнему существовать; TensorRT автоматически выбирает лучшие оптимизации. TensorRT обнаруживает наличие специализированного оборудования, такого как тензорные ядра, и будет использовать на них ядра FP16, чтобы получить максимально возможную производительность. Способность TensorRT автоматически выбирать лучшие ядра называется автонастройкой ядра. Это позволяет использовать TensorRT в самых разных приложениях, обеспечивая при этом высокую производительность.

Выводы

Приложение на языке Python берет кадры из прямого видеопотока и выполняет распознавание объектов на графических процессорах. Используется предварительно обученная модель Single Shot Detection (SSD) с Inception V2, а также применяется оптимизация TensorRT и генерируется среда выполнения для графического процессора, благодаря чему осуществляется логический вывод для видеопотока с целью получения меток и ограничивающих областей (прямоугольной формы). Результатом работы приложения являются фреймы (кадры), модифицированные метками классов и имеющие ограничивающие области на искомых объектах. Результирующий видеопоток имеет наложенные на него предсказания ограничивающих прямоугольников из сети обнаружения объектов. Данный подход можно распространить и на другие задачи, такие как классификация и сегментация.

Список литературы

1. Информационные технологии и вычислительные системы. Вычислительные системы. Компьютерная графика. Распознавание образов. Математическое моделирование / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 100 с.

2. Математические модели социально-экономических процессов. Моделирование характеристик деятельности отраслевых и региональных подсистем. Динамические системы. Математические проблемы динамики неоднородных систем. Информационные технологии: труды ИСА РАН / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 112 с.

3. Гендерная классификация по изображению лица / Л. А. Шмаглит, М. Н. Голубев, А. Н. Ганин, В. В. Хрящев // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2012): доклады XIV Международной конференции. М., 2012. Т. 2. С. 425.

4. Елисеева И. И., Рукавишников В. О. Группировка, корреляция, распознавание образов (статистические методы классификации и измерения связей). М.: РГГУ, 2014. 144 с.

5. Бойко И. А., Гурьянов Р. А. Распознавание объектов на основе видеосигнала, полученного с камеры, установленной на подвижной платформе // Молодой ученый. 2013. № 6 (53). С. 34-36.

6. Работягов А. Основы распознавания образов. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 273 с.

7. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 2013. 368 с.

8. Системное моделирование. Наукометрия и управление наукой. Распознавание образов: труды ИСА РАН / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 104 с.

9. Дударев В. А. Методы распознавания образов в компьютерном конструировании неорганических соединений. М.: Синергия, 2014. 325 с.

10. Емельянов С. В. Информационные технологии и вычислительные системы. Вычислительные системы. Компьютерная графика. Распознавание образов. Математическое моделирование / под ред. С. В. Емельянова. М.: Мир, 2015. Вып. 2. 662 с.

11. Миленький А. В. Классификация сигналов в условиях неопределенности. Статистические методы самообучения в распознавании образов. М.: Советское радио, 2017. 328 с.

12. Алгоритмы распознавания объектов / А. А. Цветков, Д. К. Шорох, М. Г. Зубарева [и др.]. // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2016 г.). СПб.: Свое издательство, 2016. С. 20-28.

13. Автоматическое управление и вычислительная техника. Распознавание образов. М.: Машиностроение, 2016. Вып. 10. 256 с.

14. Информационные технологии и вычислительные системы. Вычислительные системы. Математическое моделирование. Распознавание образов. Прикладные аспекты информатики / под ред. С. В. Емельянова. М.: Высшая школа, 2014. Вып. 3. 160 с.

15. Гренандер У. Лекции по теории образов. М.: Мир, 2014. Т. 1. 571 с.

16. Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы / под ред. А. В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. 112 с.

17. Потапов А. Автоматический анализ изображений и распознавание. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2017. 292 с.

18. Гренандер У. Лекции по теории образов. М.: Мир, 2014. Т. 2. 342 с.

19. Гренандер У. Лекции по теории образов. М.: Мир, 2014. Т. 3. 432 с.

20. Информационные технологии и вычислительные системы. Обработка информации и анализ данных. Программная инженерия. Математическое моделирование. Прикладные аспекты информатики / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 104 с.

References

1. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Vychislitel'nye sistemy. Komp'yuternaya grafika. Raspoznavanie obrazov. Matematicheskoe modelirovanie [Information technology and computing systems. Computing systems. Computer graphics. Pattern recognition. Mathematical modeling]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 100 p.

2. Matematicheskie modeli sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov. Modelirovanie kharakteristik deyatel'nosti otraslevykh i regional'nykh podsistem. Dinamicheskie sistemy. Matematicheskie problemy dinamiki neodnorodnykh sistem. Informatsionnye tekhnologii. Trudy ISA RAN [Proceedings of ISA RAS. Mathematical models of socio-economic processes. Modeling the performance characteristics of sectoral and regional subsystems. Dynamical systems. Mathematical problems of the dynamics of inhomogeneous systems. Information technologies]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 112 p.

3. Shmaglit L. A., Golubev M. N., Ganin A. N., Khryashchev V. V. [Gender classification by facial image]. Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie (DSPA-2012). Doklady 14 Mezhdunarodnoi konferentsii [Digital signal processing and its application. Reports of the XIV International Conference (DSPA-2012)]. Moscow, 2012, vol. 2, p. 425. (In Russ.)

4. Eliseeva I. I., Rukavishnikov V. O. Gruppirovka, korrelyatsiya, raspoznavanie obrazov (statisticheskie metody klassifikatsii i izmereniya svyazei) [Grouping, correlation, pattern recognition (statistical methods of classification and measurement of connections)]. Moscow, RGGU Publ., 2014. 144 p.

5. Boyko I. A., Guryanov R. A. Raspoznavanie ob"ektov na osnove videosignala, poluchennogo s kamery, ustanovlennoi na podvizhnoi platforme [Object recognition based on the video signal received from a camera installed on a mobile platform]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist,* 2013, no. 6 (53), pp. 34-36.

6. Rabotyagov A. Osnovy raspoznavaniya obrazov [Fundamentals of pattern recognition]. Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 273 p.

7. Fukunaga K. Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov [Introduction to the statistical theory of pattern recognition]. Moscow, Nauka Publ., 2013. 368 p.

8. Sistemnoe modelirovanie. Naukometriya i upravlenie naukoi. Raspoznavanie obrazov. Trudy ISA RAN [Proceedings of ISA RAS: System modeling. Scientometrics and Science Management. Pattern Recognition]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 104 p.

9. Dudarev V. A. Metody raspoznavaniya obrazov v komp'yuternom konstruirovanii neorganicheskikh soedinenii [Methods of pattern recognition in computer design of inorganic compounds. Dudarev]. Moscow, Synergy Publ., 2014. 325 p.

10. Emelyanov S. V. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Vychislitel'nye sistemy. Komp'yuternaya grafika. Raspoznavanie obrazov. Matematicheskoe modelirovanie [Information technology and computing systems. Computing systems. Computer graphics. Pattern recognition. Mathematical modeling]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Mir Publ., 2015, is. 2. 662 p.

11. Milenky A. V. Klassifikatsiya signalov v usloviyakh neopredelennosti. Statisticheskie metody samoobucheniya v raspoznavanii obrazov [Classification of signals in conditions of uncertainty. Statistical methods of self-learning in pattern recognition]. Moscow, Soviet radio Publ., 2017. 328 p.

12. Tsvetkov A. A., Shorokh D. K., Zubareva M. G., eds. [Object recognition algorithms]. Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy. Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (g. Sankt-Peterburg, iyul' 2016 g.) [Technical sciences: problems and prospects. Materials of the IV International Scientific Conference (St. Petersburg, July 2016)]. St. Petersburg, Own Publishing House, 2016, pp. 20-28. (In Russ.)

13. Avtomaticheskoe upravlenie i vychislitel'naya tekhnika. Raspoznavanie obrazov [Automatic control and computer technology. Pattern recognition]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2016, is. 10. 256 p.

14. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Vychislitel'nye sistemy. Matematicheskoe modelirovanie. Raspoznavanie obrazov. Prikladnye aspekty informatiki [Information technology and computing systems. Computing systems. Mathematical modeling. Pattern recognition. Applied Aspects of Informatics]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Higher school Publ., 2014, is. 3. 160 p.

15. Grenander W. Lektsii po teorii obrazov [Lectures on the theory of images]. Moscow, Mir Publ., 2014, vol. 1. 571 p.

16. Obnaruzhenie, raspoznavanie i opredelenie parametrov obrazov ob"ektov. Metody i algoritmy [Detection, recognition and determination of the parameters of object images. Methods and algorithms]; ed. by A. V. Korennov. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 112 p.

17. Potapov A. Avtomaticheskii analiz izobrazhenii i raspoznavanie obrazov [Automatic image analysis and pattern recognition]. Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2017. 292 p.

18. Grenander W. Lektsii po teorii obrazov [Lectures on the theory of images]. Moscow, Mir Publ., 2016, vol. 2. 342 p.

19. Grenander W. Lektsii po teorii obrazov [Lectures on the theory of images]. Moscow, Mir Publ., 2012, vol. 3. 432 p.

20. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Obrabotka informatsii i analiz dannykh. Programmnaya inzheneriya. Matematicheskoe modelirovanie. Prikladnye aspekty informatiki [Information technology and computing systems. Information processing and data analysis. Software engineering. Mathematical modeling. Applied Aspects of Informatics]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 104 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Дегтерев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sergeyd12@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-7046-3244

Sergey V. Degterev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: sergeyd12@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-7046-3244

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, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: lapinati@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7959-3053

Криушина Юлия Алексеевна, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: July.tchict@yandex.ru

Yulia A. Kriushina, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: july.tchict@yandex.ru

Криушин Евгений Александрович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: eugeniyPWN@gmail.com

Kriushin Evgeniy Aleksandrovich, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: eugeniyPWN@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-111-128

CC BY 4.0

Методика расчета стоимости запуска ракет космического назначения для выведения на орбиту спутников дистанционного зондирования земной поверхности

С. Ф. Стельмах[1], В. Г. Андронов[2] ✉, Д. С. Коптев[2]

[1] Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского Министерства обороны
ул. Ждановская 13, г. Санкт-Петербург 197198, Российская Федерация

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является совершенствование методики расчета стоимости запуска ракет космического назначения для выведения на орбиту спутников дистанционного зондирования земной поверхности.*

Методы. *В статье проведен системный анализ известных в открытой литературе характеристик современных отечественных ракет космического назначения (РКН) различных классов и подходов к расчёту стоимости их запуска в интересах выведения на орбиту спутников дистанционного зондирования земной поверхности.*

Результаты. *Проанализированы возможности отечественных РКН легкого, среднего и тяжелого классов по выведению полезного груза на различные виды орбит. Показана актуальность создания перспективной РКН среднего класса, способной выводить на низкую околоземную орбиту полезный груз массой от 8 до 17 тонн с конкурентной удельной стоимостью его выведения. Отмечено, что удельная стоимость выведения полезного груза непосредственно связана со стоимостью пуска РКН.*

Заключение. *В предложенной методике расчёта стоимости пуска РКН исключены недостатки, присущие уже существующим методикам. Данная методика может быть использована как для разработки алгоритмов, моделей и методов расчета стоимости пусков РКН различных классов, так и для проведения оценки эффективности их применения РКН по предназначению.*

Ключевые слова: *ракета космического назначения (РКН); орбита; космодром; масса полезного груза; удельная стоимость выведения полезного груза; методика расчета стоимости пуска РКН.*

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

© Стельмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С., 2022

Для цитирования: Стельмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С. Методика расчета стоимости запуска ракет космического назначения для выведения на орбиту спутников дистанционного зондирования земной поверхности / // Известия Юго-Западного государственного универ-ситета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 12. С. 111–128. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-111-128.

Поступила в редакцию 20.01.2022 *Подписана в печать 15.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

Methodology for Calculation of the Cost of Launch of Space Rockets for Introducing Remote Sensing Satellites of the Earth's Surface Into Orbit

Stanislav F. Stelmakh[1], Vladimir G. Andronov[2] ✉, Dmitry S. Koptev[2]

[1] Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky of the Ministry of Defense
13 Zhdanovskaya str., St. Peterburg 197198, Russian Federation

[2] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

The purpose of research *is to improve the methodology for calculating the cost of launching space rockets for launching satellites for remote sensing of the earth's surface into orbit.*

Methods. *The article provides a systematic analysis of the characteristics of modern domestic space rockets (RKN) of various classes known in the open literature and approaches to calculating the cost of their launch in the interests of launching satellites for remote sensing of the earth's surface into orbit.*

Results. *The capabilities of domestic ILVs of light, medium and heavy classes for launching payloads into various types of orbits are analyzed. The relevance of creating a promising medium-class ILV capable of launching a payload weighing from 8 to 17 tons with a competitive unit cost of its launch into low Earth orbit is shown. It is noted that the unit cost of launching the payload is directly related to the cost of launching the ILV.*

Conclusion. *In the proposed method for calculating the cost of launching the ILV, the shortcomings inherent in already existing methods are excluded. This technique can be used both to develop algorithms, models and methods for calculating the cost of launches of ILVs of various classes, and to assess the effectiveness of their application of ILVs for their intended purpose.*

Keywords: *space rocket (RCN); orbit; spaceport; payload mass; unit cost of payload removal; methodology for calculating the cost of launching the RCN.*

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

For citation: Stelmakh S. F., Andronov V. G., Koptev D. S. Methodology for Calculation of the Cost of Launch of Space Rockets for Introducing Remote Sensing Satellites of the Earth's Surface Into Orbit. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 111–128. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-111-128.

Received 20.01.2022 *Accepted 15.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

В структуре современного информационного обеспечения научных исследований, разработок и повседневной жизнедеятельности ведущих стран мира одно из основных мест принадлежит материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), большую часть которых получают из космоса. Большой обзор поверхности Земли, широта охвата регистрируемой территории, высокое (до 10 м) и сверхвысокое (до 1 м) пространственное разрешение материалов ДЗЗ на местности, возможность получения регистрируемой видовой информации в цифровом виде и её передачи по радиоканалу в наземные центры обработки позволяют с высокой оперативностью получать огромные объёмы детальной информации об объектах, расположенных на земной поверхности. Современные данные ДЗЗ из космоса – это космические сканерные снимки, представленные в цифровой растровой форме в виде матричной структуры пикселей маршрута съёмки земной поверхности. В настоящее время космические сканерные снимки доступны широкому кругу потребителей и активно используются в научных, производственных и других целях. Научно-технические достижения в области создания систем и средств ДЗЗ из космоса многократно расширили круг задач, решаемых с помощью космических сканерных снимков.

Иерархия ДЗЗ Российской Федерации включает в себя совокупность космической и наземной инфраструктур. К первой относят космические аппараты, полезной нагрузкой которых являются приборы, обеспечивающие необходимое качество фото- и видеосъёмки в различных спектральных диапазонах. Вторая отвечает за совокупность процедур, направленных на использование информации от космических аппаратов, начиная от приема данных и заканчивая реализацией приложений, позволяющих работать с подобной информацией в онлайн-режиме.

Основополагающим нормативно-правовым актом, регламентирующим процедуры синтеза сегмента российской космической системы ДЗЗ, является утвержденная Государственной корпорацией по космической деятельности «Роскосмос» Федеральная космическая программа России на 2016-2025 гг. [1].

Данная программа закладывает основные стратегические этапы развития отрасли, предусматривающие целый набор мероприятий, касающихся расширения и обновления орбитальной группировки КА ДЗЗ, усовершенствования важнейших характеристик фото- и видеосъемки, внедрения новых методов и средств приема, обработки, хранения и распространения данных геопространственной информации.

На сегодняшний день состав российской орбитальной группировки включает 12 КА ДЗЗ, из них 8 КА обеспечивают предоставление данных высокого пространственного разрешения – два КА «Ресурс-П» и космическая система «Канопус-В» в составе шести КА (рис. 1).

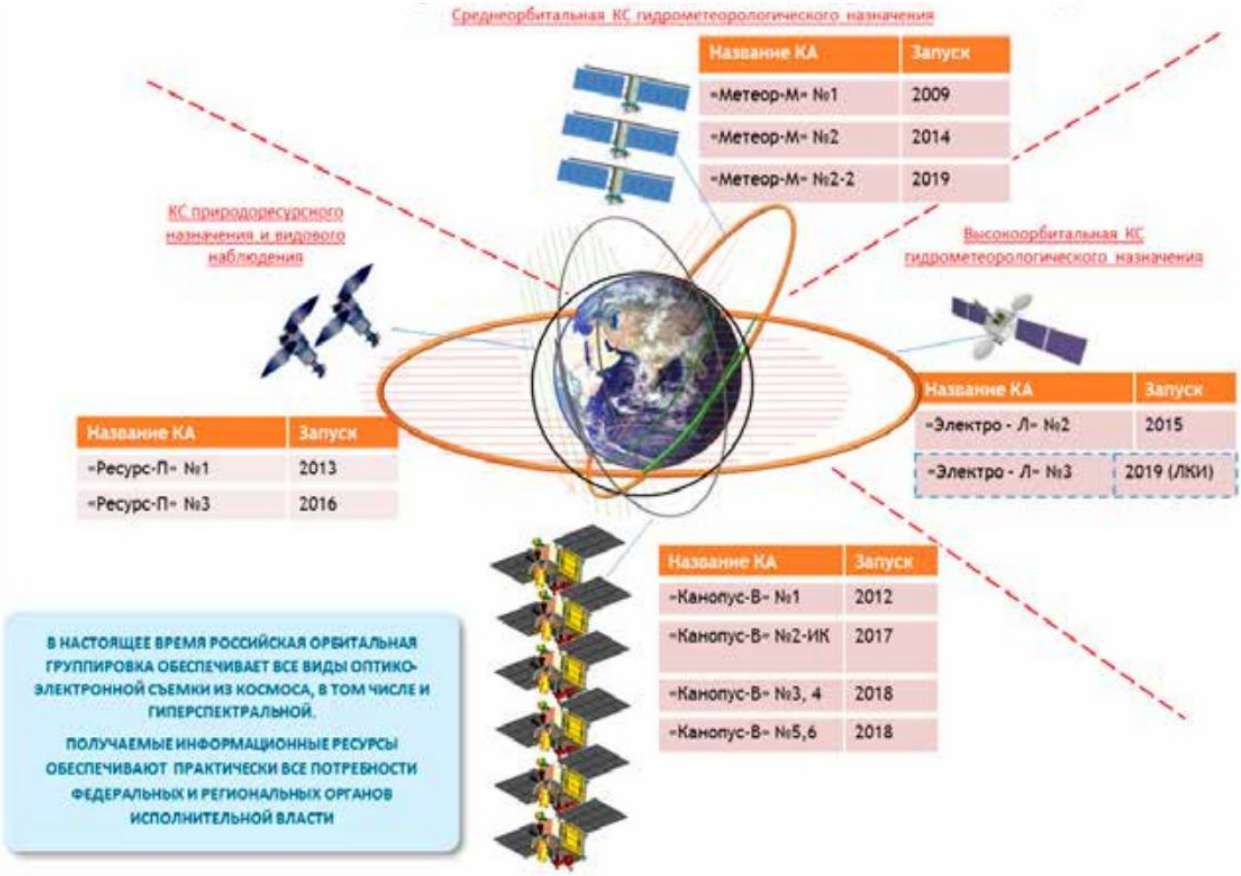


Рис. 1. Состав российского космического сегмента дистанционного зондирования Земли

Fig. 1. The current composition of the Russian orbital constellation of spacecraft for remote sensing of the Earth

Наиболее существенными факторами, оказывающими влияние на развитие российского космического сегмента ДЗЗ вплоть до 2025 г., являются:

– наращивание орбитальной группировки КА ДЗЗ в рамках Федеральной космической программы на 2016-2025 гг., что потребует увеличения объёмом данных ДЗЗ и применения новых типов съёмочных устройств;

– реализация политики открытости данных ДЗЗ не только для выполнения государственных заказов, но и для коммерческих проектов и физических лиц, а также требование к максимальному времени выдачи запрошенных данных – 10 суток;

– выполнение требований к информационной системе «Цифровая Земля» в рамках национального проекта «Цифровая экономика РФ» [2]:

– онлайн-доступ к результатам всей съёмки в полном разрешении;

– высокая точность координатной привязки и радиометрической коррекции, обеспечивающая пригодность для дальнейшего прикладного анализа;

– высокая скорость создания и выдачи продуктов обработки данных ДЗЗ;

– предоставление отраслевых информационных сервисов.

Спрос на услуги навигации, дистанционного зондирования Земли и атмосферы в режиме реального времени постоянно растет, упираясь в необходимость доставки большого количества грузов на орбиту Земли. На расчёт итоговой стоимости предоставления данных услуг помимо разработки, проектирования и создания самого КА и полезной нагрузки существенное влияние оказывают затраты на выведение его в космическое пространство путем использования ракет космического назначения (РКН). Снизить стоимость и увеличить объемы предоставляемых услуг ДЗЗ, а также повысить оперативность создания космических систем возможно, если ракетно-космическая индустрия перейдет от единичного и опытно-серийного производства РКН, космических аппаратов и систем к их мелкосерийному производству. Для этих целей следует активно использовать многоразовые РКН и кластеры малоразмерных (микро-, нано-, пико-) спутников, осваивать перспективный миллиметровый диапазон радиосвязи.

Основными показателями конкурентоспособности РКН являются масса полезного груза (ПГ), выводимого на различные орбиты, простота конструкции, экологическая безопасность, свобода доступа заказчиков на рынок пусковых услуг, надежность и экономичность РКН. Одним из важнейших показателей экономичности РКН является удельная стоимость выведения полезного груза на различные орбиты. Данный показатель напрямую зависит от стоимости пуска РКН.

В настоящее время существует несколько методик расчета стоимости пуска РКН [3]. Вместе с тем данные методики обладают целым рядом существенных недостатков, таких как необходимость проведения трудоемких экспертных опросов, присутствие в указанных методиках данных, имеющих ограниченный характер распространения, необходимость включения в данные методики условных трудно вычисляемых коэффициентов и констант, различного рода допущений, а также применение указанных методик для расчета стоимости пуска РКН строго определенных классов и т.д.

Таким образом, разработка методики, свободной от указанных недостатков и применимой к любым классам РКН, является актуальной задачей.

Материалы и методы

Класс РКН является совокупным параметром, определяющим ее мощность

(грузоподъемность). В зависимости от грузоподъемности все существующие и проектируемые РКН подразделяются на четыре класса: легкие, средние, тяжелые и сверхтяжелые (уникальные) (табл. 1) [4; 5].

Таблица 1. Классификация ракет космического назначения

Table 1. Classification of space rockets

Класс РКН	Масса ПГ, т	Наименование РКН
Легкий	до 5	«Рокот», «Союз-2.1в», «Ангара-1.2»
Средний	от 5 до 15	«Союз-2.1а(б)», «Союз-ФГ»
Тяжелый	от 15 до 35	«Протон-М», «Ангара-А5»
Сверхтяжелый	более 35	«Н1», «Энергия»

Принадлежность РКН к тому или иному классу определяется в соответствии с массой выводимого ПГ на низкую околоземную орбиту (НОО) [5; 6; 7].

Удельная стоимость выведения ПГ на орбиты варьируется в пределах от 3–5 тыс. долл. за кг для РКН тяжелого класса и до 20–40 тыс. долл. за кг для легких РКН. В таблице 2 представлены масса выводимого ПГ на различные орбиты и удельная стоимость его выведения отечественными РКН.

Максимальная масса выводимого ПГ на различные виды орбит отечественными РКН представлена на диаграмме (рис. 2) [8].

Таблица 2. Масса выводимого ПГ на различные орбиты и удельная стоимость его выведения отечественными РКН

Table 2. The mass of the payload to be launched into various orbits and the specific cost of its launch by domestic launch vehicles

РКН	Космодром	Стоимость пуска РКН, млн долл.	Максимальная масса выводимого ПГ, т				Удельная стоимость выведения ПГ, долл. / кг			
			НОО	ССО	ГПО	ГСО	НОО	ССО	ГПО	ГСО
Легкий класс										
«Рокот»	Плесецк	45	1,95	-	-	-	23077	-	-	-
«Союз-2.1в»	Плесецк Восточный	38	2,8-3,3	1,2-1,4	-	-	11515-14615	27143-31667	-	-
«Ангара-1.2»	Плесецк	55	3	-	1,99	-	18333	-	27638	-

Окончание табл. 2 / Table 2 (ending)

РКН	Космодром	Стоимость пуска РКН, млн долл.	Максимальная масса выводимого ПГ, т				Удельная стоимость выведения ПГ, долл. / кг			
			НОО	ССО	ГПО	ГСО	НОО	ССО	ГПО	ГСО
Средний класс										
«Союз-ФГ»	Байконур	48	6,79-7,13	4,0-4,6	1,5	-	6732-7069	10435-12000	32000	-
«Союз-2.1а»	Байконур, Плесецк Восточный	48	6,6-7,4	4,3-4,6	1,5	-	6486-7273	10435-11163	32000	-
«Союз-2.1б»	Байконур, Плесецк Восточный	48	6,9-8,7	4,6-5,0	1,8-2,0	-	5517-6957	9600-10435	24000-26666	-
Тяжелый класс										
«Протон-М»	Байконур	65	22,4	-	6,3	3,3	2902	-	10317	19697
«Ангара-А52	Плесецк, Восточный	120	24-24,5	-	5,4-8,0	2,8-5,0	4898-5000	-	15000-22222	24000-42857

Примечание. ССО – солнечно-синхронная орбита; ГПО – геопереходная орбита; ГСО – геостационарная орбита.

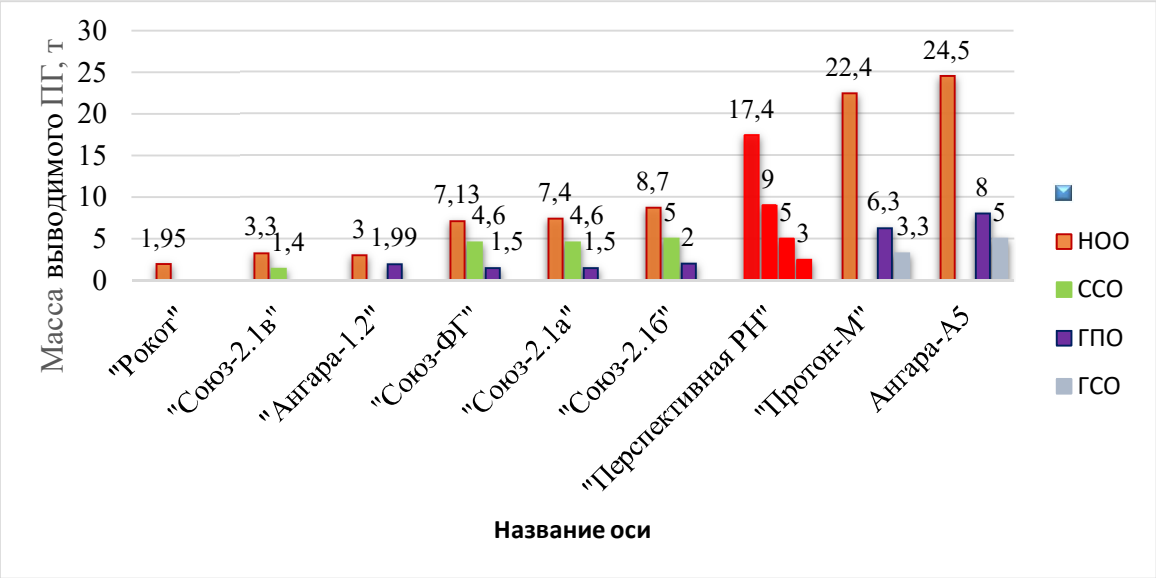


Рис. 2. Максимальная масса выводимого ПГ отечественными РКН на различные виды орбит

Fig. 2. The maximum mass of the payload to be launched by domestic launch vehicles into various types of orbits

Анализ данных, представленных в таблице 1, а также на диаграмме (см. рис. 1), показывает, что в настоящее время имеет место определенный «разрыв» в линейке отечественных РКН между средним и тяжелым классом по указанным показателям. Так, максимальная масса ПГ, выводимого РКН среднего класса «Союз-2.1б» с космодрома Байконур на НОО, составляет 8,7 т. Следующей ракетой космического назначения по указанному критерию в данной линейке является РКН тяжелого класса «Протон-М», способная вывести на НОО ПГ массой 22,4 т. Соответственно разница в максимальной массе ПГ, выводимого данными РКН на НОО, составляет почти 14 т.

При рассмотрении такого показателя РКН, как удельная стоимость выведения ПГ на орбиту (рис. 3), наблюдается аналогичная ситуация [9; 10].

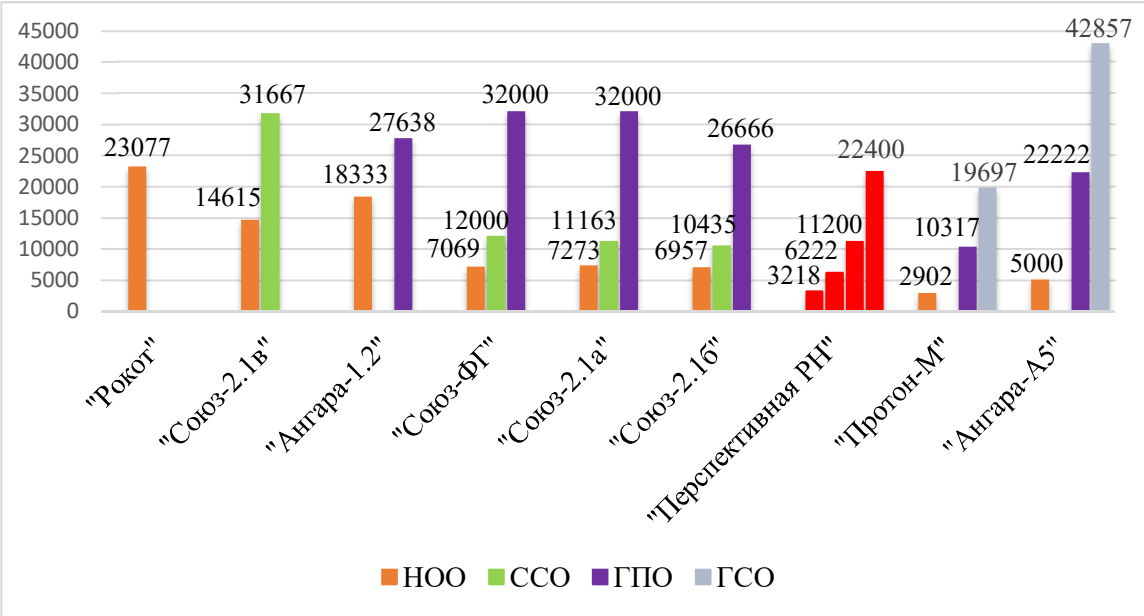


Рис. 3. Максимальная удельная стоимость выведения ПГ отечественными РКН на различные виды орбит

Fig. 3. The maximum unit cost of launching a payload by domestic carrier rockets into various types of orbits

Анализ данных, представленных в таблице 1 и на диаграмме (рис. 2), показывает, что разница между удельной стоимостью выведения одного кг ПГ с космодрома Байконур на ГПО РКН среднего класса «Союз-2.1б» и РКН тяжелого класса «Протон-М» составляет более 16 тыс. долл. за кг.

Как было отмечено выше, удельная стоимость выведения ПГ на заданные орбиты напрямую зависит от стоимости пуска, поэтому с точки зрения оценивания конкурентоспособности РКН расчет величины данного показателя эффективности применения перспективной РКН имеет первостепенное значение.

Результаты и их обсуждение

К основным затратам, входящим в стоимость пуска РКН, относятся следующие [11; 12]:

– затраты на ОКР по разработке РКН;

– затраты на изготовление РКН;

– затраты на пусковые услуги РКН.

Тогда стоимость пуска РКН может быть рассчитана с помощью следующего выражения:

$$C_{зап}^{рн} = C_{окр}^{рн} + C_{пр}^{рн} + C_{п}^{рн}, \qquad (1)$$

где $C_{зап}^{рн}$ – полная стоимость пуска РКН (с учетом ОКР, производства РКН и собственно его пуска);

$C_{окр}^{рн}$ – затраты на ОКР по разработке РКН, величина которых в данном выражении прямо пропорционально распределяется между количеством запланированных для данного РКН пусков;

$C_{пр}^{рн}$ – затраты на производство РКН;

$C_{п}^{рн}$ – затраты на пусковые услуги РКН.

Предлагаемая методика расчета стоимости пуска РКН включает в себя четыре этапа.

Первый этап. Определение затрат на ОКР по разработке РКН

Для расчета затрат на ОКР РКН требуются следующие исходные данные [11; 12]:

– стартовая масса РКН;

– год начала летных испытаний;

– коэффициент удорожания ОКР по сравнению с 1990-м годом.

Затраты на ОКР РКН (тыс. руб.) определяются на основании следующего выражения [13]:

$$C_{окр}^{рн} = 1{,}57 M_0 (1 + 0{,}06(t_{ли} - 1990)) K_y^p, \qquad (2)$$

где M_0 – стартовая масса, т; $t_{ли}$ – год начала летных испытаний; K_y^p – коэффициент удорожания ОКР по сравнению с 1990-м годом.

Второй этап. Определение затрат на изготовление РКН

Существует несколько методик определения затрат на изготовление РКН.

В работе [14] предложена методика определения указанных затрат, которая учитывает массу РКН, сложность изготовления изделия, количество ступеней РКН, коэффициент удорожания изделия по сравнению с базовым годом.

В соответствии с этой методикой стоимость производства РКН рассчитывается на основании следующих выражений:

$$C_{пр}^{рн} = 24 M_{сух} K_{сл} K_{ст} K_{уд}, M_{сух} \in [5,...,10],$$
$$C_{пр}^{рн} = 17 M_{сух} K_{сл} K_{ст} K_{уд}, M_{сух} \in [20,...,30], \qquad (3)$$
$$C_{пр}^{рн} = 22 M_{сух} K_{сл} K_{ст} K_{уд}, M_{сух} \in [50,...,80]$$

где $M_{сух}$ – масса незаправленной РКН, т; $K_{сл}$ – коэффициент сложности изготовления изделия, зависящий от существования предыдущего (базового) образца; $K_{ст}$ – коэффициент сложности, зависящий от количества ступеней в изделии; $K_{уд}$ – коэффициент удорожания по сравнению с базовым годом.

Расчет стоимости производства РКН по данной методике зачастую невозможен из-за существующих неопределенностей, касающихся установления величин коэффициентов $K_{кл}, K_{ст}$, требующих достаточно сложных экспертных оценок.

Также на основании данной методики из-за наличия разрывов в интервалах значений $m_{сух}$ невозможно провести расчет стоимости РКН с массой незаправленной ракеты в диапазонах от 11 до 19 т, от 31 до 49 т и свыше 80 т.

Указанные недостатки отсутствуют в методике, приведенной в работе [14] и позволяющей определить величину затрат на изготовление РКН на основании следующих исходных данных:

– масса незаправленной РКН;

– год, на который проводится прогноз стоимости изготовления РКН;

– коэффициент удорожания изготовления космической техники вследствие инфляционных процессов, протекающих в России после 1990-го года.

В соответствии с данной методикой затраты на изготовление опытного образца РКН $C_{пр}^{рн\,оп}$ (млн руб.) определяются с помощью следующих выражений:

$$C_{пр}^{рн\,оп} = 0,45(1+0,66(t_{пс\,оп}-1990))M_{сух}K_y^a, \quad 4,5 < M_{сух} \le 20, \tag{4}$$

$$C_{пр}^{рн\,оп} = 0,25(1+0,66(t_{п.с}-1990))M_{сух}K_y^a, \quad 20 \le M_{сух} \le 300, \tag{5}$$

где $M_{сух}$ – масса незаправленной РКН, т; $t_{пс\,оп}$ – год, на который проводится прогноз стоимости изготовления опытного образца; K_y^a – коэффициент удорожания изготовления космической техники вследствие инфляционных процессов, протекающих в России после 1990-го года.

Стоимость изготовления первого серийного РКН $C_{пр}^{рн\,1}$ (тыс. руб.) определяется с помощью следующих выражений [15; 16; 17]:

$$C_{пр}^{рн\,1} = 0,65 \times \times\left(0,152+0,06(t_{пс\,1\,со}-1990)\right)M_{сух}K_y^a, \quad 4,5 \le M_{сух} \le 50, \tag{6}$$

$$C_{пр}^{рн\,1} = 0,43 \times \times\left(0,152+0,06(t_{пс\,1\,со}-1990)\right)M_{сух}K_y^a, \quad M_{сух} > 50, \tag{7}$$

где $t_{п.с\,1\,со}$ – год, на который проводится прогноз стоимости изготовления первого серийного РКН.

Стоимость изготовления любого серийного РКН $C_{пр}^{рн\,с}$ [1] (тыс. руб.) определяется с помощью следующего выражения [14; 16]:

[1] Вейко А. В. Экономические инструменты оптими-зации программных мероприятий по развитию наукоемкой продукции на примере ракет-носителей: дис. … канд. экон. наук. М.: РУДН, 2015. 188 с.

$$C_{пр}^{рн\,с} = C_{пр}^{рн\,1} N^{-0,22}, \qquad (8)$$

где N – номер серийного РКН с момента начала производства.

Третий этап. Определение затрат на пусковые услуги РКН

Существует несколько методик определения затрат на пусковые услуги РКН.

В работе [14] предложена методика определения указанных затрат, в которой последние определяются с помощью следующего выражения:

$$C_{экс}^{рн} = C_{л.с}^{рн} + C_{под}^{рн} + C_{эл}^{рн} + C_{в.в.т}^{рн} + \\ + C_{рем}^{рн} + C_{ам}^{рн} + C_{ар.с}^{рн} + C_{к.р.т}^{рн}, \qquad (9)$$

где $C_{л.с}^{рн}$ – затраты на содержание и обучение личного состава, приходящиеся на подготовку РКН к пуску; $C_{под}^{рн}$ – затраты на поддержание в готовности наземного технологического оборудования, приходящиеся на подготовку РКН к пуску; $C_{эл}^{рн}$ – затраты на оплату электроэнергии; $C_{ввт}^{рн}$ – затраты на поставки вооружения и военной техники (ВВТ), приходящиеся на подготовку РКН к пуску; $C_{рем}^{рн}$ – затраты на содержание, эксплуатацию и ремонт зданий и объектов спецназначения, воинских зданий и специальных сооружений, ВВТ, складов и баз хранения, приходящиеся на подготовку РКН к пуску; $C_{ам}^{рн}$ – амортизационные отчисления на реновацию основных фондов, приходящиеся на подготовку РКН к пуску; $C_{ар.с}^{рн}$ – затраты на оплату арендуемых каналов связи, приходящиеся на подготовку РКН к пуску; $C_{крт}^{рн}$ – затраты на закупки компонентов ракетных топлив и сжатых газов.

Расчет величин слагаемых выражения (10) являются нетривиальной задачей, связанной с необходимостью наличия либо сложных экспертных оценок, либо информации, имеющей ограниченный характер распространения.

Методика определения затрат на пусковые услуги РКН, приведенная в [18], позволяет провести расчеты без применения трудоемких методов экспертного опроса или использования информации ограниченного характера.

Данные затраты (млн руб.) могут быть рассчитаны с помощью следующего выражения:

$$C_{п}^{рн} = 128,51 \cdot \alpha^{0,0567 M_{ноо}}, \qquad (10)$$

где $M_{ноо}$ – масса полезной нагрузки, выводимой на НОО, т; α – статистический коэффициент.

Четвертый этап. Определение стоимости пуска РКН

Для определения стоимости пуска РКН воспользуемся выражением (1).

Исходные данные, необходимые для расчета стоимости пуска РКН, приведены в таблице 3 [7; 10; 14; 19; 20; 21].

Таблица 3. Исходные данные для расчета стоимости пуска РКН

Table 3. Initial data for calculating the cost of launching a space rocket

Условное обозначение	Наименование исходных данных	Значение
M_0	Стартовая масса РКН, т	530
$t_{ли}$	Год начала летных испытаний	2020
K_y^p	Коэффициент удорожания ОКР по сравнению с 1990 годом	1000
$M_{сух}$	Масса незаправленной РКН, т	37
$t_{п.с\ оп}$	Год, на который проводится прогноз стоимости производства опытного образца	2022
$t_{п.с\ 1\ со}$	Год, на который проводится прогноз стоимости производства первого серийного образца	2025
K_y^a	Коэффициент удорожания изготовления космической техники вследствие инфляционных процессов, протекающих в России после 1990 г.	75000
$M_{ноо}$	Масса полезной нагрузки, выводимой на НОО, т	17,4
α	Статистический коэффициент	2,73

С применением изложенной методики рассчитана стоимость пуска РКН в зависимости от серийного номера РКН. Результаты расчетов представлены на диаграмме, отражающей зависимость изменения стоимости пуска РКН от ее серийного номера (рис. 4).

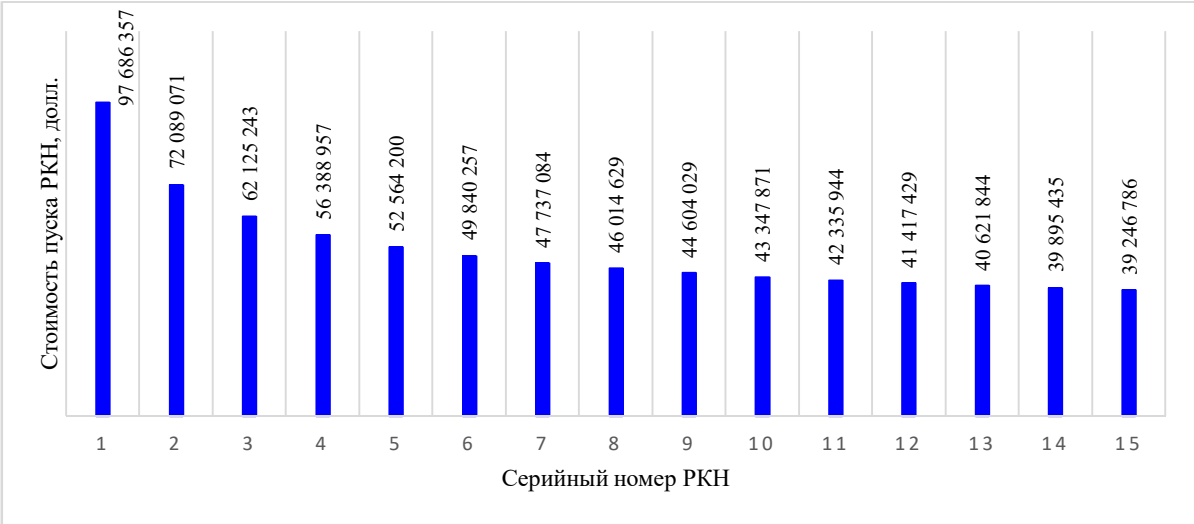


Рис. 4. Зависимость изменения стоимости пуска ракеты космического назначения от её серийного номера

Fig. 4. Dependence of the change in the cost of launching a space rocket on its serial number

Проведенные на основании предложенной методики расчеты показывают, что стоимость пуска первого серийного образца РКН с учетом проведения ОКР, производства опытного образца, его летных испытаний и пусковых услуг составит около 6 838 млн руб., что в ценах 2021 г. соответствует 98 млн долл.

С учетом удешевления РКН по мере наращивания его серийного производства (на основании расчетов, выполненных в соответствии с выражением (8) данной методики) ориентировочная стоимость его четвертого пуска составит 3 947 млн руб., что соответствует 56 млн долл. При этом удельная стоимость выведения ПГ на НОО составит около 3300 долл. за кг, что демонстрирует более высокую эффективность РКН по сравнению с существующими отечественными РКН легкого, среднего и тяжелого классов (см. табл. 2).

Выводы

В предложенной методике расчёта стоимости пуска РКН исключены недостатки, присущие уже существующим аналогичным методикам. Данная методика может быть использована при разработке алгоритмов, моделей, методов расчета стоимости пусков РКН, а также при проведении оценки эффективности применения РКН различных классов по предназначению.

Список литературы

1. Федеральная космическая программа России на 2016 – 2025 годы, утвержденная Постановлением Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230. URL: https://www.roscosmos.ru/22347/ (дата обращения: 01.12.2021).

2. Цифровая экономика РФ. URL: https://xn80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xnp1ai/projects/tsifrovaya-ekonomika (дата обращения 01.12.2021).

3. Стельмах С. Ф. Методика и алгоритм расчета стоимости пусков отечественных ракет-носителей // Технологии, алгоритмы и программы решения прикладных задач кибербезопасности, помехозащищенности и информационного обеспечения: сборник научных трудов Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. СПб., 2021. Вып. 4(38). С. 114-121.

4. Клюшников В. Ю. Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 3(100). С. 59–71.

5. Надеин И. О., Кольга В. В., Быков А. В. Анализ воздушного старта ракеты-носителя // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VI Международной научно-практической конференции / Сибирский государственный

университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетникова. Красноярск, 2021. Т. 1. С. 160–179.

6. Игрицкий В. А. Оценка удобства обслуживания элементов ракет космического назначения сверхтяжелого класса при различных технологиях их подготовки // Инженерный журнал: наука и инновации 2021. № 4. С. 1–15.

7. Финогенов С. Л., Коломенцев А. И., Кудрин О. И. Использование различных окислителей для дожигания водорода, нагреваемого в ракетном двигателе за счет солнечной энергии // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетникова. 2015. Т. 16, № 3. С. 680 – 689.

8. Стельмах С. Ф., Басов Г. Б. Анализ состояния разработки и перспектив применения ракеты-носителя «Союз-5» // Известия Института инженерной физики. 2021. Вып. 2(60). С. 10-15.

9. РКЦ Прогресс. URL: http://samspace.ru (дата обращения: 25.12.2021).

10. Косенко А. Б., Синявский В. В. Оценка удельной стоимости доставки полезного груза с поверхности Земли на орбиту назначения транспортной системой с многоразовым электроракетным буксиром // Известия академии наук. 2011. № 3. С. 53–64.

11. Роскосмос. URL: http://roscosmos.ru (дата обращения: 29.12.2021).

12. Имаш Т. Ж. Комплекс «Байконур» – главная платформа Казахстанско-Российского сотрудничества в освоении космоса // Постсоветские исследования. 2019. Т. 2, № 3. С. 1085 – 1094.

13. Ракета-носитель «Союз-5» будет запущена в 2022 году. URL: http://tass.ru/pmef-2017/articles/4299507 (дата обращения: 30.12.2021).

14. Методы военно-экономических исследований перспектив развития космических средств / под ред. Е. В. Рыжова. М.: Машиностроение, 1998. 152 с.

15. РКК Энергия. URL: http://energia.ru (дата обращения: 30.12.2021).

16. Казахстан ратифицировал протокол к соглашению с Россией о комплексе «Байтерек». URL: http://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/7767737 (дата обращения: 30.12.2021).

17. Федоровский А. А., Строгалев В. П., Владыкин Е. Н. Обоснование системы технического контроля при разработке и испытаниях объектов ракетной и космической техники // Наука и образование МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2015. № 8. С. 63–73.

18. Медведев А. А. Инновационные подходы при создании ракетно-космической техники: монография. 2-е изд. М.: Доброе слово и Ко, 2020. 400 с.

19. Стельмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С. Методика оценивания времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному

пуску на примере ракеты-носителя FALCON 9 FT // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 160–179.

20. Создание сверхтяжелых ракет-носителей для исследования и освоения Луны и Марса: прошлое, настоящее, будущее / А. Ю. Данилюк, В. Ю. Клюшников, И. И. Кузнецов, А. С. Осадченко // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. 2015. № 1 (27). С. 10–18.

21. Сенькин В. С. Оптимизация проектных параметров ракеты-носителя сверхлегкого класса // Техническая механика. 2009. № 1. С. 80–88.

References

1. Federal'naya kosmicheskaya programma Rossii na 2016 – 2025 gody, utverzhdennaya Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 23 marta 2016 g. № 230 [The Federal Space Program of Russia for 2016-2025, approved by Decree of the Government of the Russian Federation of March 23, 2016 No. 230]. Available at: https://www.roscosmos.ru/22347/. (accessed 01.12.2021)

2. Tsifrovaya ekonomika RF [Digital Economy of the Russian Federation]. Available at: https://xn80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xnp1ai/projects/tsifrovaya-ekonomika. (accessed 01.12.2021)

3. Stelmakh S. F. [Methods and algorithm for calculating the cost of launches of domestic launch vehicles]. Tekhnologii, algoritmy i programmy resheniya prikladnykh zadach kiberbezopasnosti, pomekhozashchishchennosti i informatsionnogo obespecheniya. Sbornik nauchnykh trudov Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo [Technologies, algorithms and programs for solving applied problems of cybersecurity, interference protection and information support. Collection of scientific works of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky]. St. Petersburg, 2021, is. 4(38), pp. 114-121. (In Russ.)

4. Klyushnikov V. Yu. Rakety-nositeli sverkhlegkogo klassa: nisha na rynke puskovykh uslug i perspektivnye proekty [Ultralight launch vehicles: a niche in the launch services market and promising projects]. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera = Aerospace Sphere*, 2019, no. 3(100), pp. 59–71.

5. Nadein I. O., Kolga V. V., Bykov A. V. [Analysis of the air launch of the carrier rocket]. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki. Materialy VI Mezhdu-narodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetnikova Publ., 2021, vol. 1, pp. 160–179. (In Russ.)

6. Igritsky V. A. Otsenka udobstva obsluzhivaniya elementov raket kosmicheskogo naznacheniya sverkhtyazhelogo klassa pri razlichnykh tekhnologiyakh ikh podgotovki [Evaluation of the serviceability of elements of space rockets of a super-heavy class with various technologies for their preparation]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii 2021 = Engineering Journal: Science and Innovations*, 2021, no. 4, pp. 1–15.

7. Finogenov S. L., Kolomentsev A. I., Kudrin O. I. Ispol'zovanie razlichnykh okislitelei dlya dozhiganiya vodoroda, nagrevaemogo v raketnom dvigatele za schet solnechnoi energii [The use of various oxidizing agents for the afterburning of hydrogen heated in a rocket engine by solar energy]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetnikova = Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnikov,* 2015, vol. 16. no. 3, pp. 680-689.

8. Stelmakh S. F., Basov G. B. Basov Analiz sostoyaniya razrabotki i perspektiv primeneniya rakety-nositelya "Soyuz-5" [Analysis of the state of development and prospects for the use of the "Soyuz-5" launch vehicle]. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = Proceedings of the Institute of Engineering Physics*, 2021, is. 2(60), pp. 10-15.

9. RKTs Progress [RCC Progress]. Available at: http://samspace.ru. (accessed 25.12.2021)

10. Kosenko A. B., Sinyavsky V. V. Otsenka udel'noi stoimosti dostavki poleznogo gruza s poverkhnosti Zemli na orbitu naznacheniya transportnoi sistemoi s mnogorazovym elektroraketnym buksirom [Estimation of the specific cost of delivering a payload from the Earth's surface to the destination orbit by a transport system with a reusable electric rocket tug]. *Izvestiya akademii nauk = News of the Academy of Sciences*, 2011, no. 3, pp. 53-64.

11. Roskosmos [Roscosmos]. Available at: http://roscosmos.ru. (accessed 29.12.2021)

12. Imash T. Zh. Kompleks "Baikonur" – glavnaya platforma Kazakhstansko-Possiiskogo sotrudnichestva v osvoenii kosmosa [The Baikonur complex is the main platform of Kazakh-Russian cooperation in space exploration]. *Postsovetskie issledovaniya = Post-Soviet Studies*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 1085–1094.

13. Raketa-nositel' "Soyuz-5" budet zapushchena v 2022 godu [Soyuz-5 launch vehicle will be launched in 2022]. Available at: http://tass.ru/pmef-2017/articles/4299507. (accessed 30.12.2021)

14. Metody voenno-ekonomicheskikh issledovanii perspektiv razvitiya kosmicheskikh sredstv [Methods of military-economic studies of the prospects for the development of space facilities]; ed. By E.V. Ryzhov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998. 152 p.

15. RKK Energiya [RSC Energia]. Available at: http://energia.ru. (accessed 30.12.2021)

16. Kazakhstan ratifitsiroval protokol k soglasheniyu s Rossiei o komplekse "Baiterek" [Kazakhstan ratified the protocol to the agreement with Russia on the Baiterek complex]. Available at: http://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/7767737. (accessed 30.12.2021)

17. Fedorovsky A. A., Strogalev V. P., Vladykin E. N. Obosnovanie sistemy tekhnicheskogo kontrolya pri razrabotke i ispytaniyakh ob"ektov raketnoi i kosmicheskoi tekhniki [Substantiation of the technical control system in the development and testing of objects of rocket and space technology]. *Nauka i obrazovanie MGTU imeni N. E. Baumana = Science and Education of the Moscow State Technical University N. E. Bauman*, 2015, no. 8, pp. 63–73.

18. Medvedev A. A. Innovatsionnye podkhody pri sozdanii raketno-kosmicheskoi tekhniki [Innovative approaches to the creation of rocket and space technology]. 2nd ed. Moscow, Kind word and Co Publ., 2020. 400 p.

19. Stelmakh S. F., Andronov V. G., Koptev D. S. Metodika otsenivaniya vremeni podgotovki vozvrashchaemoi stupeni rakety kosmicheskogo naznacheniya k povtornomu pusku na primere rakety-nositelya FALCON 9 FT [Method for estimating the time of preparation of the return stage of a space rocket for re-launch using the example of the FALCON 9 FT launch vehicle]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 160–179.

20. Danilyuk A. Yu., Klyushnikov V. Yu., Kuznetsov I. I., Osadchenko A. S. Sozdanie sverkhtyazhelykh raket-nositelei dlya issledovaniya i osvoeniya Luny i Marsa: proshloe, nastoyashchee, budushchee [Creation of superheavy launch vehicles for exploration and exploration of the Moon and Mars: past, present, future]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina = Bulletin of NPO named after S. A. Lavochkina*, 2015, no. 1 (27), pp. 10–18.

21. Senkin V. S. Optimizatsiya proektnykh parametrov raketynositelya sverkhlegkogo klassa [Optimization of the design parameters of an ultralight launch vehicle]. *Tekhnicheskaya mekhanika = Technical Mechanics*, 2009, no. 1, pp. 80-88.

Информация об авторах / Information about the Authors

Стельмах Станислав Феликсович, кандидат военных наук, старший научный сотрудник 173 лаборатории ВИ (НИ), Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ssf-1964@mail.ru

Stanislav F. Stelmakh, Cand. of Sci. (Military), Senior Research Officer 173 of the VI Laboratory (NI), Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: ssf-1964@mail.ru

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: vladia58@mail.ru

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

Vladimir G. Andronov, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Research Officer, Professor, Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: vladia58@mail.ru

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

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-129-144

CC BY 4.0

Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности

В. Г. Андронов[1] ✉, А. А. Чуев[1], А. А. Князев[1]

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

✉ e-vladia58@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является снижение вычислительных и ресурсных затрат, связанных с выполнением на борту беспилотных летательных аппаратов процедур определения и оценки уровня параметров некоординированных отклонений от заданной траектории по результатам обработки изображений подстилающей поверхности.*

Методы*. Для математического описания процесса определения и оценки уровня некоординированных отклонений беспилотного летательного аппарата от заданной траектории использовались методы фотограмметрической обработки перекрывающихся аэрокосмических снимков и аппроксимации тригонометрических функций.*

Результаты. *Получены функциональные зависимости между параметрами отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории и изменениями параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, обусловленными этими отклонениями. Разработана процедура расчёта изменений параллаксов, основанная на аппроксимации полученных функциональных зависимостей. Выполнены количественные оценки погрешностей аппроксимации, а также совместного и раздельного влияния отклонений на величину изменений параллаксов перекрывающихся изображений.*

Заключение. *Разница в значениях продольных параллаксов смежных пар перекрывающихся снимков и отличие от нуля их поперечных параллаксов служат критерием наличия некоординированных отклонений маршрута полёта от заданной траектории по высоте и направлению полёта. Разработанная модель основана на использовании для анализа и обработки текущих изображений подстилающей поверхности и обеспечивает автоматическое обнаружение и оценку уровня этих отклонений с относительной погрешностью 0,6%. В отличие от известных предложенный подход базируется на простых вычислительных процедурах, что позволяет существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат.*

Ключевые слова: *навигация; беспилотный летательный аппарат; параллакс изображений; аэрофотосъёмка.*

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

© Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А., 2022

Для цитирования: Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 129–144. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-129-144.

Поступила в редакцию 17.01.2022 *Подписана в печать 14.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

Determination and Assessment of the Level of Deviations of Unmanned Aerial Vehicles from a Given Trajectory from Images of the Underlying Surface

Vladimir G. Andronov[1] ✉, Andrey A. Chuev[1], Alexander A. Knyazev[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

The purpose of *research is to reduce the computational and resource costs associated with performing procedures on board unmanned aerial vehicles for determining and evaluating the level of parameters of uncoordinated deviations from a given trajectory based on the results of image processing of the underlying surface.*

Methods. *Methods of photogrammetric processing of overlapping aerospace images and approximation of trigonometric functions were used to mathematically describe the process of determining and evaluating the level of uncoordinated deviations of an unmanned aerial vehicle from a given trajectory.*

Results. *Functional dependences between the parameters of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory and changes in parallaxes of overlapping images of the underlying surface caused by these deviations are obtained. A procedure for calculating parallax changes based on the approximation of the obtained functional dependencies has been developed. Quantitative estimates of approximation errors, as well as the joint and separate influence of deviations on the magnitude of changes in the parallaxes of overlapping images are performed.*

Conclusion. *The difference in the values of the longitudinal parallaxes of adjacent pairs of overlapping images and the difference from zero of their transverse parallaxes serve as a criterion for the presence of uncoordinated deviations of the flight route from the specified trajectory in altitude and direction of flight. The developed model is based on the use of the underlying surface for the analysis and processing of current images and provides automatic detection and assessment of the level of these deviations with a relative error of 0.9%. Unlike the well-known ones, the proposed approach is based on simple computational procedures, which significantly reduces the level of computational and resource costs.*

Keywords: *navigation; unmanned aerial vehicle; parallax images; aerial photography.*

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

For citation: Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A. Determination and Assessment of the Level of deviations of Unmanned Aerial Vehicles from a Given Trajectory from Images of the Underlying Surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 129–144. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/ 2223-1536-2022-12-1-129-144.

Received 17.01.2022 *Accepted 14.02.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

В настоящее время широкое распространение получили малоразмерные (мини) беспилотные летательные аппараты (БЛА) весом 3-5 кг, оснащённые системой видеонаблюдения подстилающей поверхности и предназначенные для решения многих целевых задач [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7]. При этом требования к точности навигации и автоматического управления полётом таких БЛА в определяющей степени зависят от характера целевых задач. В одних случаях достаточно исключить пропуски и/или «срывы» слежения наблюдаемых по маршруту полёта участков местности, в других – вывести БЛА в заданную точку маршрута полёта и т. д. Очевидно, что во всех случаях требуются своевременное обнаружение и определение значений параметров отклонений БЛА от заданной траектории или оценка их уровня. Для решения этой задачи служит контур инерциальной навигации, который включает в себя малогабаритные гироскопы, датчики угловых скоростей, акселерометры, барометрические высотомеры, магнитометры [8; 9; 10; 11; 12]. Эти датчики обеспечивают получение и выдачу в систему автоматического управления информации о текущей ориентации БЛА по углам тангажа, крена и рыскания, его координатам, скорости и высоте полёта. Основным недостатком инерциальных систем всех типов летательных аппаратов является зависимость точности от длительности автономной работы, обусловленная накоплением ошибок измерения. При этом из-за ограничений по массе и габаритам датчиков наиболее высокая скорость накапливания ошибок характерна именно для мини-БЛА [6]. Поэтому на практике в системе управления малоразмерных БЛА выполняется планово-периодическая коррекция инерциальных измерений по сигналам GPS.

Вместе с тем известно [13], что в процессе полёта БЛА возможна потеря сигналов от спутников, что может привести к отклонению маршрута полёта БЛА от заданной траектории и снижению эффективности его целевого применения. В этой связи для повышения точности инерциальных измерений в условиях потери сигналов от спутников актуальной является задача использования дополнительной информации, в частности данных видеонаблюдения подстилающей поверхности. Известные подходы к решению этой задачи базируются на трудоёмких вычислительных процедурах, связанных с решением систем нелинейных уравнений [14; 15]. Кроме того,

для анализа и обработки используются не только текущие, но и спутниковые изображения, цифровые карты местности и т. п. Однако в большинстве случаях реализации таких подходов требуются значительные вычислительные и ресурсные затраты.

В данной работе предлагается методика определения и оценки уровня отклонений беспилотного летательного аппарата, которая основана на простых вычислительных процедурах и использует только текущие изображения подстилающей поверхности.

Материалы и методы

Для разработки математической модели введём систему координат (СК) *SXYZ*, связанную с БЛА (рис. 1).

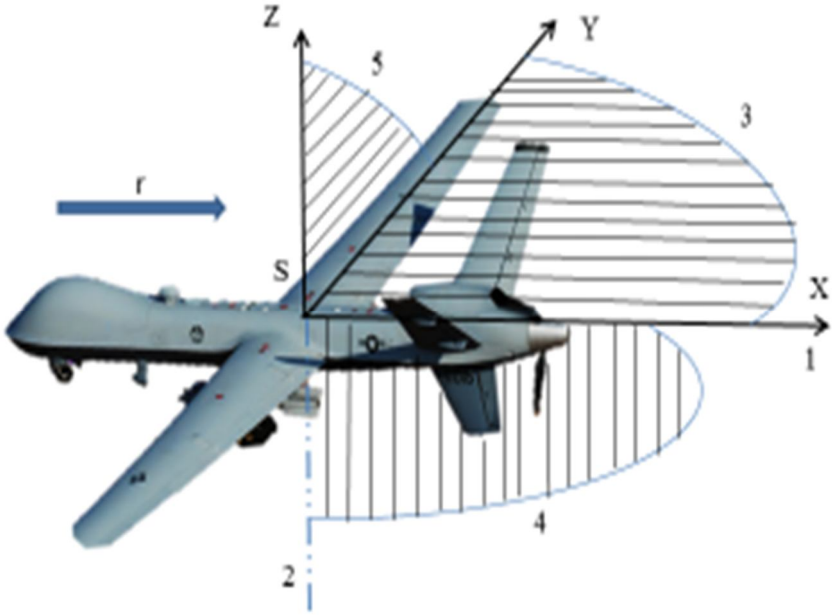


Рис. 1. Система координат БЛА

Fig. 1. UAV coordinate system

Начало *S* разместим в центре проекции цифровой фотокамеры, который расположен в центре тяжести БЛА. Ось *SX* направим вдоль продольной оси БЛА в сторону полёта *r*, а оси *SY* и *SZ* – соответственно влево и вверх относительно направления полёта. Очевидно, что в штатном режиме горизонтального полёта БЛА его продольная ось *SX* совпадает с местной горизонталью 1 и перпендикулярна местной вертикали 2. При этом плоскость 3 параллельна плоскости местного горизонта, а плоскости 4 и 5 перпендикулярны к ней соответственно в вертикальном и поперечном направлении. Будем далее полагать, что штатный режим полёта БЛА представляет собой прямолинейный горизонтальный маршрут (рис. 2).

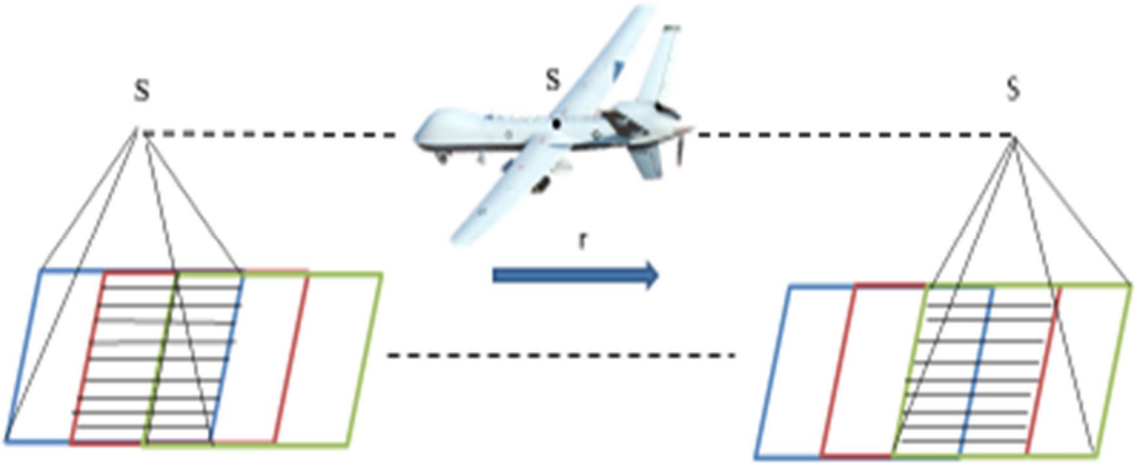


Рис. 2. Режим штатного горизонтального полёта БЛА

Fig. 2. The mode of regular horizontal flight of the UAV

Под таким режимом полёта здесь и далее понимается отсутствие программных (координированных) маневров БЛА по углам тангажа, крена и рыскания. При этом будем считать, что после выхода БЛА на заданную траекторию сигналы от навигационных спутников какое-то время поступают и используются системой автоматического управления БЛА в штатном режиме. Параллельно этому бортовой цифровой фотокамерой на матрицах ПЗС производится непрерывная регистрация перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, причём главная оптическая ось камеры направлена в надир, т. е.перпендикулярно продольной оси БЛА. При этом непрерывно производятся идентификация минимум одной соответственной точки в зонах перекрытия смежных снимков $(i, i+1)$ и определение их продольных $p_ш$ и поперечных $q_ш$ параллаксов, где i – порядковый номер снимков.

Положим далее, что в какой-то момент времени произошла потеря сигналов от спутников и в этих условиях возникли некоординированные отклонения маршрута полёта БЛА углам тангажа ν, крена ω и рыскания τ. Очевидно, что в этом случае из каких-либо центров проекций $S_{i^*} = S_1$ и $S_{i^*+1} = S_2$ будут получены перекрывающиеся изображения P_1 и P_2 (рис. 3, а).

При этом очевидно, что первое изображение будет получено в штатном режиме горизонтального полёта, а второе – в условиях отклонений БЛА от заданной траектории. Поэтому здесь и далее первое изображение будем называть горизонтальным, а второе – наклонным.

Введём следующие параметры, которые полностью характеризуют величину и направления отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полёта.

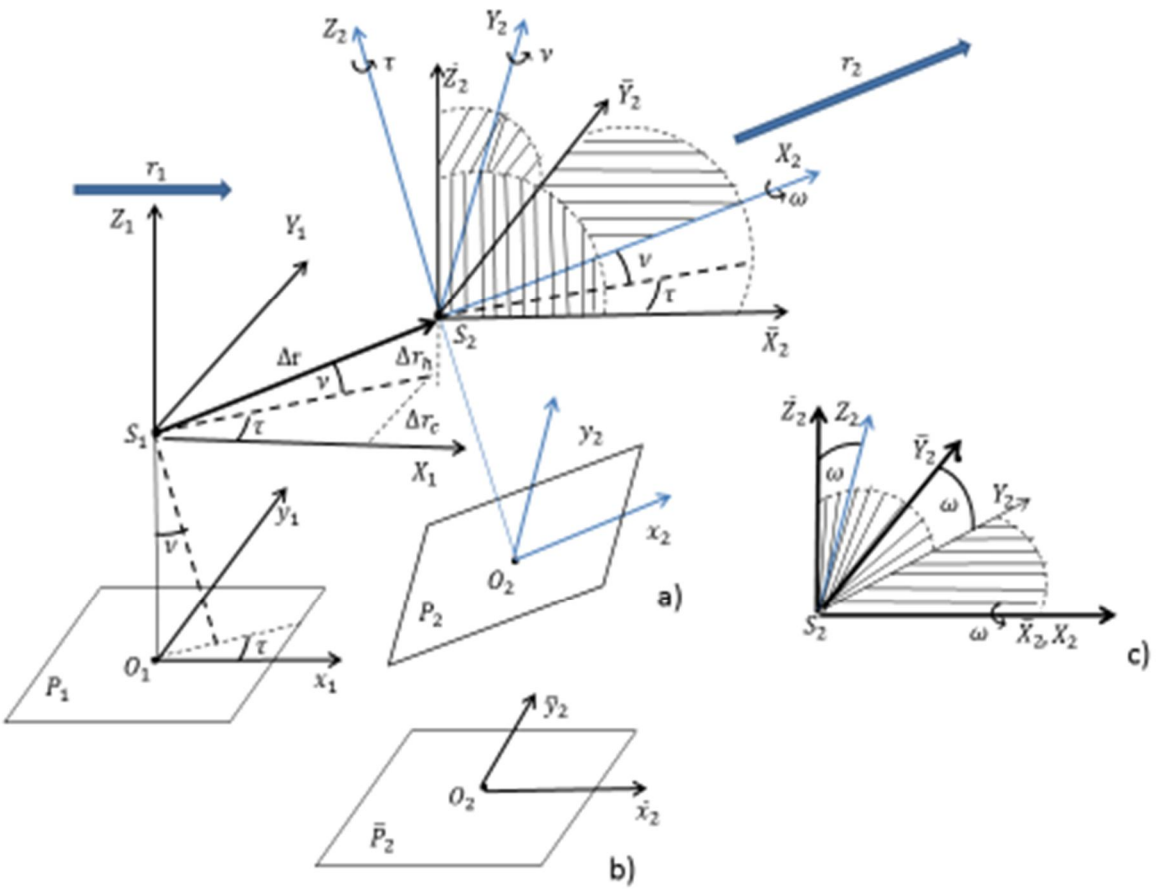


Рис. 3. Взаимная ориентация изображений P_1, P_2 и $\bar{P}_2$

Fig. 3. Mutual orientation of images P_1, P_2 and $\bar{P}_2$

Угловые параметры: ν – угол между продольной осью БЛА и плоскостью местного горизонта; ω – угол между поперечной осью БЛА и плоскостью местного горизонта; τ – угол между продольной осью БЛА при горизонтальной траектории полёта БЛА и её проекцией на горизонтальную плоскость при наклонной траектории.

Линейные параметры: $\Delta r_c = \Delta r_S \operatorname{tg} \tau$ – отклонения траектории r_2 от r_1 по направлению полёта БЛА; $\Delta r_h = \Delta r_S (\operatorname{tg} \nu / \cos \tau)$ – отклонения траектории r_2 от r_1 по высоте полёта БЛА, где Δr_S – расстояние между центрами проекций S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта.

Введём далее СК БЛА $S_1X_1Y_1Z_1$ и $S_2X_2Y_2Z_2$, а также СК изображений $O_1x_1y_1$, $O_2x_2y_2$, начала которых O_1 и O_2 расположим в геометрических центрах изображений P_1 и P_2, а оси направим параллельно соответствующих осей СК БЛА. Эти СК назовём базисными. Будем также считать, что имеется виртуальное горизонтальное изображение $\bar{P}_2$ (рис. 3, б), которое получено путём трансформирования наклонного изображения P_2 в горизонтальную проекцию. Введём

вспомогательные СК $O_2\bar{x}_2\bar{y}_2$ и $S_2\bar{X}_2\bar{Y}_2\bar{Z}_2$, которые параллельны друг другу и осям СК $O_1x_1y_1$.

С учётом изложенного определим взаимную ориентацию осей СК $O_2x_2y_2$ и $O_2\bar{x}_2\bar{y}_2$ путём совмещения осей СК $S_2X_2Y_2Z_2$ и $S_2\bar{X}_2\bar{Y}_2\bar{Z}_2$. Для этого отметим следующее.

Поскольку угол ν считается положительным, если продольная ось БЛА находится выше горизонтальной плоскости, положительное направление смещённой оси S_2Z_2 будет отклонено относительно местной вертикали так, как показано на рисунке 3, а, а именно в обратную сторону от направления полёта. Тогда совмещение осей S_2Z_2 и $S_2\bar{Z}_2$ производится путём вращения СК $S_2X_2Y_2Z_2$ вокруг оси S_2Y_2 на угол $-\nu$ против часовой стрелки или вращением СК $S_2\bar{X}_2\bar{Y}_2\bar{Z}_2$ вокруг оси $S_2\bar{Z}_2$ на угол ν по часовой стрелке. Угол ω (см. рис. 3, с) считается положительным, если положительное направление смещённой оси S_2Y_2 находится ниже плоскости местного горизонта. При этом ось S_2Y_2 совмещается с осью $S_2\bar{Y}_2$ поворотом вокруг первой оси на угол $-\omega$ против часовой стрелки или вокруг второй – на угол ω по часовой стрелке. Угол τ считается положительным, если положительное направление смещённой оси S_2X_2 находится справа по направлению полёта БЛА. В этом случае оси S_2X_2 и $S_2\bar{X}_2$ совмещаются путём поворота вокруг первой оси на угол $-\tau$ против часовой стрелки или вокруг второй – на угол τ по часовой стрелке. Будем выполнять вращения вокруг осей СК $S_2X_2Y_2Z_2$ против часовой стрелки на углы $-\tau$, $-\omega$ и $-\nu$ в следующей последовательности: $S_2Z_2 \to S_2X_2 \to S_2Y_2$. Тогда матрица направляющих косинусов

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \qquad (1)$$

описывающая взаимную ориентацию осей СК $O_2x_2y_2$ и $O_2\bar{x}_2\bar{y}_2$, будет формироваться путём перемножение полученных матриц поворотов A_τ, A_ω, A_ν в обратном порядке [14] и иметь следующий вид:

$$A = A_\nu A_\omega A_\tau, \qquad (2)$$

где $A_\nu = \begin{vmatrix} \cos\nu & 0 & -\sin\nu \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\nu & 0 & \cos\nu \end{vmatrix}$;

$$A_\omega = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{vmatrix};$$

$$A_\tau = \begin{vmatrix} \cos\tau & \sin\tau & 0 \\ -\sin\tau & \cos\tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$a_{11} = \cos\nu\cos\tau - \sin\nu\sin\omega\sin\tau$;

$a_{12} = -\cos\nu\sin\tau - \sin\nu\sin\omega\cos\tau$;

$a_{13} = -\sin\nu\cos\omega$;

$a_{21} = \cos\omega\sin\tau$;

$a_{22} = \cos\omega\cos\tau$;

$a_{23} = -\sin\omega$;

$a_{31} = \sin\nu\cos\tau + \cos\nu\sin\omega\sin\tau$;

$a_{32} = -\sin\nu\sin\tau + \cos\nu\sin\omega\cos\tau$;

$a_{33} = \cos\nu\cos\omega$. (3)

С учётом выражений (1) – (2) связь плоских координат точек изображений P_2 и $\bar{P}_2$ будет определяться следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x_2 = -f\dfrac{a_{11}\bar{x}_2 + a_{21}\bar{y}_2 - a_{31}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}, \\ y_2 = -f\dfrac{a_{12}\bar{x}_2 + a_{22}\bar{y}_2 - a_{32}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}. \end{cases} \quad (4)$$

В качестве характеристик перекрывающихся изображений, позволяющих оценить возникновение и уровень некоординированных отклонений маршрута полёта БЛА от заданной траектории, будем использовать разницу значений продольных и поперечных параллаксов изображений $P_1, \bar{P}_2$ и P_1,P_2. Учитывая определения параллаксов и принятые в формулах (1) – (4) обозначения, запишем:

$$p_1 = x_1 - \bar{x}_2; q_1 = y_1 - \bar{y}_2. \quad (5)$$

$$p_2 = x_1 - x_2; q_2 = y_1 - y_2. \quad (6)$$

В выражениях (5) – (6) p_1, q_1 – продольный и поперечный параллаксы точек на перекрывающихся горизонтальных изображениях P_1, $\bar{P}_2$; p_2, q_2 – продольные и поперечные параллаксы точек на перекрывающихся изображениях P_1, P_2, последнее из которых получено в нештатном режиме.

Найдём разницу параллаксов $\Delta p = p_2 - p_1$ и $\Delta q = q_2 - q_1$. С учётом выражения (4) имеем:

$$\Delta p = \bar{x}_2 + f\frac{a_{11}\bar{x}_2 + a_{21}\bar{y}_2 - a_{31}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}; \quad (7)$$

$$\Delta q = \bar{y}_2 + f\frac{a_{12}\bar{x}_2 + a_{22}\bar{y}_2 - a_{32}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}. \quad (8)$$

Аппроксимируем выражения $\Delta r_c = \Delta r_S \operatorname{tg}\tau$, $\Delta r_h = \Delta r_S\,(\operatorname{tg}\nu/\cos\tau)$ и соотношения (3) на основе известных разложений тригонометрических функций $\sin x$, $\cos x$ в ряд Тейлора [15]: $\sin x = x$; $\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2$; $\operatorname{tg} x = x$. Отбросив слагаемые, содержащие произведения и степени углов больше второго порядка (например, $\tau^2\nu$, $\nu\omega\tau$), получим:

$$\Delta r_c = \Delta r_S \tau; \quad (9)$$

$$\Delta r_h = \Delta r_S[\nu/(1 - \tfrac{1}{2}\tau^2)]; \quad (10)$$

$$a_{11} = 1 - \tfrac{1}{2}(\nu^2 + \tau^2),\ \ a_{12} = -(\nu\omega + \tau),$$
$$a_{13} = -\nu,\ \ a_{21} = \tau,$$
$$a_{22} = 1 - \tfrac{1}{2}(\omega^2 + \tau^2),\ a_{23} = -\omega,$$
$$a_{31} = \nu + \omega\tau,\ \ a_{32} = -\nu\tau + \omega.$$
$$a_{33} = 1 - \tfrac{1}{2}(\nu^2 + \omega^2). \quad (11)$$

Подставив выражения (11) в (7)–(8), после несложных преобразований имеем:

$$\Delta p = \bar{x}_2 - P(1 - \gamma)^{-1}; \quad (12)$$

$$\Delta q = \bar{y}_2 - Q(1 - \gamma)^{-1}, \quad (13)$$

где $P = \bar{x}_2 - \frac{1}{2}\bar{x}_2(\nu^2 + \tau^2) +$

$$+\bar{y}_2\tau - f(\nu + \omega\tau);$$

$$Q = \bar{y}_2 - \frac{1}{2}\bar{y}_2(\omega^2 + \tau^2) -$$

$$-\bar{x}_2(\nu\omega + \tau) - f(\omega - \nu\tau);$$

$$\gamma = -\frac{\bar{x}_2}{f}\nu - \frac{\bar{y}_2}{f}\omega + \frac{1}{2}(\nu^2 + \omega^2).$$

Аппроксимируем далее выражение $(1 - \gamma)^{-1}$ на основе его известного разложения [15] в ряд: $(1 - \gamma)^{-1} = 1 +$

$+\gamma+\gamma^2+\cdots$ и, отбросив слагаемые, содержащие произведения углов и/или координат больше второго порядка (например, $\tau^2\nu$, $\nu\omega\tau, \bar{x}_2\bar{y}_2{}^2$), окончательно получим:

$$\Delta p = \frac{1}{2}\bar{x}_2(\tau^2-\omega^2) - \bar{y}_2(\nu\omega+\tau) + \\ +f(\omega\tau+\nu) + \frac{\bar{x}_2\bar{y}_2}{f}(\nu\tau+\omega) - \bar{x}_2\nu^2 + \\ +\frac{\bar{x}_2{}^2}{f}\nu + \frac{\bar{y}_2{}^2}{f}\omega\tau; \quad (14)$$

$$\Delta q = \frac{1}{2}\bar{y}_2(\tau^2-\nu^2) + \bar{x}_2(\tau-\nu\omega) + \\ +f(\omega-\nu\tau) + \frac{\bar{x}_2\bar{y}_2}{f}(\nu-\omega\tau) - \bar{y}_2\omega^2 + \\ \frac{\bar{y}_2{}^2}{f}\omega - \frac{\bar{x}_2{}^2}{f}\nu\tau. \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение

Выражения (9) – (10) и (14) – (15) описывают математическую модель разницы параллаксов двух пар перекрывающихся изображений в поле вспомогательных СК. При этом первая пара включает в себя два горизонтальных изображения, а вторая – горизонтальное и наклонное изображения. Нетрудно убедиться, что относительная погрешность расчёта разницы параллаксов в соответствие с выражениями (14)–(15), обусловленная аппроксимацией строгих соотношений (7)–(8), не превышает 0,9%. Таким образом, параметры $\Delta p, \Delta q$ представляют собой разницу параллаксов соответственных точек перекрывающихся снимков, полученных в различных режимах полёта БЛА. В штатном режиме полёта БЛА все перекрывающиеся снимки по условиям задачи являются горизонтальными, а в нештатном – один снимок является горизонтальным, а второй – наклонным, т. е. полученным при некоординированных отклонениях БЛА по углам тангажа, крена и рыскания. Из выражений (14)–(15) следует, что при $\nu = \omega = \tau = 0$ разница параллаксов $\Delta p = \Delta q = 0$.

Поскольку для перекрывающихся горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полёта БЛА, справедливы соотношения следующие [7]:

$$\begin{cases} p_{ш} = x_{i+1} - x_i = const, \\ q_{ш} = y_{i+1} = y_i = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Очевидно, что разница параллаксов точек на смежных парах изображениях свидетельствует о появлении некоординированных отклонений БЛА.

Для оценки степени изменений параллаксов были проведены исследования чувствительности модели к величине угловых отклонений БЛА. Исследования проводились на основе экспериментальных данных (табл. 1), сформированных для двух точек 1 и 2 модельных перекрывающихся горизонтальных снимков P_1и $\bar{P}_2$ (рис. 4). При этом за основу были взяты характеристики цифровой фотокамеры Nicon P700 [13; 15].

Таблица 1. Экспериментальные контрольные данные

Table 1. Experimental control data

Матрица ПЗС	Параметры		Плоские координаты точек
	съёмки	снимков	
Длина: 8 мм. Ширина: 6 мм; Число пикселей: 3648 на 2736. Размер пикселя: $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ м	Фокусное расстояние фотокамеры: $f = 2{,}4$ мм. Высота съёмки: $H = 285$ м. Расстояние S_1S_2: $\Delta r_S = 95$ м	-4 мм $\leq x_1, \bar{x}_2 \leq 4$ мм; -3 мм $\leq y_1, \bar{y}_2 \leq 3$ мм. Коэффициент перекрытия снимков P_1и $\bar{P}_2$: 50%. Значения параллаксов в штатном режиме горизонтального полёта БЛА: $p_1 = x_1 - \bar{x}_2 = 4$ мм; $q_1 = y_1 - \bar{y}_2 = 0$	1 точка: $x_1^{(1)} = 2$ мм, $y_1^{(1)} = 1{,}5$ мм, $\bar{x}_2^{(1)} = -2$ мм, $\bar{y}_2^{(1)} = 1{,}5$ мм. 2 точка: $x_1^{(2)} = 2$ мм, $y_1^{(2)} = -1{,}5$ мм, $\bar{x}_2^{(2)} = -2$ мм, $\bar{y}_2^{(2)} = -1{,}5$ мм

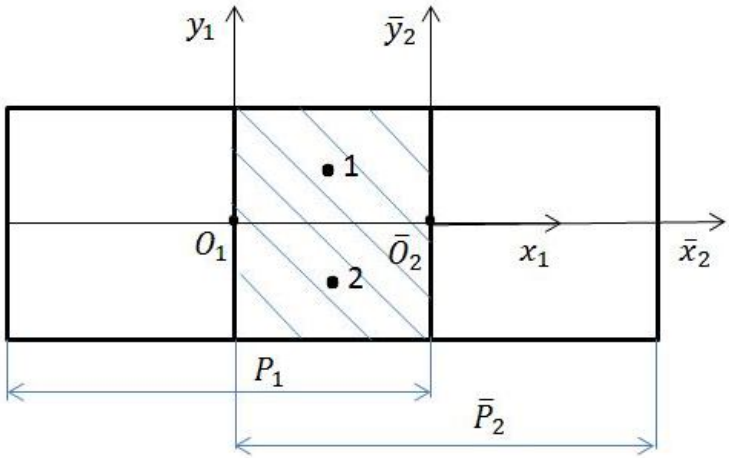


Рис. 4. Модельные снимки

Fig. 4. Model shots

Полученные по формулам (14) – (15) оценки совместного влияния угловых отклонений БЛА на величину изменений $\Delta p, \Delta q$ параллаксов для точек 1 и 2 перекрывающихся изображений представлены ниже (табл. 2).

Для определения степени раздельного влияния каждого из углов ν, ω, τ на величину изменений параллаксов $\Delta p_\nu, \Delta p_\tau, \Delta p_\omega, \Delta q_\nu, \Delta q_\tau \Delta q_\omega$ в формулах (14) – (15) полагалось, что $\tau = \omega = 0$; $\nu = \omega = 0$; $\nu = \tau = 0$. Полученные результаты приведены ниже (табл. 3).

Таблица 2. Оценки общего уровня изменений параллаксов

Table 2. Estimates of the overall level of parallax changes

Изменения параллаксов, мм	Параметры отклонений по углам		
	$\nu = \tau = \omega$, град		
	1	3	5
$\Delta p_1/\Delta p_2$	0,024/0,121	0,076/0,379	0,134/0,656
$\Delta q_1/\Delta q_2$	0,001/0,044	–0,002/0,130	–0,010/0,212

Таблица 3. Оценки частных уровней изменения параллаксов

Table 3. Estimates of particular levels of parallax measurement

Изм. парал-лаксов, мм	Параметры отклонений по углам								
	$\tau = \omega = 0$			$\nu = \omega = 0$			$\nu = \tau = 0$		
	ν, град			τ, град			ω, град		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Точка 1									
Δp_ν	0,071	0,218	0,370						
Δp_τ				-0,026	-0,081	-0,138			
Δp_ω							-0,021	-0,063	-0,101
Δq_ν	-0,022	-0,067	-0,115						
Δq_τ				-0,035	-0,103	-0,169			
Δq_ω							0,058	0,171	0,280
Точка 2									
Δp_ν	0,071	0,218	0,370						
Δp_τ				0,026	0,076	0,123			
Δp_ω							0,022	0,068	0,117
Δq_ν	0,022	0,067	0,115						
Δq_τ				-0,035	-0,107	-0,180			
Δq_ω							0,058	0,179	0,303

Рассмотрим отклонения траектории БЛА по высоте Δr_h и направлению полёта Δr_c, полученные по формулам (9) – (10) (табл. 4).

Анализ полученных результатов моделирования позволяет отметить следующее. При прямолинейном горизонтальном полёте БЛА по заданной траектории продольные параллаксы точек перекрывающихся снимков видеопотока не изменяются, а поперечные – равны нулю. Возникновение разницы в значениях продольных параллаксов смежных пар снимков и отличий от нуля их попе-

речных параллаксов может служить критерием возникновения некоординированных отклонений маршрута полёта БЛА от заданной траектории по высоте и направлению полёта.

Таблица 4. Отклонения БЛА по высоте и направлению полёта

Table 4. UAV deviations in altitude and direction of flight

Отклонения траектории БЛА по высоте и направлению полёта, м	Отклонения по углам $\nu = \tau = \omega$, град		
	1	3	5
Δr_h	1,7	5,0	8,3
Δr_c	1,7	5,0	8,3

Величина изменений параллаксов в нештатном режиме зависит от расположения соответственных точек в зоне перекрытия снимков, фокусного расстояния цифровой камеры и линейно возрастает с увеличением уровня некоординированных отклонений по углам тангажа, крена и рыскания, что позволяет оценить их уровень. При этом уровень изменения параллаксов в случае возникновения нештатного режима составляет 4%, 11% и 18% при отклонениях по всем углам соответственно на один, три и пять градусов. Определяющий вклад в уровень изменения продольного параллакса вносят отклонения по углу тангажа, а поперечного – по углу крена. При этом в обоих случаях он составляет порядка 50%.

Отметим также, что угловые отклонения в один, три и пять градусов приводят к изменениям траектории как по высоте, так и направлению полёта БЛА соответственно на 2%, 5% и 8% от расстояния между центрами проекций S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта.

Выводы

1. При прямолинейном горизонтальном полёте беспилотных летательных аппаратов по заданной траектории продольные параллаксы точек перекрывающихся снимков видеопотока не изменяются, а поперечные – равны нулю. Возникновение разницы в значениях продольных параллаксов смежных пар снимков и отличия от нуля их поперечных параллаксов служит критерием автоматического обнаружения некоординированных отклонений маршрута полёта от заданной траектории по высоте и направлению полёта.

2. Разработанная модель основана на аппроксимации функциональной связи изменений параллаксов смежных пар перекрывающихся изображений подстилающей поверхности и параметров угловых и линейных отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории, что позволяет её использовать в задачах автоматического обнаружения и оценки уровня этих отклонений.

3. Уровень изменений как продольного, так и поперечного параллакса при возникновении некоординированных отклонений по углам тангажа, крена и рыскания линейно возрастает с их увеличением и при углах от одного до пяти градусов составляет от четырёх до 18% от значений параллаксов в штатном горизонтальном полёте.

4. Определяющий вклад в уровень изменений продольного и поперечного параллакса, составляющий в обоих случаях 50%, вносят отклонения беспилотных летательных аппаратов соответственно по углам тангажа и крена.

5. Уровень относительной погрешности расчёта изменений продольного и поперечного параллаксов, обусловленной аппроксимацией полученных строгих выражений, не превышает 0,6%.

Список литературы

1. Hosseini K., Ebadi H., Farnood F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution Ahmadi images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. N 48(12). P. 1675-1689. https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4.

2. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits // Journal of applied engineering science. 2018. Vol. 16, N 1. P. 107-110.

3. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. N 34(6). P. 652-661.

4. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles / L. Arulmurugan, S. Raghavendra Prabhu, M. Ilangkumaran, V. Suresh, R. Saravanakumar, R. M. Raghunath // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2020. N 995(1). P. 012019. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf (дата обращения: 14.12.2021).

5. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle / S. Luo, H. Liu, M. Hu, J. Dong // Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42, N 6. P. 1-10.

6. Салычев О. С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой – основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. URL: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf (дата обращения: 14.12.2021).

7. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д. А. Антонов, М. В. Жарков, И. М. Кузнецов, Е. М. Лунев, А. Н. Пронькин // Труды МАИ. 2016. Вып. 91. С. 1-26.

8. Андронов В. Г., Емельянов С. Г. Автономное определение элементов внешнего ориентирования космических снимков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2(19). С. 77-87.

9. Андронов В. Г., Емельянов С. Г. Метод автономной навигации космических аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2(65). С. 65-73.

10. Андронов В. Г., Емельянов С. Г. Астронавигация космических аппаратов на круговых околоземных орбитах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3(66). С. 34-44.

11. Андронов В. Г. Технология априорной оценки качества космической оптико-электронной съёмки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 3(54). 2014. С. 8-12.

12. Андронов В. Г. Априорная оценка качества космической оптико-электронной съёмки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 1. С. 36-40.

13. Раков Д. Н., Никитин В. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъёмочного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 7. С. 27-36.

14. Гермак О. В. Определение элементов взаимного ориентирования снимков // Интернет-журнал «Науковедение». 2012. № 4. С. 1-5.

15. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА / А. А. Ардентов, И. Ю. Бесчастный, А. П. Маштаков [и др.] // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3, № 3(12). С. 23-38.

References

1. Hosseini K., Ebadi H., Farnood F. Ahmadi Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2020, no. 48(12), pp. 1675-1689. https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4.

2. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 107-110.

3. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*, 2019, no. 34(6), pp. 652-661.

4. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilangkumaran M., Suresh V., Saravanakumar R. R., Raghunath M. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 995(1), pp. 012019. Available at: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf. (accessed 14.12.2021)

5. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. Guofang Keji Daxue Xuebao. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, vol. 42, no. 6, pp. 1-10.

6. Salychev O. S. Avtopilot BPLA s inertsial'noi integrirovannoi sistemoi – osnova bezopasnoi ekspluatatsii bespilotnykh kompleksov [UAV autopilot with an Inertial Integrated System is the basis for the safe operation of unmanned complexes]. Available at: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf. (accessed 14.12.2021)

7. Antonov D. A., Zharkov M. V., Kuznetsov I. M., Lunev E. M., Pronkin A. N. Opredelenie navigatsionnykh parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata na baze fotoizobrazheniya i inertsial'nykh izmerenii [Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2016, is. 91, pp. 1-26.

8. Andronov V. G., Yemelyanov S. G. Avtonomnoe opredelenie elementov vneshnego orientirovaniya kosmicheskikh snimkov [Autonomous determination of elements of external orientation of satellite images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo univeriteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 2(19), pp. 77-87.

9. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Metod avtonomnoi navigatsii kosmicheskikh apparatov [Method of autonomous navigation of spacecraft]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo univeriteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 2(65), pp. 65-73.

10. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Astronavigatsiya kosmicheskikh apparatov na krugovykh okolozemnykh orbitakh [Astronavigation of spacecraft in circular near-Earth orbits]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo univeriteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 3(66), pp. 34-44.

11. Andronov V. G. Tekhnologiya apriornoi otsenki kachestva kosmicheskoi optiko-elektronnoi s"emki [Technology of a priori assessment of the quality of space optical-electronic survey]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo univeriteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2014, no. 3(54), pp. 8-12.

12. Andronov V. G. Apriornaya otsenka kachestva kosmicheskoi optiko-elektronnoi s"emki [A priori assessment of the quality of space optical-electronic survey]. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo univeriteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2014, no. 1, pp. 36-40.

13. Rakov D. N., Nikitin V. N. Vybor tsifrovogo nemetricheskogo fotoapparata dlya bespilotnogo aerofotos"emochnogo kompleksa [The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex]. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2012, no. 7, pp. 27-36.

14. Germak O. V. Opredelenie elementov vzaimnogo orientirovaniya snimkov [Determination of elements of mutual orientation of images]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie" = Online Journal "Science Studies"*, 2012, no. 4, pp. 1-5.

15. Ardentov A. A., Beschastny I. Y., Mashtakov A. P., eds. Algoritmy vychisleniya polozheniya i orientatsii BPLA [Algorithms for calculating the position and orientation of the UAV]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software Systems: Theory and Applications*, 2012, vol. 3, no. 3(12), pp. 23-38.

Информация об авторах / Information about the Authors

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: vladia58@mail.ru

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

Князев Александр Александрович, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: 163497.12@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4976-8646

Vladimir G. Andronov, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Researcher Officer, Professor, Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: vladia58@mail.ru

Andrey A. Chuev, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2980-0533

Alexander A. Knyazev, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: 163497.12@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4976-8646

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-145-159

CC BY 4.0

Прогнозирование возникновения и развития фатальных сосудистых осложнений при COVID-19 с использованием нечетких математических моделей

А. В. Быков[1], Н. А. Кореневский[1] ✉, А. В. Винников[1], А. И. Безуглов[1]

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

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования *является разработка метода прогнозирования возникновения и развития тромботических осложнений (тромботических прецедентов), провоцируемых действием новой коронавирусной инфекции (COVID-19) на организм человека, позволяющего усовершенствовать лечебно-диагностические мероприятия для пациентов с данной патологией.*

Методы. *В качестве базового математического аппарата была выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, хорошо зарекомендовавшая себя в процессе решения задач с нечётким описанием исследуемых классов со структурой данных аналогичной решаемой в работе задачи.*

Результаты. *В ходе проводимых исследований были синтезированы математические модели прогнозирования возникновения и развития тромботических прецедентов. Экспертное оценивание и математическое моделирование показали, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу появления и развития исследуемого класса тромботических осложнений превышает величину 0,9. В работе получены нечёткие математические модели прогнозирования возникновения и развития тромботических прецедентов у людей с подтверждённой коронавирусной инфекцией, для которой ведущим фактором риска является вторичный антифосфолипидный синдром с возникновением микроангиопатии.*

Заключение. *В ходе проведенных исследований была показана целесообразность использования полученных результатов в практике работы таких врачей, как иммунологи, инфекционисты, пульмонологи, кардиологи и сердечно-сосудистые хирурги.*

© Быков А. В., Кореневский Н. А., Винников А. В., Безуглов А. И., 2022

Ключевые слова: *коронавирусная инфекция (COVID-19); антифосфолипидный синдром; прогнозирование тромботических осложнений; тромботический прецедент; математические модели; нечеткая логика принятия решений.*

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

Для цитирования: Прогнозирование возникновения и развития фатальных сосудистых осложнений при COVID-19 с использованием нечетких математических моделей / А. В. Быков, Н. А. Кореневский, А. В. Винников, А. И. Безуглов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 145–159. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-12-1-145-159.

Поступила в редакцию 10.01.2022 *Подписана в печать 07.02.2022* *Опубликована 29.03.2022*

Prediction of the Occurrence and Development of Fatal Vascular Complications in COVID-19 Using Fuzzy Mathematical Models

Alexander V. Bykov[1], Nikolay A. Korenevsky[1] ✉, Artem V. Vinnikov[1], Alexander I. Bezuglov[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of research *is to develop a method for predicting the occurrence and development of thrombotic complications (thrombotic precedents) provoked by the action of a new coronavirus infection (COVID-19) on the human body, which allows improving therapeutic and diagnostic measures for patients with this pathology.*
Methods. *The methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules was chosen as the basic mathematical apparatus, which proved itself well in the process of solving problems with a fuzzy description of the classes under study with a data structure similar to the problem being solved in the work.*
Results. *In the course of the research, mathematical models for predicting the occurrence and development of thrombotic precedents were synthesized. Expert evaluation and mathematical modeling have shown that confidence in the correct decision-making on the prognosis of the occurrence and development of the studied class of thrombotic complications exceeds 0.9. The paper presents fuzzy mathematical models for predicting the occurrence and development of thrombotic precedents in people with confirmed coronavirus infection, for which the leading risk factor is secondary antiphospholipid syndrome with the occurrence of microangiopathy.*
Conclusion. *In the course of the conducted studies, the expediency of using the results obtained in the practice of such doctors as immunologists, infectious disease specialists, pulmonologists, cardiologists and cardiovascular surgeons was shown.*

Keywords: *coronavirus infection (COVID-19); antiphospholipid syndrome; prediction of thrombotic complications; thrombotic precedent; mathematical models; fuzzy logic of decision-making.*

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

For citation: Bykov A. V., Korenevskiy N. A., Vinnikov A. V., Bezuglov A. I. Prediction of the Occurrence and Development of Fatal Vascular Complications in COVID-19 Using Fuzzy Mathematical models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 145–159. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-146-159.

Received 10.01.2022 *Accepted 07.02.2022* *Published 29.03.2022*

Введение

Большое количество исследований показало, что при инфекции COVID-19 протекает агрессивный воспалительный ответ с выбросом значительного количества провоспалительных цитокинов, который называется «цитокиновый шторм». Иммунный ответ организма человека на вирус SARS-CoV-2 является гиперактивным, что вызывает чрезмерную воспалительную реакцию. В некоторых работах, посвященных анализу профилей цитокинов у пациентов с коронавирусной инфекцией, отражено, что чрезмерное повышение количества цитокинов напрямую коррелирует с возникновением повреждений лёгких, полиорганной недостаточностью, а также неблагоприятным прогнозом тяжелого течения COVID-19 [1; 2; 3; 4].

Активная цитокиновая реакция в период развёртывания основных клинико-патологических проявлений болезни ассоциирована с образованием антител к фосфолипидам. Вторичный антифосфолипидный синдром (АФС) приводит к микроангиопатии и провоцирует локальный ДВС синдром. Коагулопатия потребления про- и антикоагулянтов в первичных очагах (лёгочная ткань) приводит, с одной стороны, к усугублению эндотелиальной дисфункции в изначально поражённых магистральных сосудах, с другой – к дефициту антикоагулянтной и фибринолитической защиты [5]. Это способствует образованию свежих тромботических масс в поражённых атеросклерозом артериях и варикозно-изменённых венах и, как следствие, их миграции в жизненно важные органы. Патологический процесс в артериях вызывает инфаркты в головном мозге (ишемические инсульты), почках (инфаркт почки), верхних и нижних конечностях (гангрену конечностей) [6; 7; 8]. Тромботические массы из магистральных и подкожных вен током крови направляются в лёгочную артерию или её ветви, приводя к тромбоэмболии и развитию острой сердечно-сосудистой недостаточности и (или) летальному исходу. Следовательно, ранняя оценка активности АФС с определением антител к фосфолипидам, уровня прокоагулянтов, антикоагулянтных факторов и продуктов фибринолиза позволит адресно проводить профилактическую и лечебную поддержку при наличии хронических сердечно-сосудистых заболеваний [9; 10].

Для повышения эффективности прогностических решающих правил в данном исследовании была использована методология синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), подробно описанная в работах кафедры биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета (БМИ ЮЗГУ) [11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25].

Материалы и методы

Группу наблюдения составили 40 пациентов с подтвержденным диагнозом COVID-19, среди которых присутствуют больные, страдающие ишемической болезнью сердца (5 человек), варикозной и посттромботической болезнью нижних конечностей (15 человек), мультифокальным атеросклерозом с поражением коронарных артерий (в том числе и с постинфарктным кардиосклерозом), артерий нижних конечностей и брахиоцефальных артерий (20 человек). Пациенты были рандомизированы по возрасту (30-45, 46-55, 56-65, 66-75 лет) и полу, а также по наличию сердечно-сосудистой патологии.

При проведении разведочного анализа было установлено, что задача прогнозирования возникновения и развития тромботических осложнений, вызываемых действием новой коронавирусной инфекции (COVID-19) на организм человека, носит нечеткий характер. Данное обстоятельство делает целесообразным выбор методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил с учётом данных разведочного анализа и использование технологии мягких вычислений с широким привлечением экспертов исследуемой области для решения поставленной задачи [12; 13; 14; 19; 21].

В рамках исследования были сформированы 2 группы, сопоставимые по всем признакам. Прогнозирование развития тромботических эксцессов в 1-й группе осуществлялось при использовании классических рисковых шкал Wells (табл. 1), Caprini (табл. 2).

Метод прогнозирования, применяемый в 1-й группе наблюдения, показал неудовлетворительные результаты, по мнению экспертов, в связи с чем во 2-й группе прогнозирование осуществлялось с учётом уровня следующих показателей, предложенных экспертами:

1. Волчаночный антикоагулянт (LA) (X_1).
2. Антитела к кардиолипину (aCL) (X_2).
3. Антитела к $ß_2$-гликопротеину 1 класса ($aß_2GP1$) (X_3).
4. АЧТВ (X_4).
5. ПТИ (X_5).
6. АТ-3 (X_6).
7. Фибриноген (Fb) (X_7).
8. Д-димер (DD) (X_8).

Таблица 1. Шкала оценки риска тромбоза глубоких вен (Wells P. S.) [26]

Table 1. Deep Vein Thrombosis Risk Assessment Scale (Wells P. S.) [26]

Клиническая особенность	Баллы
Активный рак (химиотерапия в течение ближайших 6 месяцев или паллиативное лечение)	1
Паралич, парез или иммобилизация нижней конечности	1
Постельный режим более 3 дней, операция в течение 4 недель	1
Локальная болезненность по ходу глубоких вен	1
Увеличение объема нижней конечности	1
Одностороннее увеличение голени более чем на 3 см (ниже большеберцового бугра)	1
Односторонний отёк и изъязвление нижней конечности	1
Коллатерали поверхностных вен	1
Альтернативный диагноз столь же вероятен или более вероятен, чем ТГВ	-2
Интерпретация вероятности ТГВ: – < 1 балла: низкий риск (3%) – 1–2 балла: умеренный риск (17%) – ≥ 3 балла: высокий риск (75%).	

Обозначим через x_i значение признака с номером i, $i = 1, 2, \ldots, 6$ и введем функцию оценки степени риска возникновения тромботических процессов (ТП) для каждого из признаков $f(x_i)$. Эта функция отражает влияние каждого из признаков на оценку уверенности возникновения ТП, причем увеличение функции $f(x_i)$ соответствует увеличению уверенности в том, что у пациента наступит ТП, а ее свойства и область определения соответствуют свойствам функции принадлежности классической теории нечетких множеств [14; 15; 22; 24]. С учетом общих рекомендаций МСГНРП при таких свойствах $f(x_i)$ финальная уверенность UF в развитии тромботических прецедентов по индексу гематологического стресса (ИГС), дополняющему классические шкалы в зависимости от значения с учётом COVID-19, определяется следующем выражением [13; 14]:

$$UF(i+1) = UF(i) + f(x_{i+1})[1 - UF(i)], \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \ldots, 6$; $UF(1) = f(x_1)$.

Таблица 2. Шкала оценки риска развития венозных тромбоэмболических осложнений (J. Caprini) [27]

Table 2. Risk assessment scale for venous thromboembolic complications (J. Caprini) [27]

1 балл: – возраст 41-60 лет; – отек нижних конечностей; – варикозные вены; – ИМТ > 25 кг/м^2; – малое хирургическое вмешательство (менее 60 минут); – сепсис (давностью до 1 мес.); – серьезное заболевание легких (в т.ч. пневмония давностью до 1 мес.); – прием оральных контрацептивов; – гормонозаместительная терапия; – беременность и послеродовый период (до 1 мес.); – в анамнезе: необъяснимые мертворождения, выкидыши; – острый инфаркт миокарда; – хроническая сердечная недостаточность (сейчас или в последний 1 мес.); – постельный режим у нехирургического пациента; – воспалительные заболевания толстой кишки в анамнезе; – ХОБЛ; – отеки нижних конечностей	**2 балла:** – возраст 61–74 года; – артроскопическая хирургия; – злокачественное новообразование; – лапароскопическое вмешательство (более 60 мин); – постельный режим более 72 ч; – иммобилизация конечности (давностью до 1 мес.) – катетеризация центральных вен – большое хирургическое вмешательство (> 45 мин) **3 Балла:** – возраст старше 75 лет; – личный анамнез ВТЭО; – семейный анамнез ВТЭО; – полиморфизм Vф Лейден; – полиморфизм гена IIф (протромбин) 20210A; – гипергомоцистеинемия; – гепарин-индуцированная тромбоцитопения; – повышенный уровень антител к кардиолипину; – волчаночный антикоагулянт; – другие врожденные или приобретенные тромбофилии
Градация рисков развития ВТЭО по баллам согласно ACCP 2012: – 0-1 балл – очень низкий (0,5%); – 2 балла – низкий (1,5%); – 3-4 балла – умеренный (3%); ≥ 5 баллов – высокий (6%)	**4 балла:** – инсульт (давностью до 1 мес.); – эндопротезирование крупных суставов; – перелом костей конечности или таза; – травма спинного мозга (давностью до 1 мес.)

Полученные математические модели позволяют производить оценку степени риска возникновения и развития ТП при COVID-19, например, с помощью показателя *UF* можно определить пару функций принадлежности к классам: $\omega_ф$ – риск возникновения ТП крайне высок; $\omega_о$ – риск возникновения ТП практически отсутствует.

Результаты и их обсуждение

В ходе проводимых исследований для расчетов *UF* были получены функции оценки степени риска возникновения ТП для каждого из признаков $f(x_i)$,описываемые выражениями:

$$f(x_1)=\begin{cases}0,\ если\ 0\le LA<1,2,\\ 0,2\,LA-0,24,\ если\ 1,2\le LA<1,5,\\ 0,166\,LA-0,189,\ если\ 1,5\le LA<2,\\ 0,144,\ если\ LA\ge 2;\end{cases}$$

$$f(x_2)=\begin{cases}0,\ если\ 0\le aCL<10,\\ 0,00725\,aCL-0,0725,\ если\ 10\le aCL<30,\\ 0,145,\ если\ aCL\ge 30;\end{cases}$$

$$f(x_3)=\begin{cases}0,\ если\ 0\le a\beta_2GP1<20,\\ 0,00612\,a\beta_2GP1-0,1224,\ если\ 20\le a\beta_2GP1<45,\\ 0,153,\ если\ a\beta_2GP1\ge 45;\end{cases}$$

$$f(x_4)=\begin{cases}0,105,\ если\ AЧTB\le 10,\\ -0,0075\,AЧTB+0,18,\ если\ 10<AЧTB\le 24,\\ 0,\ если\ 24<AЧTB\le 35,\\ 0,004\,AЧTB-0,14,\ если\ 35<AЧTB\le 50,\\ 0,06,\ если\ AЧTB>50;\end{cases}$$

$$f(x_5)=\begin{cases}0,055,\ если\ ПТИ\le 20,\\ -0,001375\,ПТИ+0,0825,\ если\ 20<ПТИ\le 60,\\ 0,\ если\ 60<ПТИ\le 120,\\ 0,000875\,ПТИ-0,105,\ если\ 120<ПТИ\le 200,\\ 0,07,\ если\ ПТИ>200;\end{cases}$$

$$f(x_6)=\begin{cases}0,06,\ если\ AT3\le 30,\\ -0,0012\,AT3+0,096,\ если\ 30<AT3\le 80,\\ 0,\ если\ 80<AT3\le 130,\\ 0,00175\,AT3-0,2275,\ если\ 130<AT3\le 170,\\ 0,07,\ если\ AT3>170;\end{cases}$$

$$f(x_7)=\begin{cases}0{,}144,\ \textit{если}\ Fb\le 1{,}0,\\ -0{,}144\,Fb+0{,}288,\ \textit{если}\ 1{,}0<Fb\le 2{,}0,\\ 0,\ \textit{если}\ 2{,}0<Fb\le 4{,}0,\\ 0{,}046\,Fb-0{,}184,\ \textit{если}\ 4{,}0<Fb\le 7{,}0,\\ 0{,}138,\ \textit{если}\ Fb>7{,}0;\end{cases}$$

$$f(x_8)=\begin{cases}0,\ \textit{если}\ DD\le 500;\\ 0{,}00006\,DD-0{,}03,\ \textit{если}\ 500<DD\le 1500;\\ 0{,}000034\,DD+0{,}009,\ \textit{если}\ 1500<DD\le 4000;\\ 0{,}145,\ \textit{если}\ DD>4000.\end{cases}$$

Агрегация показателей $f(x_i)$ в финальное правило UF производится в соответствии с моделью (1). В ходе следующего этапа исследования эксперты, руководствуясь рекомендациями [14; 15; 16; 22; 24], построили функции принадлежности к классам: $\omega_в$ – риск возникновения и развития ТП крайне высок; $\omega_о$ – риск возникновения и развития ТП практически отсутствует. Данные функции имеют следующий вид:

$$\mu_в(UF)=\begin{cases}0,\ \textit{если}\ 0\le UF<0{,}2,\\ 1{,}8UF-0{,}36,\\ \quad \textit{если}\ 0{,}2\le UF<0{,}7,\\ 0{,}90,\ \textit{если}\ 0{,}7\le UF<1{,}0;\end{cases}\qquad(2)$$

$$\mu_о(UF)=\begin{cases}0{,}9,\ \textit{если}\ 0\le UF<0{,}2,\\ -2{,}25UF+1{,}575,\\ \textit{если}\ 0{,}2\le UF<0{,}7,\\ 0,\ \textit{если}\ 0{,}7\le UF<1{,}0.\end{cases}\qquad(3)$$

Решение в пользу классов $\omega_в$ и $\omega_о$ принимается по максимальной величине рассчитанных функций принадлежности:

$$R=\max[\mu_в(UF),\mu_о(UF)].\qquad(4)$$

В ходе экспертного оценивания, математического моделирования и статистических испытаний показано, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу появления и развития исследуемого класса тромботических осложнений превышает величину 0,9. В дальнейшем при проведении большего числа наблюдений ожидается улучшение качества прогноза за счёт корректировки параметров предлагаемых моделей.

На основании значений параметра UF была сформирована шкала ИГС:

– I стадия: 0,2-0,3 (1 балл);

– II стадия: 0,31-0,5 (2 балла);

– III стадия: 0,51-0,7 (3 балла);

– IV стадия: 0,71-0,9 (5 баллов).

В заключение исследований было произведено сопоставление традиционного подхода основанного на использовании таблиц 1 и 2 (1-я группа наблюдения) и предложенного подхода (2-я группа наблюдения) с использованием моделей (1-4). Традиционный метод прогнозирования, применяемый в 1-й

группе наблюдения, позволил спрогнозировать 2 из 10 свершившихся тромботических прецедентов у пациентов данной группы. Во 2-й группе (предлагаемый подход) ранняя профилактика помогла в 100% случаев предотвратить тяжёлые осложнения, а в 2-х случаях (10%) – варикотромбофлебит голени, который разрешился в сроки 10-15 дней.

Выводы

В статье описан метод прогнозирования возникновения и развития тромботических прецедентов у людей при развитии коронавирусной инфекции, а также представлены нечеткие математические модели прогнозирования возникновения и развития данных осложнений. В ходе экспертного оценивания, математического моделирования и статистических испытаний показано, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу появления и развития исследуемого класса тромботических осложнений превышает величину 0,9, что позволяет рекомендовать полученные в ходе исследования результаты для внедрения в практику работы таких врачей, как иммунологи, инфекционисты, пульмонологи, кардиологи, сердечно-сосудистые хирурги. Стоит также отметить, что наиболее эффективной прогностической шкалой тромботических осложнений является модифицированная шкала Wells с применением ИГС. Данная комбинированная рисковая шкала позволяет формировать ранний прогноз тромботических осложнений и, соответственно, своевременно проводить адекватные профилактику и лечение.

Список литературы

1. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China / C. Huang [et al.] // Lancet. 2020. Vol. 395, is. 10223. P. 497-506.

2. Clinical predictors of mortality due to COVID-19 based on an analysis of data of 150 patients from Wuhan, China / Q. Ruan [et al.] // Intensive Care Med. 2020. Vol. 46, is. 5. P. 846-848.

3. Clinical and immunologic features in severe and moderate Coronavirus Disease 2019 / G. Chen [et al.] // J. Clin. Invest. 2020. Vol. 130, is. 5. P. 2620-2629.

4. Diagnostic utility of clinical laboratory data determinations for patients with the severe COVID-19 / Y. Gao [et al.] // J. Med. Virol. 2020. Vol. 92, is. 7. P. 791-796.

5. Анаев Э. Х., Княжеская Н. П. Коагулопатия при COVID-19: фокус на антикоагулянтную терапию // Практическая пульмонология. 2020. № 1. С. 3-13.

6. Грановская М. В., Заславская К. Я. COVID-19 – набор симптомов или системная патология? Клиническая лекция. Часть 1. Особенности полиорганных нарушений // Инфекционные болезни: Новости. Мнения. Обучение. 2020. № S3 (34). С. 3-9.

7. Extrapulmonary manifestations of COVID-19 / A. Gupta, M. V. Madhavan, K. Sehgal, N. Nair [et al.] // Nat. Med. 2020. N 26 (7). P. 1017-1032.

8. Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China / W. J. Guan, Z. Y. Ni, Y. Hu [et al.] // N. Engl. J. Med. 2020. P. 1708-20.

9. COVID-19 and Thrombotic or Thromboembolic Prevention, Antithrombotic Therapy, and Follow-up / B. Bikdeli, M. V. Madhavan, D. Jimenez [et al.] // JACC. 2020.

10. Thromboembolism risk of COVID-19 is high and associated with a higher risk of mortality: A systematic review and meta-analysis / Mahmoud B. Malas [et al.] // Lancet. 2020.

11. Кореневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12-20.

12. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33-35.

13. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

14. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.

15. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99-103.

16. Кореневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25-31.

17. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н. А. Кореневский, М. В. Артеменко, В. Я. Провоторов, Л. А. Новикова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 881-886.

18. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31-39.

19. Метод синтеза нечетких моделей принятия решений по оценке состояния и управлению биотехническими системами / Н. А. Кореневский, В. В. Серебровский, К. В. Разумова, И. И. Хрипина // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 68-74.

20. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Кореневский, В. И. Серебровский, Н. А. Коптева, Т. Н. Говорухина. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии имени И. И. Иванова, 2012. 231 с.

21. Кореневский Н. А., Шуткин А. Н., Бойцова Е. А. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37-40.

22. Кореневский Н. А., Хрипина И. И., Лазурина Л. П. Нечеткие коллективные классификаторы для оценки состояния живых систем // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов XII Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2015. С. 172-174.

23. Шуткин А. Н., Кореневская С. Н., Федянин В. В. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких правил // Информационные проекты в медицине и педагогике: материалы Международной научно-практической конференции. М.: ИП Киселева О. В., 2014. С. 61-64.

24. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data / R. T. Al-Kasabeh, N. A. Korenevskiy, F. Ionescu, A. A. Kuzmin // Proc. 4th IAFA Internnational Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, 2009. P. 71-78.

25. Korenevskiy N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems, Biomedical Engineering // Biomedical Engineering. 2008. Vol. 42, N 2. P. 67-72.

26. Value of assessment of pretest probability of deep-vein thrombosis in clinical management / P. S. Wells, D. R. Anderson, J. Bormanis [et al.] // Lancet. 1997. P. 1795-1798.

27. Prevention of VTE in Nonorthopedic Surgical Patients. Antithrombotic Therapy and Prevention of Thrombosis, 9th ed: American College of Chest Physicians Evidence-Based Clinical Practice Guidelines / M. K. Gould, D. A. Garcia, S. M. Wren [et al.] // Chest. 2012. Vol. 141. P. e227S–e277S.

References

1. Huang C., eds. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *Lancet,* 2020, vol. 395, is. 10223, pp. 497-506.

2. Ruan Q., eds. Clinical predictors of mortality due to COVID-19 based on an analysis of data of 150 patients from Wuhan, China. *Intensive Care Med.*, 2020, vol. 46, is. 5, pp. 846-848.

3. Chen G., eds. Clinical and immunologic features in severe and moderate Coronavirus Disease 2019. *J. Clin. Invest.*, 2020, vol. 130, is. 5, pp. 2620-2629.

4. Gao Y., eds. Diagnostic utility of clinical laboratory data determinations for patients with the severe COVID-19. *J. Med. Virol.*, 2020, vol. 92, is. 7, pp. 791-796.

5. Anayev E. H., Knyazheskaya N. P. Koagulopatiya pri COVID-19: fokus na antikoagulyantnuyu terapiyu [Coagulopathy in COVID-19: focus on anticoagulant therapy]. *Prakticheskaya pul'monologiya = Practical Pulmonology*, 2020, no. 1, pp. 3-13.

6. Granovskaya M. V., Zaslavskaya K. Ya. COVID-19 – nabor simptomov ili sistemnaya patologiya? Klinicheskaya lekciya. Chast' 1. Osobennosti poliorgannyh narushenij [COVID-19 – a set of symptoms or a systemic pathology? Clinical lecture. Part 1. Features of multiple organ disorders]. *Infekcionnye bolezni: Novosti. Mneniya. Obuchenie = Infectious Diseases: News. Opinions. Training*, 2020, no. S3 (34), pp. 3-9.

7. Gupta A., Madhavan M. V., Sehgal K., Nair N., eds. Extrapulmonary manifestations of COVID-19. *Nat. Med.*, 2020, no. 26 (7), pp. 1017-1032.

8. Guan W. J., Ni Z. Y., Hu Y. , eds. Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China. *N. Engl. J. Med.,* 2020, pp. 1708-1720.

9. Bikdeli B., Madhavan M. V., Jimenez. D, eds. COVID-19 and Thrombotic or Thromboembolic Prevention, Antithrombotic Therapy, and Follow-up. *JACC*, 2020.

10. Mahmoud B. Malas, eds. Thromboembolism risk of COVID-19 is high and associated with a higher risk of mortality: A systematic review and meta-analysis. *Lancet*. 2020.

11. Korenevskiy N. A. Proektirovanie nechetkih reshayushchih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlya zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12-20.

12. Korenevskiy N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh system [The use of fuzzy logic decision making for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 33-35.

13. Korenevskiy N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2019, p. 472.

14. Korenevskiy N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovskiy V. I. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [Assessment and management of students' health status based on hybrid intelligent technologies]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2016, p. 472.

15. Korenevsky N. A. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskih sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy

rules for analysis and management of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe Priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation,* 2013, no. 2, pp. 99-103.

16. Korenevsky N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenij na nechetkih setevyh modelyah v zadachah medicinskoj diagnostiki i prognozirovaniya [System design decision-making in a fuzzy network models in problems of medical diagnostics and forecasting]. *Telekommunikacii = Telecommunications,* 2006, no. 6, pp. 25-31.

17. Korenevsky N. A., Artemenko M. V., Provotorov V. Ya., Novikova L. A. Metod sinteza nechetkih reshayushchih pravil na osnove modelej sistemnyh vzaimosvyazej dlya resheniya zadach prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij [Method of synthesis of fuzzy decision rules based on models of system relationships for solving problems of forecasting and diagnostics of diseases]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2014, no. 4, pp. 881-886.

18. Korenevsky N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh system [Synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = High Technology*, 2014, no. 12, pp. 31-39.

19. Korenevsky N. A., Serebrovsky V. V., Razumova K. V., Khripina I. I. Metod sinteza nechetkih modelej prinyatiya reshenij po ocenke sostoyaniya i upravleniyu biotekhnicheskimi sistemami [Method of synthesis of fuzzy decision-making models for assessing the state and management of biotechnical systems]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 9, pp. 68-74.

20. Korenevsky N. A., Serebrovsky V. I., Kopteva N. A., Govorukhina T. N. Prognozirovanie i diagnostika zabolevanij, vyzyvaemyh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennyh modelej [Forecasting and diagnostics of diseases caused by harmful industrial and environmental factors based on heterogeneous models]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov Publ., 2012. 231 p.

21. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Boitsova E. A. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of health status based on G. Rush models]. *Medicinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2015, no. 6, pp. 37-40.

22. Korenevsky N. A., Khripina I. I., Lazurina L. P. [Collective fuzzy classifiers to assess the status of living systems]. Optiko-elektronnye pribory i ustrojstva v sistemah raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenij i simvol'noj informacii. Sbornik materialov XII

Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Optical-electronic instruments and devices in systems of pattern recognition, image processing, and character information. Collection of materials of the XII International scientific and technical conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2015, pp. 172-174. (In Russ.).

23. Shutkin A. N., Korenevskaya S. N., Fedyanin V. V. [Designing knowledge bases of medical expert systems using fuzzy rules collectives]. Informacionnye proekty v medicine i pedagogike. Materialy Mezhdunarodnoi Nauchno-prakticheskoi konferentsii [Information projects in medicine and pedagogy. Materials of the International scientific and practical conference]. Moscow, IE P Kiseleva O. V. Publ., 2014, pp. 61-64. (In Russ.)

24. Al-Kasabeh R. T., Korenevskiy N., Ionescu F., Kuzmin A. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data. Proc. 4th IAFA Internnational Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, 2009, pp. 71-78.

25. Korenevskiy N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems. *Biomedical Engineering*, 2008, vol. 42, no. 2, pp. 67-72.

26. Wells P. S., Anderson D. R., Bormanis J., eds. Value of assessment of pretest probability of deep-vein thrombosis in clinical management. *Lancet,* 1997, pp. 1795-1798.

27. Gould M. K., Garcia D. A., Wren S. M., eds. Prevention of VTE in Nonorthopedic Surgical Patients. Antithrombotic Therapy and Prevention of Thrombosis, 9th ed: American College of Chest Physicians Evidence-Based Clinical Practice Guidelines. *Chest*, 2012, vol. 141, pp. e227S–e277S.

Информация об авторах / Information about the Authors

Быков Александр Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Кореневский Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Alexander V. Bykov, Cand. of Sci. (Medical), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikolai A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Винников Артем Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Безуглов Александр Иванович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Artem V. Vinnikov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Alexander I. Bezuglov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-160-171

CC BY 4.0

Программная система виртуальной машины с поддержкой передачи сообщений между потоками

А. А. Чаплыгин[1] ✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в анализе и моделировании программной системы в виде виртуальной машины с поддержкой многопоточности. Приводятся современные представления о потоках и многопоточности, рассматриваются виды многопоточности, варианты взаимодействия между потоками. Предложена концептуальная модель программной системы в виде виртуальной машины с поддержкой передачи сообщений между потоками.*

Методы. *Потоки представляют собой модели вычислительных процессов с общей и раздельной памятью. Существуют два способа передачи управления потокам – кооперативный и с вытеснением. В случае кооперативной многопоточности планирование передачи управления возлагается на программиста.*

Результаты. *В результате компьютерного моделирования была разработана программная система, реализующая виртуальную машину. Общий вычислительный процесс разбивается на необходимое число потоков. Главный поток может создавать дочерние потоки и завершать их при необходимости. Виртуальная машина позволяет потоками обмениваться сообщениями.*

Заключение. *Полученная программная система может быть использована для решения различных задач, требующих разделения вычислительного процесса на подзадачи. Виртуальная машина обеспечивает переносимость и кросс-платформенность системы. Обмен сообщений между потоками позволяет решить проблемы состояний гонок, тупиковых ситуаций и синхронизации.*

Ключевые слова: *защита организма; воздействие внешних факторов; прогнозирование заболеваний; диагностика заболеваний.*

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

Для цитирования: Чаплыгин А. А. Программная система виртуальной машины с поддержкой передачи сообщений между потоками // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 12, № 1. С. 160–171. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-160-171.

Поступила в редакцию 16.01.2022 *Подписана в печать 11.01.2022* *Опубликована 29.03.2022*

© Чаплыгин А. А., 2022

Virtual Machine Software System with Support for Message Transfer Between Threads

Aleksandr A. Chaplygin[1] ✉

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Abstract

The purpose of research *is to analyze and simulate a software system in the form of a virtual machine with multithreading support. Modern ideas about threads and multithreading are given, types of multithreading, options for interaction between threads are considered. A conceptual model of a software system in the form of a virtual machine with support for message transfer between threads is proposed.*

Methods. *Threads are models of computing processes with shared and separate memory. There are two ways of thread switching: cooperative and preemptive. In the case of cooperative multithreading, control transfer planning is assigned to the programmer.*

Results. *As a result of computer modeling, a software system was developed that implements a virtual machine. The overall computing process is divided into the required number of threads. The main thread can create child threads and terminate them if necessary. A virtual machine allows you to exchange messages in threads.*

Conclusion. *The resulting software system can be used to solve various tasks that require the division of the computational process into subtasks. The virtual machine provides portability and cross-platform compatibility of the system. The exchange of messages between threads allows you to solve the problems of race states, deadlocks and synchronization.*

Keywords: *virtual machine; simulation; system analysis; flow; message transmission.*

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

For citation: Chaplygin A. A. Virtual Machine Software System with Support for Message Transfer Between Threads. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(1): 160–171. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-160-171.

Received 16.01.2022 *Accepted 11.01.2022* *Published 29.03.2022*

***

Введение

Потоки – это модель вычислительных процессов, которые выполняются в одном адресном пространстве [1]. Разница между потоками и процессами зависит от реализации. В некоторых операционных система потоки являются наименьшей единицей вычислительных процессов [2]. Чаще всего один процесс может содержать один или более потоков. Помимо памяти потоки могут разделять другие ресурсы (открытые файлы, сигналы и др.).

На одном процессоре многопоточность реализуется путем мультиплексирования [3]. Один и тот же процессор поочередно выполняет команды разных

потоков. Переключение между потоками выполняется часто, поэтому возникает иллюзия параллельного выполнения. Для нескольких процессоров или ядер каждому потоку может быть назначен свой процессор или свое ядро [4]. В этом случае вычисления действительно проводятся параллельно.

Одним из важных свойств потоков является то, что переключение между потоками происходит быстрее, чем между процессами. Главной причиной этого является отсутствие необходимости перенастраивать карты памяти в подсистеме управления памятью (MMU), в то время как при переключении контекста на другой процесс приходится заново настраивать директории и таблицы страниц памяти [5]. Буфера ассоциативной трансляции (TLB) ускоряют процессы переключения, но тем не менее переключение потоков происходит быстрее за счет отсутствия переключения MMU.

В то же время разбиение задачи на потоки представляет собой удобную абстракцию вычислительных процессов [3; 6; 7; 8]. Оно позволяет совместно использовать ресурсы вместе с параллельным выполнением на многопроцессорных системах или на вычислительных кластерах. Конечно при этом возникает много проблем, таких как состояния гонки, синхронизации или тупиковой ситуации [9; 10]. Для решения этих проблем используют различные техники: семафоры, мьютексы и другие [1; 9; 11, 12]. Тем не менее существуют более глобальные недостатки, связанные с недетерминизмом и непредсказуемостью.

Для реализации многопоточности используют два основных способа. Первый способ – когда операционная система сама выбирает момент переключения контекста потоков [1; 13]. Это может быть по кванту времени, по приоритету или в результате работы более сложного алгоритма планирования. Недостатком этого подхода является то, что переключение потоков может возникнуть в неподходящее время с точки зрения вычислительного процесса потока. Это может изменить приоритет и уменьшить следующий квант времени для данного потока, что приведет к замедлению вычисления.

Второй способ – кооперативная многозадачность [14]. Она предполагает, что время и место переключения потоков выбирает программист, в результате чего можно оптимизировать систему под конкретную задачу [15]. Недостатком кооперативной многозадачности является возможность блокировки потока, если требуется ожидание доступности какого-либо ресурса. Данную проблему можно решить, применяя асинхронные неблокирующие системные вызовы и процедуры.

Одной из первых реализаций многопоточности является одновременная многопоточность (Hyper-Threading) [16]. В самом процессоре выделяются группы регистров, где сохраняется контексты для каждого потока, вместо того чтобы

сохранять и восстанавливать один набор регистров.

С точки зрения реализации потоки подразделяются на потоки выполнения ядра и пользовательские потоки. Потоки выполнения ядра хранят контекст, состоящий из стека вызовов, значений регистров процессора. При переключении контекста потоков эти данные должны быть записаны в регистры процессора, что требует время.

В то же время пользовательские потоки выполнения выполняются в пользовательском пространстве, и операционная система не знает о них. В этом случае переключение потоков происходит программно без временных затрат на переключения контекста. Еще одним достоинством пользовательских потоков является быстрое создание новых потоков и удаление существующих. Ими легко управлять – приостанавливать и возобновлять вычисления.

Одним из вариантов реализации пользовательских потоков является использование виртуальной машины [17; 18]. Такие потоки иногда называют зелеными потоками выполнения. Но даже в случае применения виртуальных машин остаются проблемы синхронизации потоков. Одним из способов решить эту проблему является добавление в виртуальную машину возможности обмена сообщениями между потоками [19].

Материалы и методы

Каждый поток является моделью вычислительного процесса, загруженного из сценария (рис. 1).

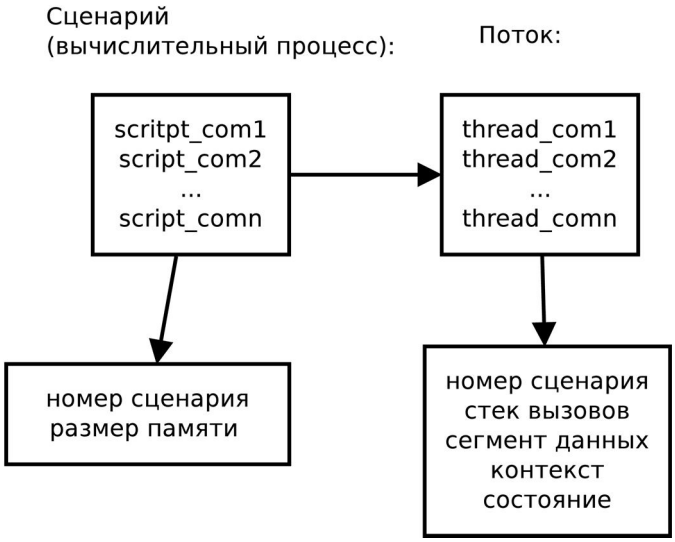


Рис. 1. Модель потока

Fig. 1. Thread model

Сценарий представляет собой набор машинных (виртуальных) команд, которые загружаются в память. Каждый сценарий имеет идентификатор – номер для

ссылок на него. Поток представляет собой загруженный образ сценария. Кроме номера потока он имеет дополнительные структуры данных для своего обеспечения. Стек вызовов используется для хранения адресов возвратов из подпрограмм. Сегмент данных хранит значения переменных сценария. Контекст потока представляет собой слепок состояния потока – значение внутренних регистров.

На рисунке 2 показаны части контекста потока.

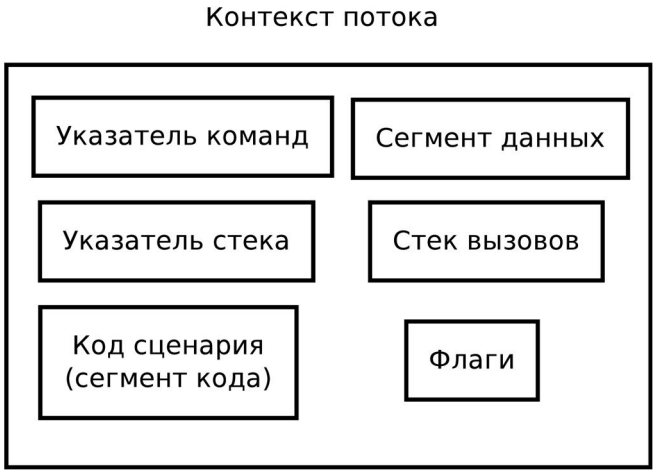


Рис. 2. Контекст потока

Fig. 2. Thread context

Регистр указателя команд хранит адрес текущей выполняемой команды. Указатель стека хранит текущий адрес вершины стека вызовов. Регистр флагов хранит состояние потока: запущен ли поток или приостановлен и другие состояния. Поток может в любой момент быть приостановлен и затем вновь быть запущенным, начиная с точки останова.

Виртуальная машина, поддерживающая потоки, должна хранить информацию о структуре и состоянии потоков (рис. 3).

Общая задача разбивается на подзадачи. Какие-то из этих подзадач должны выполняться последовательно, какие-то – параллельно. Этот процесс похож на разбиение на модули программной системы за исключением того, что потоки в отличие от модулей выполняются параллельно. Главный поток выполняет задачу запуска дочерних потоков и синхронизации между ними. Дочерние потоки могут также запускать другие потоки, которые будут дочерними по отношению к ним. Таким образом, формируется иерархическое дерево потоков. Родительские потоки запускают дочерние потоки и могут останавливать их. Дочерние потоки в свою очередь могут останавливать или приостанавливать себя. Такая возможность дает гибкость в реализации сложного взаимодействия между частями сложного вычислительного процесса.

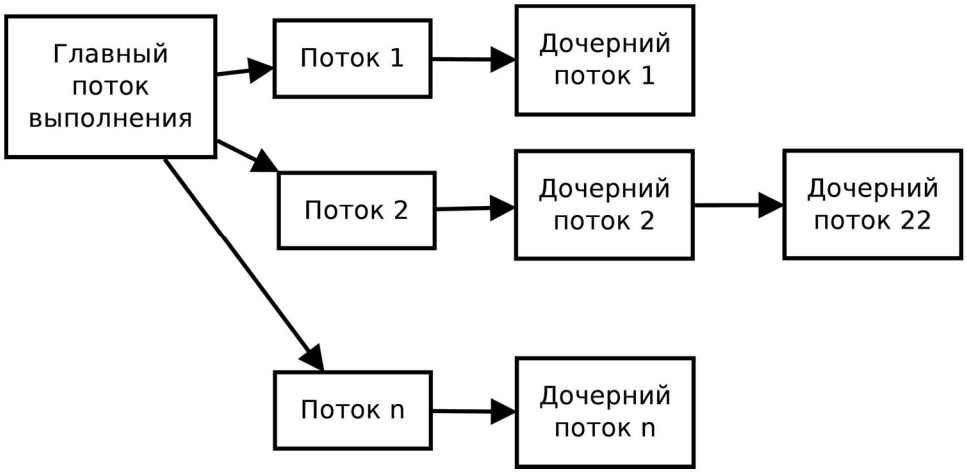


Рис. 3. Структура потоков

Fig. 3. Thread structure

Одному сценарию может соответствовать несколько потоков (при этом однородные подзадачи могут быть запущены несколько раз). Это соответствует нескольким запускам одной и той же программы с разными парамтерами.

При работе параллельных потоков возникает необходимость синхронизации данных для устранения явлений гонок, тупиковых ситуаций. В данной системе предлагается реализовать возможность передачи сообщений между потоками (рис. 4).

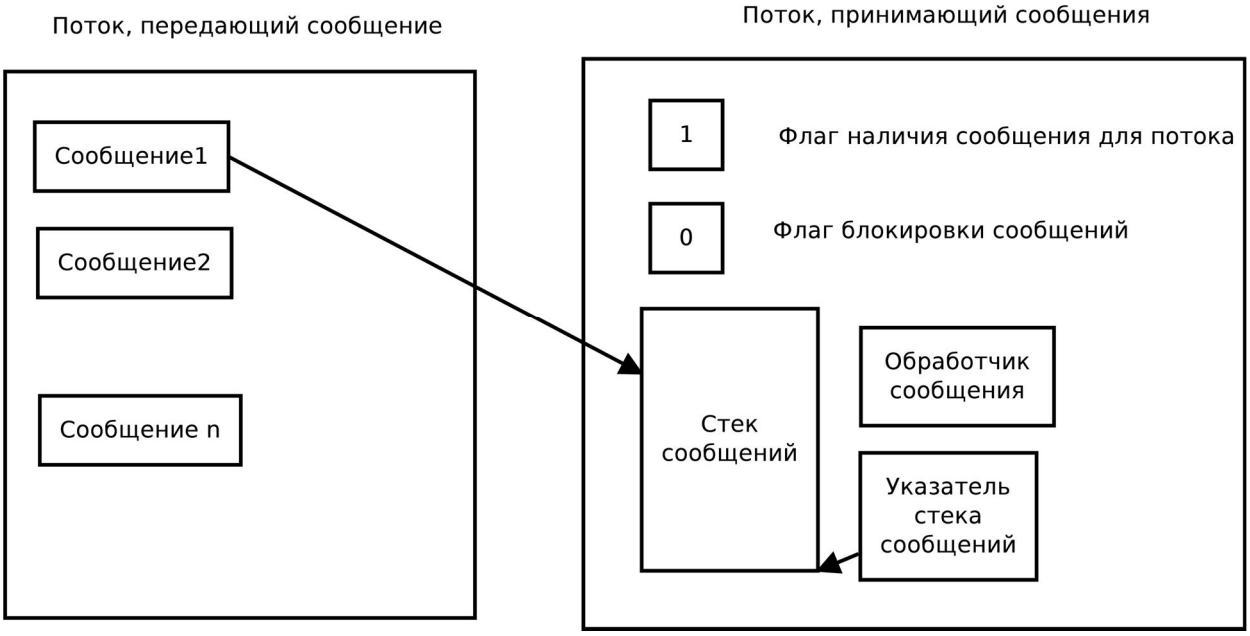


Рис. 4. Передача сообщений между потоками

Fig. 4. Sending messages to threads

Сообщения представляют собой любую информацию. Они кодируются для удобства передачи. Протокол передачи определяет программист. Каждый поток имеет специальный стек, предназначенный для переданных сообщений. В начальном состоянии этот стек пуст. По мере приема сообщений он наполняется. Отдельный указатель хранит позицию этого стека. При поступлении очередного сообщения устанавливается флаг наличия сообщения. Когда поток получает управление, то он проверяет данный флаг. Если флаг установлен, то запускается процедура обработки сообщений. Эта процедура может быть частью общего потока выполнения или быть отдельной процедурой. Также она может оставить флаг (что приведет к повторному запуску этой процедуры) или сбросить его. В данной системе предусмотрено, чтобы поток мог запретить посылать ему сообщения. Для этого выделяется отдельный флаг. Таким образом, потоки могут управлять пересылкой сообщений, разрешать и запрещать сообщения, а также запускать обработчики сообщений.

Результаты и их обсуждение

Для тестирования многопоточной системы была создана программная система, основанная на виртуальной машине. Виртуальная машина представляет собой специализированный процессор, который кроме инструкций АЛУ и управляющих инструкций содержит специализированные инструкции для работы с потоками.

На рисунке 5 показана структура сценария.

```
typedef struct {
  word id;                /**< номер сценария */
  word entry;             /**< адрес начала сценария */
  byte version;           /**< версия сценария */
  word entry_msg;                 /**< точка входа обработки сообщений */
  word stack_size;        /**< размер стека вызовов */
  word data_size;         /**< размер сегмента данных */
  word msg_size;          /**< размер стека сообщений */
} script_t;
```

Рис. 5. Структура сценария

Fig. 5. Script structure

Сценарий содержится в двоичном файле и имеет заголовок, который содержит поля структуры. Далее могут идти разные секции образа, в т. ч. сегмент кода. Здесь содержатся закодиро-

ванные инструкции виртуальной машины для основной программы сценария и для обработчика сообщений.

На рисунке 6 показана структура потока.

Байт-коды виртуальной машины, отвечающие за работу с потоками, показаны ниже (рис. 7).

```
typedef struct thread_s {
  int id;                    /**< номер сценария */
  stack_t *call_stack;             /**< стек вызовов */
  int *saved_sp;             /**< сохраненный указатель стека */
  stack_t *msg_stack;              /**< стек сообщений потоку */
  seg_t *data;                     /**< сегмент данных */
  byte *ip;                        /**< текущий указатель команд */
  byte *script;                    /**< образ сценария (содержит код и ресурсы) */
  int version;                     /**< версия сценария */
  int flags;                       /**< флаги потока */
  script_t *header;                /**< заголовок сценария */
  struct thread_s *parent;         /**< родительский поток */
} thread_t;
```

Рис. 6. Структура потока

Fig. 6. Thread structure

```
0x05 call <addr> Вызов подпрограммы
0x11 return Возврат из подпрограммы
0x13 jmp <addr> Безусловный переход
0x3d free_script <id> Освобождение памяти сценария
0x3e thread_resume <id> Продолжение работы потока
0x3f thread_pause <id> Приостановка работы потока
0x40 run_script <id> Запуск сценария
0x42 yield Передача управления следующему потоку
0x44 thread_stop <id> Остановка выполнения потока
0x45 load_script <id> Загрузка образа сценария в память
0x61 thread_send <id> <msg> Передача сообщения
0x62 thread_ready Поток готов принимать сообщения
0x66 thread_clear_msg Очистка всех сообщений потока
```

Рис. 7. Перечень некоторых байт кодов виртуальной машины

Fig. 7. Virtual machine byte codes

При инициализации системы загружается образ и запускается главный поток. Этот поток также создает другие потоки. Сначала загружается образ потока (наподобие образа процесса), а затем поток включается на выполнение. Передача управления между потоками происходит по команде yield. Эта команда сохраняет контекст текущего потока и передает управление следующему по списку потоку, если тот имеет состояние «запущен». В данном случае не нужен сложный планировщик, не тратится время на расчет планирования, так как место передачи управления определяет программист. Происходит круговорот потоков, после того как все выполнили инструкции до остановки, паузы или передачи управления, процесс повторяется.

Команды передачи сообщений служат для синхронизации потоков. По умолчанию поток не принимает сообщения, т. е. сообщения заблокированы. После выполнения команды разрешения поток отслеживает флаг приема сообщений. Новые сообщения поступают в стек сообщений, и при этом флаг наличия сообщений устанавливается. Обработчик сообщений сам решает, как интерпретировать сообщения. Он извлекает их из стека сообщений и выполняет протокол, соответствующий задаче. Отсутствие ограничений на сообщения позволяет реализовать любые протоколы взаимодействия и избавиться от состояний гонок и тупиковых ситуаций.

Выводы

Таким образом, разработанная многопоточная система на основе виртуальной машины позволяет разбить решаемую задачу на несколько подзадач, которые будут выполняться в отдельных потоках. Для решения вопросов синхронизации потоки могут передавать друг другу сообщения в произвольном протоколе. Данная система может быть применена для решения различных задач, которые описываются моделью с параллельными вычислительными процессами.

Список литературы

1. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2015. 1120 с.

2. Andrews G. R., Schneider F. B. Concepts and Notations for Concurrent Programming // ACM Computing Surveys. 1983. Vol. 15, N. 1.

3. Ben-Ari M. Principles of Concurrent Programming. Addison-Wesley, 2006.

4. Synchronization, Coherence, and Event Ordering in Multiprocessors / M. Dubois [et al.]. URL: http://www.semanticscholar.org>...coherence...event...in-Dibois... (дата обращения: 11.12.2021).

5. Dubois M., Scheurich C., Briggs F. A. Memory Access Buffering in Multiprocessors, Proc. 13th Ann. Int'l. Symp. on Computer Arch., ACM, 1986. P. 434–442.

6. Bal H. E., Tanenbaum A. S. Distributed Programming with Shared Data // Proc. 1988 Int'l. Conf. on Computer Languages, IEEE, 1988. P. 82–91.

7. Легков К. Е., Буренин А. Н. Проблемы математического описания потоков управляющей информации в процессе управления современной инфокоммуникационной сетью специального назначения // T-COMM: Телекоммуникации и транспорт. 2014. № 10. С. 43-46.

8. Буренин А. Н., Легков К. Е. К вопросу математического описания потоков управляющей информации в процессе управления современной инфокоммуникационной сетью специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях земли. 2013. № 5. С. 8-12.

9. Coffman E. System Deadlocks // ACM Computing Surveys. 1971. Vol. 3, N 2.

10. Сироткина Е. И. Применение механизмов синхронизации потоков ОС Windows в процессе создания больших систем массового обслуживания // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. М.: Научный мир, 2010. Т. 2, № 1. С. 91-94.

11. Zhuravlev S. Survey of Scheduling Techniques for Addressing Shared Resources in Multicore Processors // ACM Computing Surveys. 2012. Vol. 45, N. 1.

12. Hoare C. A. R. Monitors, An Operating System Structuring Concept // Commun. of the ACM. 1974. Vol. 17. P. 549–557.

13. A Hardware Scheduler for Real Time Multiprocessor System on Chip / N. Gupta, S. Mandal, J. Malave, A. Mandal, R. N. Mahapatra // Proc. 23rd Int'l Conf. on VLSI Design, IEEE, 2010.

14. Dijkstra E. W. Co-operating Sequential Processes // Programming Languages / ed. by F. Genuys. New York: Academic Press, 1968b.

15. Energy-Efficient Mechanisms For Managing Thread Context In Throughput Processors / M. Gebhart, D. R. Johnson, D. Tarjan, S. W. Keckler, W. I. Dally, E. Lindholm, K. Skadron // Proc. 38th Int'l Symp. On Computer Arch. ACM, 2011.

16. Gerber R., Binstock A. Programming with Hyper-Threading Technology. Santa Clara, CA: Intel Press, 2004.

17. PVM: Parallel Virtual Machine – A User's Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing / A Geist., A. Beguelin, J. Dongarra, W. Jiang, R. Mancheck, V. Sunderram. Cambridge, MA: M. I. T. Press, 1994.

18. Чаплыгин А. А., Малышев А. В. Операционная система с ядром на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд // Известия Юго-Западного

государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. № 1. С. 8-20.

19. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface. Cambridge, MA: M. I. T. Press, 1994.

References

1. Tanenbaum E., Bos H. Sovremennye operatsionnye sistemy [Sovremennye operacionnye sistemy]. 4th ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2015. 1120 p.

2. Andrews G. R., Schneider F. B. Concepts and Notations for Concurrent Programming. *ACM Computing Surveys*, 1983, vol. 15, no. 1.

3. Ben-Ari M. Principles of Concurrent Programming. Addison-Wesley, 2006.

4. Dubois M., eds. Synchronization, Coherence, and Event Ordering in Multiprocessors. Available at: http://www.semanticscholar.org>...coherence...event...in-Dibois... (accessed 11.12.2021)

5. Dubois M., Scheurich C., Briggs F. A. Memory Access Buffering in Multiprocessors. Proc. 13th Ann. Int'l. Symp. on Computer Arch., ACM, 1986, pp. 434–442.

6. Bal H. E., Tanenbaum A. S. Distributed Programming with Shared Data. Proc. 1988 Int'l. Conf. on Computer Languages, IEEE, 1988, pp. 82–91.

7. Legkov K. E., Burenin A. N. Problemy matematicheskogo opisaniya potokov upravlyayushchei informatsii v protsesse upravleniya sovremennoi infokommuni-katsionnoi set'yu spetsial'nogo naznacheniya [Problems of mathematical description of control information flows in the process of managing a modern infocommunication network for special purposes]. *T-COMM: Telekommunikatsii i transport = T-COMM: Telecommunications and Transport*, 2014, no. 10, pp. 43-46.

8. Burenin A. N., Legkov K. E. K voprosu matematicheskogo opisaniya potokov upravlyayushchei informatsii v protsesse upravleniya sovremennoi infokommunika-tsionnoi set'yu spetsial'nogo naznacheniya [On the issue of mathematical description of control information flows in the process of managing a modern special-purpose infocommunication network]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli = High-Tech Technologies in Earth Space Research*, 2013, no. 5, pp. 8-12.

9. Coffman E. System Deadlocks. *ACM Computing Surveys,* 1971, vol. 3, no. 2.

10. Sirotkina E. I. [Application of Windows OS thread synchronization mechanisms in the process of creating large queuing systems]. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference]. Moscow, Scientific world Publ., 2010, vol. 2, no. 1, pp. 91-94.

11. Zhuravlev S. Survey of Scheduling Techniques for Addressing Shared Resources in Multicore Processors. *ACM Computing Surveys*, 2012, vol. 45, no. 1.

12. Hoare C. A. R. Monitors, An Operating System Structuring Concept. *Commun. of the ACM*, 1974, vol. 17, pp. 549–557.

13. Gupta N., Mandal S., Malave J., Mandal A., Mahapatra R. N. A Hardware Scheduler for Real Time Multiprocessor System on Chip. Proc. 23rd Int'l Conf. on VLSI Design, IEEE, 2010.

14. Dijkstra E. W. Co-operating Sequential Processes. Programming Languages; ed. by F. Genuys. New York, Academic Press, 1968b.

15. Gebhart M., Johnson D. R., Tarjan D., Keckler S. W., Dally W. J., Lindholm E., Skadron K. Energy-Efficient Mechanisms For Managing Thread Context In Throughput Processors. Proc. 38th Int'l Symp. On Computer Arch. ACM, 2011.

16. Gerber R., Binstock A. Programming with Hyper-Threading Technology. Santa Clara, CA, Intel Press, 2004.

17. Geist A., Beguelin A., Dongarra J., Jiang W., Mancheck R., Sunderram V. PVM: Parallel Virtual Machine – A User's Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing. Cambridge, MA, M. I. T. Press, 1994.

18. Chaplygin A. A., Malyshev A. V. Operatsionnaya sistema s yadrom na osnove virtual'noi mashiny s umen'shennym naborom komand [The operating system with the virtual machine based kernel with reduced instruction set]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 1, pp. 8-20.

19. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface. Cambridge, MA, M. I. T. Press, 1994.

Информация об авторе / Information about the Author

Чаплыгин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Aleksandr A. Chaplygin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Software Engeneering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;
- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.
- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);
- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны-2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: **https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/.**