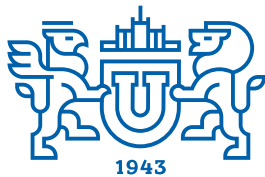


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2023
Т.23, № 3

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

Редакционная коллегия:

Логиновский О.В., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*гл. редактор*) (г. Челябинск);
Бурков В.Н., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*зам. гл. редактора*) (г. Москва);
Голлай А.В., д.т.н., доц. (*зам. гл. редактора*) (г. Челябинск);
Захаров В.В., *отв. секретарь* (г. Челябинск);
Баркалов С.А., д.т.н., проф. (г. Воронеж);
Березанский Л., PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);
Джапаров Б.А., д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);
Затонский А.В., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Куликов Г.Г., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (г. Уфа);
Мазуров В.Д., д.ф.-м.н., проф. (г. Екатеринбург);
Максимов А.А., д.т.н. (г. Новокузнецк);
Мельников А.В., д.т.н., проф. (г. Ханты-Мансийск);
Прангишвили А.И., д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);
Щепкин А.В., д.т.н., проф. (г. Москва);
Ячиков И.М., д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

Редакционный совет:

Шестаков А.Л., д.т.н., проф. (*председатель*) (г. Челябинск);
Авербах И., PhD, проф. (г. Торонто, Канада);
Браверман Е., PhD, проф. (г. Калгари, Канада);
Дегтярь В.Г., д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);
Казаринов Л.С., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Кибалов Е.Б., д.э.н., проф. (г. Новосибирск);
Новиков Д.А., д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Москва);
Панферов В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Слинько А., PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);
Столбов В.Ю., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Танана В.П., д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);
Ухоботов В.И., д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);
Ушаков В.Н., д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);
Шестаков И., д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);
Ширяев В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Шнайдер Д.А., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Штессель Ю., PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

2023
Vol. 23, no. 3

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

Editorial Board:

Loginosvkiy O.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Burkov V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Gollai A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Zakharov V.V., *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Barkalov S.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;

Berezansky L., PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;

Dzhaparov B.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;

Zatonskiy A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

Kulikov G.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;

Mazurov V.D., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;

Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;

Melnikov A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;

Prangishvili A.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;

Shchepkin A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Yachikov I.M., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

Editorial Council:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Averbakh I., PhD, Prof., University of Toronto, Canada;

Braverman E., PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;

Degtyar' V.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;

Kazarinov L.S., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Kibalov E.B., Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;

Novikov D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Panferov V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;

Slinko A., PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;

Stolbov V.Yu., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;

Tanana V.P., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Ukhobotov V.I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

Shestakov I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;

Shiryayev V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Schneider D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Shtessel Yu., PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

МЕЛЬНИКОВ А.В., КОЧЕРГИН Г.А., АББАЗОВ В.Р., БАЙСАЛЯМОВА О.А., РУСАНОВ М.А., ПОЛИЩУК Ю.М. Нейросетевая модель для сегментации космических снимков в мониторинге факторов обезлесения территории	5
ZHIGALOV I.E., OZEROVA M.I., EVSTIGNEEV A.V. Application of Cutter–Jordan–Bossen method for data hiding in the image spatial area	16
ЗАТОНСКИЙ А.В., ПЛЕХОВ П.В., ЗАХАРОВ В.В., ХРИСТОЛЮБОВ Н.Н. Нестандартные подходы к организации климатических систем в центрах обработки данных	24
AL-KHAFAJI ISRAA M. ABDALAMEER, PANOV A.V. Federated learning for vision-based obstacle avoidance in mobile robots	35
АРЬКОВ В.Ю., ШАРИПОВА А.М., КУЛИКОВ Г.Г. Оценивание неопределённости в машинном обучении	48

Управление в технических системах

ТУКМАКОВ Д.А. Сопоставление компьютерных реализаций равновесной и континуальной методик моделирования многофазных сред на примере одномерного нестационарного течения газозвеси	59
---	----

Управление в социально-экономических системах

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ЛЯСКОВСКАЯ Е.А., ГАБДУЛИН Р.Р. Проблемы цифровой трансформации субъектов Российской Федерации	76
БАРКАЛОВ С.А., БУРКОВ В.Н., КУРОЧКА П.Н., СЕРЕБРЯКОВА Е.А. Выбор базовых представителей направления техники нового поколения	93
ГИЛЁВ Д.В., ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Выявление факторов удовлетворенности жизнью в контексте решения управленческих вопросов	105
МАКСИМОВ А.А., ГОЛУБЕВА О.Л., ВОЛОВИЧ Г.И., НЕКРАСОВ С.Г. Миграция данных в контексте ERP-систем	118

CONTENTS

Informatics and computer engineering

MELNIKOV A.V., KOCHERGIN G.A., ABBAZOV V.R., BAISALAMOVA O.A., RUSANOV M.A., POLISHCHUK Yu.M. A neural network model for space image segmentation in monitoring of deforestation factors	5
ZHIGALOV I.E., OZEROVA M.I., EVSTIGNEEV A.V. Application of Cutter–Jordan–Bossen method for data hiding in the image spatial area	16
ZATONSKIY A.V., PLEKHOV P.V., ZAKHAROV V.V., KHRISTOLYUBOV N.N. Non-standard approaches to climate systems organization in data processing centers	24
AL-KHAFAJI ISRAA M. ABDALAMEER, PANOV A.V. Federated learning for vision-based obstacle avoidance in mobile robots	35
ARKOV V.Yu., SHARIPOVA A.M., KULIKOV G.G. Uncertainty estimation in machine learning	48

Control in technical systems

TUKMAKOV D.A. Comparison of computer implementations of equilibrium and continuous methods for modeling multi-phase media on the example of a one-dimensional unstationary gas suspension flow	59
--	----

Control in social and economic systems

LOGINOVSKIY O.V., LYASKOVSKAYA E.A., GABDULIN R.R. Problems of digital transformation of the subjects of the Russian Federation	76
BARKALOV S.A., BURKOV V.N., KUROCHKA P.N., SEREBRYAKOVA E.A. Selection of basic representatives of new generation technology	93
GILEV D.V., LOGINOVSKIY O.V. Identification of life satisfaction factors in the context of management issues	105
MAKSIMOV A.A., GOLUBEVA O.L., VOLOVICH G.I., NEKRASOV S.G. Data migration in the context of ERP	118

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.032.26, 004.932.72'1, 528.88

DOI: 10.14529/ctcr230301

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В МОНИТОРИНГЕ ФАКТОРОВ ОБЕЗЛЕСЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ

А.В. Мельников, MelnikovAV@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>

Г.А. Кочергин, KocherginGA@uriit.ru

В.Р. Аббазов, AbbazovVR@uriit.ru

О.А. Байсалямова, BaaysalyamovaOA@uriit.ru

М.А. Русанов, RusanovMA@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9926-4609>

Ю.М. Полищук, PolichukJM@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4944-4919>

Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий,
Ханты-Мансийск, Россия

Аннотация. Статья посвящена важной проблеме применения нейросетевых моделей в задачах мониторинга состояния лесных территорий с использованием оптических спутниковых снимков. **Цель исследования.** Целью исследования явилась разработка нейросетевой модели лесных рубок, пригодной для автоматизации дешифрирования многоспектральных космических снимков Sentinel-2 в задачах мониторинга состояния лесных ресурсов лесодобывающего региона на примере Ханты-Мансийского автономного округа. **Материалы и методы.** Основу разработанной модели составила процедура сегментации космических снимков лесных рубок, основанная на сверточной нейронной сети глубокого обучения. Дешифрирование снимков со спутника Sentinel-2 проведено с помощью средств современной геоинформационной системы QGIS. Для подготовки набора обучающих данных было обработано более 990 пар разновременных космических снимков лесных территорий Ханты-Мансийского автономного округа за зимний (снежный) период 2018–2022 гг., с использованием которых было сформировано более 70 тыс. кадров в составе набора обучающих данных и соответствующих им масок контуров лесных рубок. **Результаты.** В результате выполненной работы создана нейросетевая модель лесных рубок, реализующая эффективную сегментацию космических снимков, что позволило автоматизировать трудоемкую процедуру дешифрирования многоспектральных снимков Sentinel-2 с целью выделения контуров лесных рубок. Полученный в работе набор обучающих данных в количестве более 70 тыс. кадров был разделен на обучающую, валидационную (проверочную) и тестовую (контрольную) выборки, объемы которых для разработки нейросетевой модели лесных рубок составили 58 000, 10 000 и 3600 кадров соответственно. Новизна разработанной модели определяется, с одной стороны, использованием для обучения нейронной сети зимних (снежных) космических снимков и, с другой стороны, применением пар разновременных снимков, полученных до и после лесной рубки. В качестве критериев для оценки точности обученной модели нейронной сети применены метрики *Recall*, *Precision* и *F-мера*, значения были рассчитаны по тестовой выборке. Рассчитанная точность выявления рубок с использованием предлагаемой модели на тестовой выборке данных по разным метрикам достигает 85–87 %. **Заключение.** Разработанная нейросетевая модель лесных рубок может быть использована в задачах мониторинга и картографирования состояния лесных ресурсов северных лесодобывающих территорий России с применением многоспектральных космических снимков Sentinel-2.

Ключевые слова: нейронные сети, космические снимки, лесные рубки, набор обучающих данных, метрика точности модели

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию Департамента информационных технологий и цифрового развития ХМАО-Югры.

Для цитирования: Нейросетевая модель для сегментации космических снимков в мониторинге факторов обезлесения территории / А.В. Мельников, Г.А. Кочергин, В.Р. Аббазов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr230301

A NEURAL NETWORK MODEL FOR SPACE IMAGE SEGMENTATION IN MONITORING OF DEFORESTATION FACTORS

A.V. Melnikov, MelnikovAV@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>

G.A. Kochergin, KocherginGA@uriit.ru

V.R. Abbazov, AbbazovVR@uriit.ru

O.A. Baisalamova, BaysalyamovaOA@uriit.ru

M.A. Rusanov, RusanovMA@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9926-4609>

Yu.M. Polishchuk, PolichukJM@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4944-4919>

Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

Abstract. The article deals with the important problem of applying neural network models in the tasks of monitoring the condition of forest areas using optical satellite images. **Objective.** The objective of this research was to develop a neural network model of forest felling suitable for automation of decoding multi-spectral Sentinel-2 satellite images in forest monitoring tasks in the example of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. **Materials and Methods.** The basis of the developed model was the forest harvesting satellite images segmentation procedure based on the convolutional neural network of deep learning. Sentinel-2 data interpretation was done using the modern QGIS geoinformation system. Over 990 pairs of multi-temporal space images of the forest territories of Khanty-Mansi Autonomous Okrug in winter (snow) period of 2018–2022 were processed to prepare the training data set. More than 70 000 images of the training data set and corresponding masks of forest cutting contours were generated with these images. **Results.** As a result of this work, a neural network model of forest felling was created, which implements efficient segmentation of space images, which allowed automating the labor-intensive procedure of interpretation of multispectral Sentinel-2 images in order to identify forest logging contours. The set of training data totally 70 000 frames was divided into the training, validation (test) and test (control) samples, the amount of which for the development of the neural network model of forest felling was 58 000, 10 000 and 3600 frames respectively. The novelty of the model is determined, on the one hand, by the use of winter (snow) satellite images for training the neural network and, on the other hand, by the use of pairs of images acquired before and after forest felling. Recall, Precision and F-measure metrics were used as the criteria to evaluate the accuracy of the trained neural network model, and the values were calculated from the test sample. The calculated accuracy of felling detection using the proposed model on the test sample of data on different metrics reaches 85–87%. **Conclusion.** The developed neural network model of forest felling can be used for monitoring and mapping of forest resources of the northern forestry territories of Russia using multispectral Sentinel-2 satellite images.

Keywords: neural networks, satellite imagery, forest felling, training data set, model accuracy metric

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the project on the state assignment of the Department of Information Technology and Digital Development of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra.

For citation: Melnikov A.V., Kochergin G.A., Abbazov V.R., Baisalamova O.A., Rusanov M.A., Polishchuk Yu.M. A neural network model for space image segmentation in monitoring of deforestation factors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230301

Введение

Обезлесение территорий стало одной из глобальных экологических проблем современности, оказывающих влияние на многие аспекты жизни человека, в том числе на изменение климата как вследствие снижения поглощающей способности лесов улавливать и накапливать углекислый газ, так и непосредственного высвобождения огромного количества запасенного углерода при уничтожении лесной растительности. По оценкам экспертов, например, [1, 2], ежегодные мировые потери лесных ресурсов в последние десятилетия доходят до нескольких десятков миллионов гектаров. Активное освоение человеком природных территорий, покрытых лесами, в дополнение к возросшему количеству лесных пожаров, произошедших по вине человека, приводят

к существенному обезлесению территорий в разных странах. В связи с этим задачи мониторинга лесных экосистем, контроля незаконных рубок и устойчивого управления лесами являются приоритетными направлениями в сфере охраны окружающей среды и природных ресурсов регионов.

Более половины территории Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО), занимающей площадь более 530 тыс. кв. км, покрыто лесной растительностью. Активное освоение территории, связанное с разведкой, добычей и транспортировкой углеводородного сырья, приводит к необходимости вырубке лесных насаждений с целью обустройства необходимой обрабатываемой и транспортной инфраструктуры предприятий топливно-энергетического комплекса. Кроме того, в автономном округе ведется интенсивная лесозаготовка, в результате чего вырубке подвергаются довольно обширные территории лесного фонда.

С целью контроля за вырубкой лесных насаждений на территории Ханты-Мансийского автономного округа с 2014 г. ведется непрерывный космический мониторинг территории лесного фонда, направленный в том числе и на оперативное выявление незаконных лесных рубок. В результате была создана база данных «Реестр изменений лесного фонда ХМАО-Югры» [3], которая содержит более 15 тыс. записей, включающих информацию о выявленных лесных рубках. Наполнение указанной базы данных осуществлялось с использованием разновременных космических снимков, дешифрирование которых проводилось традиционными методами с использованием средств геоинформационной системы QGIS. Однако данный подход обладает рядом существенных недостатков, а именно: высокими требованиями к квалификации специалиста, осуществляющего дешифрирование, сравнительно низкой производительностью при обработке данных дистанционного зондирования Земли на большие площади, субъективностью и наличием ошибок дешифрирования, связанных с пропуском небольших по площади лесных рубок.

Вследствие достаточно низкой эффективности и высоких затрат при использовании традиционных методов анализа космических снимков актуальной является задача автоматизации процесса дешифрирования спутниковых изображений с целью выявления лесных рубок. Наиболее перспективными рассматриваются методы, основанные на использовании нейронных сетей для обнаружения изменений на лесных участках по космическим снимкам.

В [4–8] рассмотрены вопросы применения нейронных сетей для автоматизации процесса дешифрирования спутниковых изображений в задачах обнаружения изменений в состоянии лесных территорий. Как показывает анализ цитированных работ, большинство из них связано с экваториальными лесными территориями, на которых идут интенсивные процессы обезлесения. Специфика территории Ханты-Мансийского автономного округа определяется слаборазвитой транспортной инфраструктурой, труднодоступностью и высокой заболоченностью территории, вследствие чего рубка лесных насаждений производится преимущественно в зимний (снежный) период, который здесь длится не менее 6 месяцев в году. Поэтому методы оперативного выявления изменений лесного фонда по космическим снимкам на основе нейронных сетей, разработанные для экваториальных территорий, например, [4–8], не применимы для северных регионов. В связи с этим целью данной работы является разработка нейросетевой модели лесных рубок по оптическим космическим снимкам применительно к задачам мониторинга и картографирования лесных рубок на территории лесодобывающего региона на примере ХМАО.

1. Данные и методы

Для разработки нейросетевой модели лесных рубок была выбрана архитектура сверточной нейронной сети глубокого машинного обучения Unet++ [9], которая показала высокую эффективность в решении задач, связанных с сегментацией изображений [10–12]. Архитектура выбранной сети, адаптированная нами для обработки многоканальных изображений космических снимков размером 256 на 256 пикселей, была ориентирована на получение одноканальных изображений того же размера (рис. 1), где значения каждого пикселя изменяются в интервале от 0 до 1 и обозначают вероятность отнесения пикселя к лесной рубке.

На рис. 1 использованы англоязычные термины, принятые в научной литературе по нейронным сетям. В представленной модели сверточной нейронной сети основным вычислительным блоком является оператор свертки, обозначенный на рис. 1 $X^{i,j}$. Последовательное применение свертки на каждом шаге работы модели позволяет выделить характерные признаки лесной рубки

на космическом снимке, такие как границы, текстура, форма, цвет и др. При переходе Down-sampling происходит уменьшение размерности изображения с увеличением количества наиболее важных признаков, а при переходе Up-sampling производится увеличение размерности изображения и уменьшение количества признаков. Переход Skip connection передает изображение той же размерности, что и у входного изображения свертки. Оператор Sigmoid преобразует набор выходных значений из слоя свертки в вероятности. Это происходит путем сжатия значений в диапазон от 0 до 1, где значение 0 означает низкую вероятность, а значение 1 – высокую вероятность. Более подробное описание функционирования сверточной нейронной сети дано в [9].

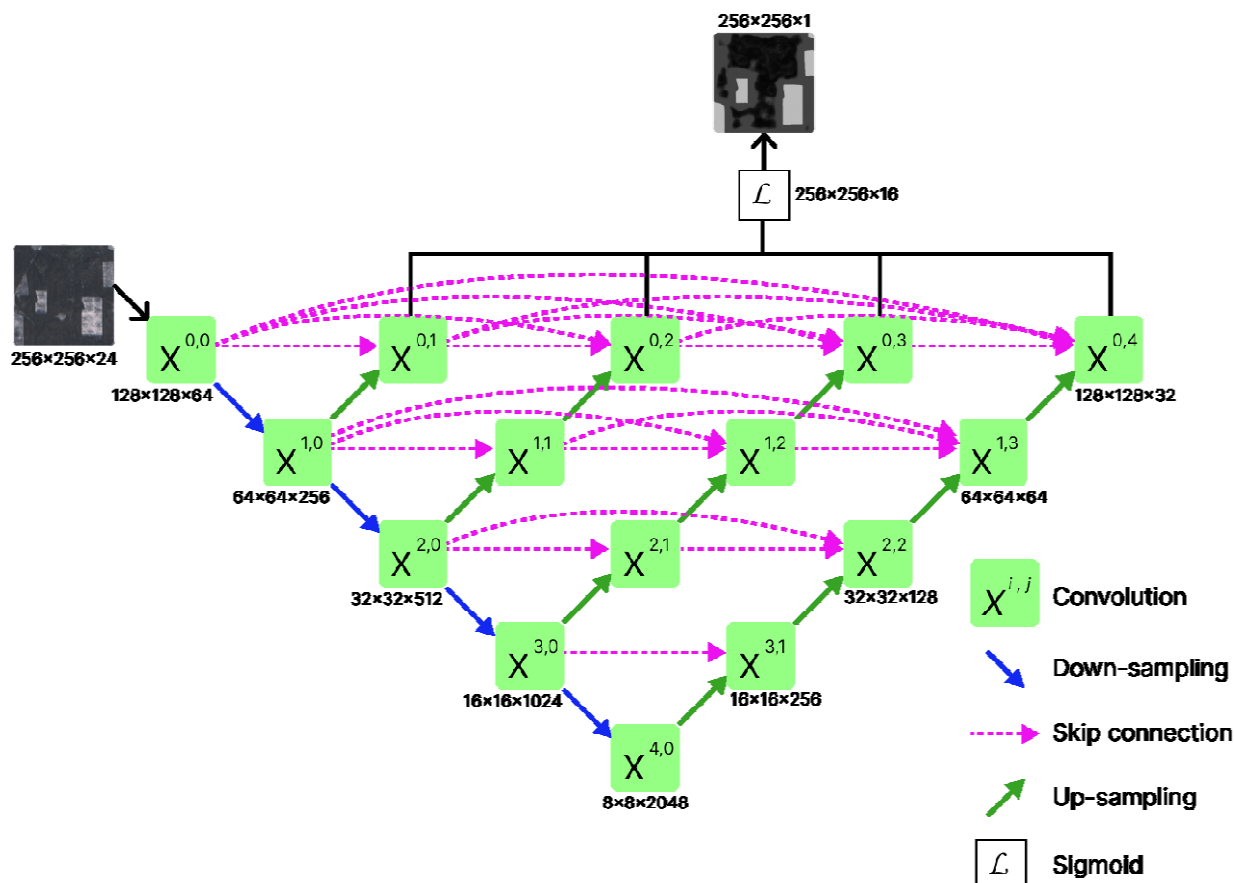


Рис. 1. Нейросетевая модель выявления лесных рубок по космическим снимкам
Fig. 1. Neural network model for detecting forest cuttings using satellite images

В качестве исходных данных для разработки модели лесных рубок были выбраны космические снимки со спутника Sentinel-2, который производит мультиспектральную съемку поверхности Земли с шириной полосы обзора 290 км и повторяемостью съемки одного и того же участка территории в северных широтах до нескольких десятков раз в год. Съемка проводится в 13 спектральных каналах с различным пространственным разрешением от 10 до 60 м. Используемые в работе снимки территории исследования были получены из открытых источников [13] и хранятся в региональном архиве космических снимков [14].

Общая схема формирования набора обучающих данных, состоящего из экспериментальных данных о лесных рубках (совокупности кадров, полученных из космических снимков) и размеченных данных (совокупности масок контуров лесных рубок для каждого кадра), для разработки модели представлена на рис. 2. В качестве источников исходной информации использовались указанная выше база данных выявленных лесных рубок на территории ХМАО и региональный архив космических снимков [3, 14]. Для каждой выявленной лесной рубки выбиралась пара разновременных космических снимков (до и после рубки), представляющих собой ортотрансформированные изображения с атмосферной коррекцией, пересчитанные в альbedo земной поверхности [15]. При этом с каждого снимка отбирались изображения с 12 спектральных каналов

за исключением 10-го (SWIR-Cirrus), предназначенного для обнаружения облаков и не содержащего информации о земной поверхности.



Рис. 2. Схема формирования набора обучающих данных
Fig. 2. Scheme for generating a set of training data

Далее изображения со всех спектральных каналов с разрешением 20 и 60 м с использованием модели нейронной сети глубокого обучения DeepSentinel-2 [16] преобразовывались в изображения с пространственным разрешением 10 м. На следующем шаге формировались 24-канальные растровые изображения, которые впоследствии разрезались на кадры размером 256 на 256 пикселей. Таким образом, каждый сформированный кадр содержал в себе информацию о территории лесного участка до рубки и после нее.

Границы векторных контуров выявленных лесных рубок (см. рис. 2) из базы данных конвертировались в растровый формат данных и далее разрезались на кадры размером 256 на 256 пикселей соответственно 24-канальным кадрам космических снимков. Пример отдельного кадра из набора обучающих данных (24 канала показаны как отдельные изображения) приведен на рис. 3, а маска контуров лесных рубок для него показана на рис. 4.

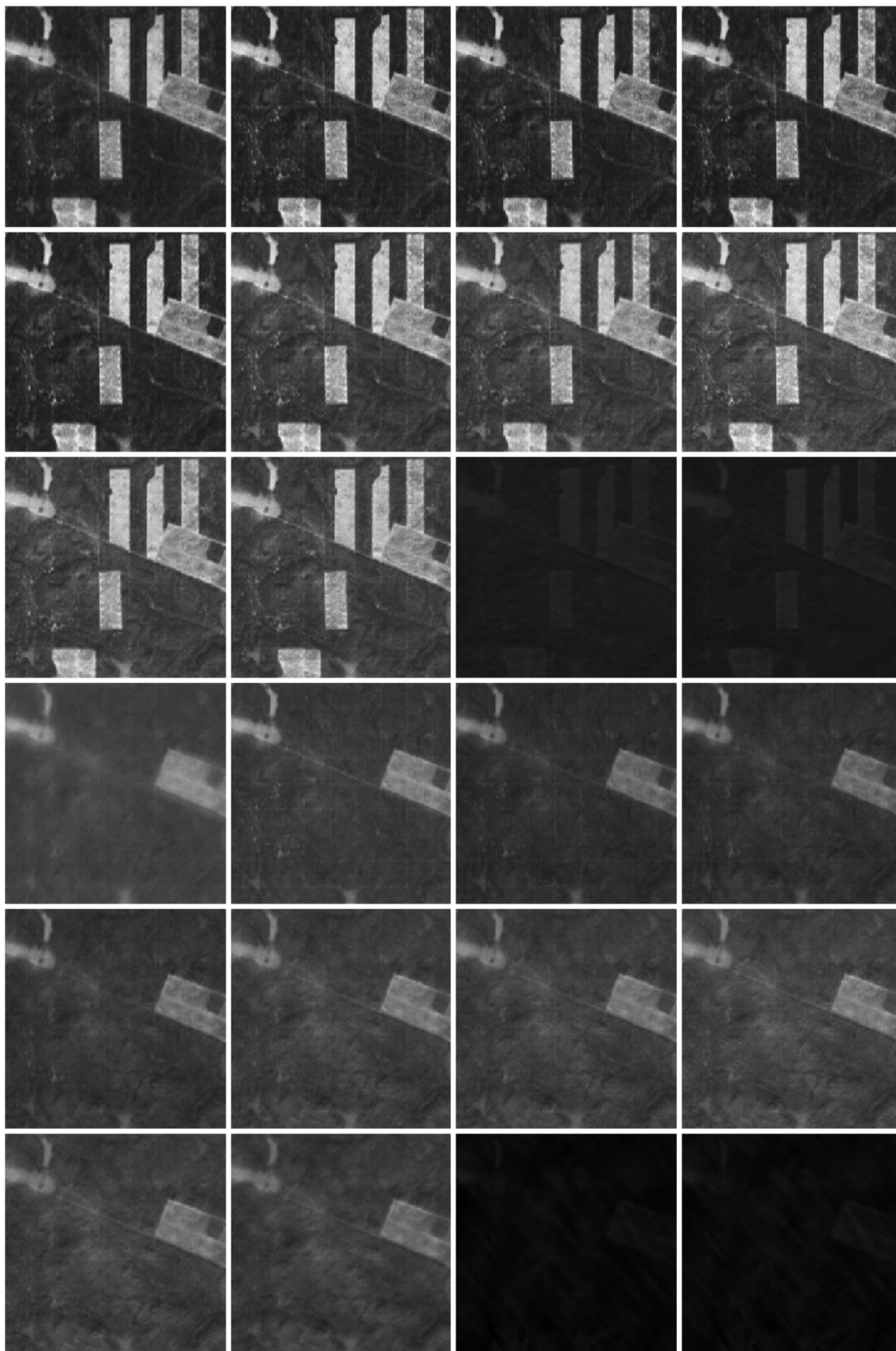


Рис. 3. Пример 24-канального кадра из набора обучающих данных
Fig. 3. An example 24-band frame from the training dataset

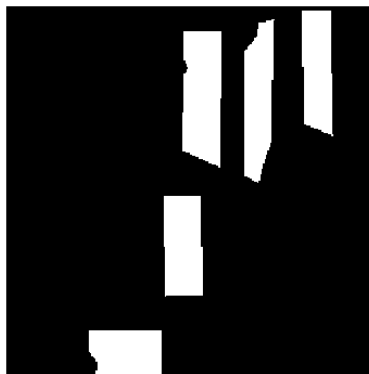


Рис. 4. Пример маски контуров лесных рубок из набора обучающих данных
Fig. 4. An example of a forest felling contour mask from the training dataset

2. Результаты

Для подготовки набора обучающих данных было обработано более 990 пар одновременных космических снимков за зимний (снежный) период 2018–2022 гг., из которых было сформировано более 70 тыс. 24-канальных кадров и соответствующих им масок контуров лесных рубок. Полученный в работе набор обучающих данных был разделен на обучающую, валидационную (проверочную) и тестовую (контрольную) выборки, объемы которых приведены в табл. 1.

Разделение набора обучающих данных на обучающую, валидационную и тестовую выборки

Таблица 1

Dividing the training data set into training, validation and test samples

Table 1

	Обучающая выборка Training sample	Валидационная выборка Validation sample	Тестовая выборка Test sample
Количество кадров Frames quantity	58 000	10 000	3600

Обучающая выборка используется для настройки параметров нейронной сети, количество которых в нашей модели составило 42 млн. Полученный на каждом шаге обучения модели прогноз наличия/отсутствия рубки на 24-канальном кадре сравнивается с размеченными данными (маской рубок). Затем проводится вычисление ошибки прогноза, с учетом которой производится корректировка всех параметров модели для минимизации ошибки.

Валидационная выборка используется для оценки качества нейронной сети в процессе обучения, для чего применяется метрика *IoU* (Intersection over Union) как мера оценки точности обработки изображения. Она вычисляется как отношение площади пересечения двух областей (область, которая была выделена моделью как рубка, и область реальной рубки на изображении) к их объединению и используется для сравнения результатов сегментации с размеченными данными. Чем ближе значение *IoU* к 1, тем лучше качество сегментации. В нашей работе процесс обучения занял 15 эпох и был остановлен по достижении разности значений метрики *IoU* в 14-й и 15-й эпохах менее 0,001. Итоговое значение метрики в результате обучения модели составило 0,858.

Тестовая выборка используется для оценки качества работы модели, построенной на основе обучающей выборки, и для проверки ее способности делать прогноз на новых данных. Она представляет собой набор незнакомых для модели данных, не используемых ранее в процессе обучения и валидации модели. В качестве критериев для оценки точности обученной модели нейронной сети нами применены метрики *Recall*, *Precision* и *F-мера*, значения которых, рассчитанные по тестовой выборке, приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, исследованные метрики дают близкие и достаточно высокие оценки, что позволяет использовать обученную нейронную сеть в практических задачах для картографирования новых лесных рубок по паре космических снимков.

Таблица 2
Рассчитанные значения точности модели по разным метрикам
Table 2
Calculated model accuracy values for different metrics

Метрика Metrics	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-мера</i>
Значение Value	0,85	0,87	0,85

Результат сегментирования лесных рубок по паре разновременных космических снимков зимнего периода с использованием разработанной нейросетевой модели показан на рис. 5. Заметим, что показанные на рис. 5 контуры рубок, определенные нейронной сетью, совпадают с контурами, выявленными оператором.

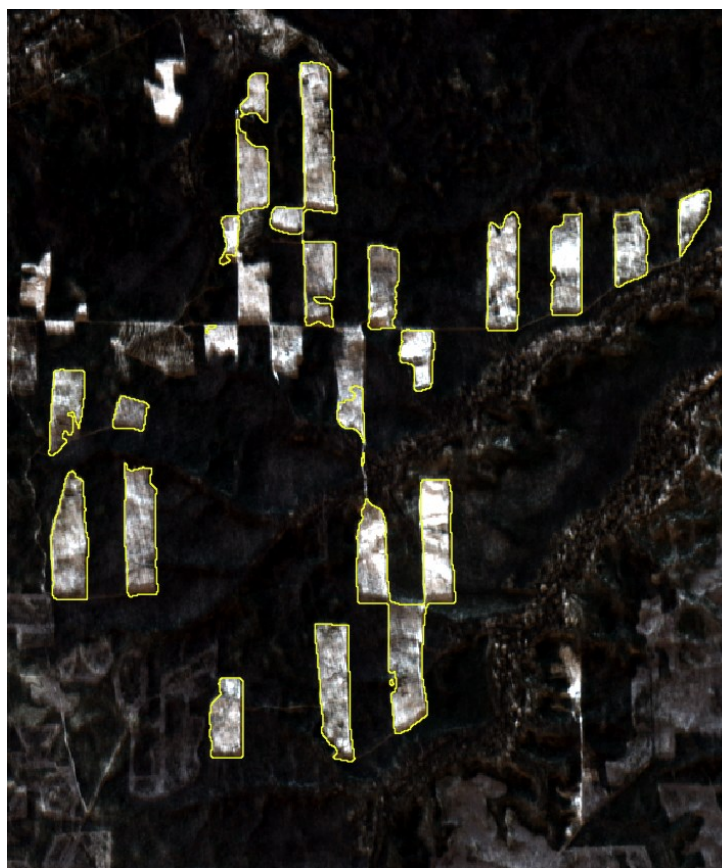


Рис. 5. Результат сегментирования лесных рубок по космическому снимку
Fig. 5. The result of forest felling segmentation by satellite image

Обучение и тестирование нейронной сети проводилось на персональном компьютере с 8-ядерным центральным процессором Intel Core i7-9800X частотой 3,8 ГГц, оперативной памятью 48 Гб и двумя видеокартами NVIDIA GeForce RTX 2080Ti 11 Гб видеопамати и заняло 2 суток.

Заключение

В статье предложена модель выявления лесных рубок на основе сверточной нейронной сети, позволяющая автоматизировать процедуры выявления и картографирования лесных рубок по космическим снимкам на территории лесного региона на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Новизну предложенной модели определяют, во-первых, использование зимних (снежных) космических снимков для обучения нейронной сети и, во-вторых, применение пар разновременных снимков, полученных до и после лесной рубки. Приведена схема формирования обучающего набора данных для обучения нейронной сети. Для этого использованы данные

о реальных лесных рубках, дешифрованные по спутниковым снимкам Sentinel-2, полученным за зимний период 2018–2022 гг. Проведена оценка точности модели с использованием известных метрик. Показано, что точность выявления лесных рубок с помощью разработанной модели достигает 85–87 %.

Список литературы

1. GlobalForestWatch. Global Annual Tree cover loss. URL: <https://gfw.global/40kCKzS> (дата обращения: 28.03.2023).
2. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020. URL: <https://doi.org/10.4060/ca8753en> (дата обращения: 28.03.2023).
3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620648 Российская Федерация. Реестр изменений лесного фонда ХМАО-Югры / Р.М. Габдрахманов, Г.А. Кочергин, М.А. Куприянов [и др.]; заявитель автономное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий». № 2016620412; заявл. 06.04.2016; опубл. 23.05.2016.
4. Large-scale oil palm tree detection from high-resolution satellite images using two-stage convolutional neural networks / W. Li, R. Dong, H. Fu, L. Yu // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 11. DOI: 10.3390/rs11010011
5. Deforestation detection with fully convolutional networks in the Amazon Forest from Landsat-8 and Sentinel-2 images / D.L. Torres, J.N. Turnes, P.J.S. Vega et al. // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 24. P. 5084. DOI: 10.3390/rs13245084
6. Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks / S.H. Khan, X. He, F. Porikli, M. Bennamoun // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. Vol. 55, no. 9. P. 5407–5423. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2707528
7. John D., Zhang C. An attention-based U-Net for detecting deforestation within satellite sensor imagery // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 107. P. 102685. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102685
8. Classification of landscape affected by deforestation using high-resolution remote sensing data and deep-learning techniques / S.H. Lee, K.J. Han, K. Lee et al. // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 20. P. 3372. DOI: 10.3390/rs12203372
9. Unet++: A nested u-net architecture for medical image segmentation / Z. Zhou, M.M.R. Siddiquee, N. Tajbakhsh, J. Liang // *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: 4th International Workshop, DLMIA 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 20, 2018, Proceedings 4*. Springer International Publishing, 2018. P. 3–11. DOI: 10.1007/978-3-030-00889-5
10. Jiang Y., Zhong C., Zhang B. AGD-Linknet: A Road Semantic Segmentation Model for High Resolution Remote Sensing Images Integrating Attention Mechanism, Gated Decoding Block and Dilated Convolution // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 22585–22595. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3253289
11. Doha R., Al Hasan M., Anwar S. Semantic Segmentation Approaches in Crop Row Detection // *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. IEEE, 2022. P. 2224–2230. DOI: 10.1109/BigData55660.2022.10021091
12. Ensemble Learning based on Classifier Prediction Confidence and Comprehensive Learning Particle Swarm Optimisation for Medical Image Segmentation / T. Dang, T.T. Nguyen, J. McCall, A.W.C. Liew // *2022 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. IEEE, 2022. P. 269–276. DOI: 10.1109/SSCI51031.2022.10022114
13. Copernicus Sentinel-2 data 2015, processed by ESA. URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (дата обращения: 02.03.2023).
14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620923 Российская Федерация. Архив космических снимков / Р.М. Габдрахманов, Г.А. Кочергин; заявитель автономное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий». № 2016620615; заявл. 10.05.2016; опубл. 06.07.2016. EDN RRGSPX.
15. Sentinel-2 processing level-2. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2> (дата обращения: 02.03.2023).

16. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural net-work / C. Lanaras, J. Bioucas-Dias, S. Galliani et al. // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Vol. 146. P. 305–319. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.018

References

1. GlobalForestWatch. Global Annual Tree cover loss. Available at: <https://gfw.global/40kCKzS> (accessed 28.03.2023).
2. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020. Available at: <https://doi.org/10.4060/ca8753en> (accessed 28.03.2023).
3. Gabdrakhmanov R.M., Kochergin G.A., Kupriyanov M.A. et al. *Reestr izmeneniy lesnogo fonda KhMAO-Yugry* [Register of Changes in the Forest Fund of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra]. Certificate of state registration of the database no. 2016620648 Russian Federation; no. 2016620412; decl. 06.04.2016; publ. 23.05.2016. (In Russ.)
4. Li W., Dong R., Fu H., Yu L. Large-scale oil palm tree detection from high-resolution satellite images using two-stage convolutional neural networks. *Remote Sensing*. 2018;11(1):11. DOI: 10.3390/rs11010011
5. Torres D.L., Turnes J.N., Vega P.J.S., Feitosa R.Q., Silva D.E., Marcato Junior J., Almeida C. Deforestation detection with fully convolutional networks in the Amazon Forest from Landsat-8 and Sentinel-2 images. *Remote Sensing*. 2021;13(24):5084. DOI: 10.3390/rs13245084
6. Khan S.H., He X., Porikli F., Bennamoun M. Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017;55(9):5407–5423. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2707528
7. John D., Zhang C. An attention-based U-Net for detecting deforestation within satellite sensor imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022;107:102685. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102685
8. Lee S.H., Han K.J., Lee K., Lee K.J., Oh K.Y., Lee M.J. Classification of landscape affected by deforestation using high-resolution remote sensing data and deep-learning techniques. *Remote Sensing*. 2020;12(20):3372. DOI: 10.3390/rs12203372
9. Zhou Z., Siddiquee M.M.R., Tajbakhsh N., Liang J. Unet++: A nested u-net architecture for medical image segmentation. In: *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: 4th International Workshop, DLMIA 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 20, 2018, Proceedings 4*. Springer International Publishing; 2018. P. 3–11. DOI: 10.1007/978-3-030-00889-5
10. Jiang Y., Zhong C., Zhang B. AGD-Linknet: A Road Semantic Segmentation Model for High Resolution Remote Sensing Images Integrating Attention Mechanism, Gated Decoding Block and Dilated Convolution. *IEEE Access*. 2023;11:22585–22595. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3253289
11. Doha R., Al Hasan M., Anwar S. Semantic Segmentation Approaches in Crop Row Detection. In: *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. IEEE; 2022. P. 2224–2230. DOI: 10.1109/BigData55660.2022.10021091
12. Dang T., Nguyen T.T., McCall J., Liew A.W.C. Ensemble Learning based on Classifier Prediction Confidence and Comprehensive Learning Particle Swarm Optimisation for Medical Image Segmentation. In: *2022 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. IEEE; 2022. P. 269–276. DOI: 10.1109/SSCI51031.2022.10022114
13. Copernicus Sentinel-2 data 2015, processed by ESA. Available at: <https://scihub.copernicus.eu/> (accessed 02.03.2023).
14. Gabdrakhmanov R.M., Kochergin G.A. *Arkhiv kosmicheskikh snimkov* [Archive of space images]. Certificate of state registration of the database no. 2016620923 Russian Federation; no. 2016620615; decl. 10.05.2016; publ. 06.07.2016. (In Russ.)
15. Sentinel-2 processing level-2. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2> (accessed 02.03.2023).
16. Lanaras C., Bioucas-Dias J., Galliani S., Baltsavias E., Schindler K. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural net-work. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018;146:305–319. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.018

Информация об авторах

Мельников Андрей Витальевич, д-р техн. наук, проф., директор, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; MelnikovAV@uriit.ru.

Кочергин Глеб Александрович, канд. техн. наук, руководитель центра космических услуг, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; KocherginGA@uriit.ru.

Аббазов Валерьян Ринатович, программист центра информационно-аналитических систем, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; AbbazovVR@uriit.ru.

Байсалимова Оксана Ахметсафаевна, главный специалист центра космических услуг, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; BaysalyamovaOA@uriit.ru.

Русанов Михаил Александрович, руководитель центра информационно-аналитических систем, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; RusanovMA@uriit.ru.

Полищук Юрий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник центра космических услуг, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; PolichukJM@uriit.ru.

Information about the authors

Andrey V. Melnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; MelnikovAV@uriit.ru.

Gleb A. Kochergin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Space Service Center, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; KocherginGA@uriit.ru.

Valeriy R. Abbazov, Programmer of the Center for Information and Analytical Systems, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; AbbazovVR@uriit.ru.

Oksana A. Baisalyamova, Chief Specialists of the Space Service Center, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; BaysalyamovaOA@uriit.ru.

Mikhail A. Rusanov, Head of the Center for Information and Analytical Systems, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; RusanovMA@uriit.ru.

Yury M. Polischuk, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chief Researcher of the Space Service Center, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; PolichukJM@uriit.ru.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023

The article was submitted 30.03.2023

APPLICATION OF CUTTER–JORDAN–BOSSEN METHOD FOR DATA HIDING IN THE IMAGE SPATIAL AREA

I.E. Zhigalov, ikgij@vlsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2664-4405>

M.I. Ozerova, ozarovam@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7658-010X>

A.V. Evstigneev, Grandvil1999@mail.ru

*Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs,
Vladimir, Russia*

Abstract. The article deals with the main methods of digital steganography and presents a classification scheme. Special attention is paid to Cutter–Jordan–Bossen method for hiding data in the spatial area of the image. **Aim.** The study of digital shorthand methods, as well as the assessment of their applicability for hiding information in images. The main task is to analyze the Cutter–Jordan–Bossen method for hiding data in the spatial area of the image and evaluate its effectiveness under various conditions. **Materials and methods.** In this work, various methods of digital shorthand were used, including the Cutter–Jordan–Bossen method. Images of various types and quality, as well as various embedding parameters were used for testing. **Results.** As a result of the study, it was revealed that the Cutter–Jordan–Bossen method is effective for hiding information in the spatial area of the image. The dependence of the data extraction quality on the embedding parameters was tested, which showed that the optimal parameters depend on the type of image and its quality. The resistance of the information hidden by this method to distortion during compression was also tested. The test results showed that JPEG compression, even at low and high energy values, leads to the destruction of information hidden in the container. It was found that the best results are achieved when using the Cutter–Jordan–Bossen method with optimal embedding parameters, which allows you to save hidden information when compressing an image. **Conclusion.** In conclusion, we can say that the study of digital shorthand methods and their application to conceal information in images is an urgent and important topic. The Cutter–Jordan–Bossen method has shown good results in hiding information in the spatial area of the image, but for each specific case it is necessary to choose the optimal embedding parameters. It was found that JPEG compression can significantly affect the quality of information extraction, so it is necessary to take this factor into account when choosing a method for hiding data in an image. In general, the study of digital shorthand techniques and their application to conceal information in images can be useful for various fields, such as the protection of confidential information and digital watermark.

Keywords: steganography, information hiding, data hiding in the spatial area of the image, digital watermarks, confidentiality of information

For citation: Zhigalov I.E., Ozerova M.I., Evstigneev A.V. Application of Cutter–Jordan–Bossen method for data hiding in the image spatial area. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3):16–23. DOI: 10.14529/ctcr230302

Научная статья
УДК 004.932.2:004.932.7
DOI: 10.14529/ctcr230302

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КУТТЕРА – ДЖОРДАНА – БОССЕНА ДЛЯ СОКРЫТИЯ ДАННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБЛАСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

И.Е. Жигалов, ikgij@vlsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2664-4405>

М.И. Озерова, ozarovam@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7658-010X>

А.В. Евстигнеев, Grandvil1999@mail.ru

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены основные методы цифровой стенографии и представлена схема классификации. Особое внимание уделено методу Куттера – Джордана – Боссена для сокрытия данных в пространственной области изображения. **Цель исследования:** изучение методов цифровой стенографии, а также оценка их применимости для сокрытия информации в изображениях. Основной задачей является анализ метода Куттера – Джордана – Боссена для сокрытия данных в пространственной области изображения и оценка его эффективности при различных условиях. **Материал и методы.** В данной работе были использованы различные методы цифровой стенографии, включая метод Куттера – Джордана – Боссена. Для тестирования были использованы изображения различного типа и качества, а также различные параметры встраивания. **Результаты.** В результате исследования было выявлено, что метод Куттера – Джордана – Боссена является эффективным для сокрытия информации в пространственной области изображения. Было проведено тестирование зависимости качества извлечения данных от параметров встраивания, которое показало, что оптимальные параметры зависят от типа изображения и его качества. Также была проверена стойкость информации, скрытой с помощью данного метода, к искажениям при сжатии. Результаты тестирования показали, что сжатие JPEG даже при низком уровне и высоком значении энергии приводит к уничтожению скрытой в контейнере информации. Было выявлено, что наилучшие результаты достигаются при использовании метода Куттера – Джордана – Боссена с оптимальными параметрами встраивания, что позволяет сохранить скрытую информацию при сжатии изображения. **Заключение.** В заключении можно сказать, что исследование методов цифровой стенографии и их применения для сокрытия информации в изображениях является актуальной и важной темой. Метод Куттера – Джордана – Боссена показал хорошие результаты при сокрытии информации в пространственной области изображения, но для каждого конкретного случая необходимо выбирать оптимальные параметры встраивания. Было выявлено, что сжатие JPEG может значительно повлиять на качество извлечения информации, поэтому необходимо учитывать этот фактор при выборе метода сокрытия данных в изображении. В целом, исследование методов цифровой стенографии и их применения для сокрытия информации в изображениях может быть полезным для различных областей, таких как защита конфиденциальной информации и цифровой водяной знак.

Ключевые слова: стенография, сокрытие информации, сокрытие данных в пространственной области изображения, цифровые водяные знаки, конфиденциальность информации

Для цитирования: Zhigalov I.E., Ozerova M.I., Evstigneev A.V. Application of Cutter–Jordan–Bossen method for data hiding in the image spatial area // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 16–23. DOI: 10.14529/ctcr230302

Introduction

Digital steganography is a science whose purpose is to conceal the very fact of the content of sensitive information in multimedia objects without attracting the attention of an observer [1].

For the time being, science is widely used by private individuals to transmit classified information through computer networks. There is also another common area – i.e., copy protection (copyright preservation) by embedding a digital watermark. Another area is to check the integrity of the document [2].

Digital steganography methods use the redundancy of a digital container, the choice of which is determined by the conditions of its sufficiency for embedding a hidden message so that the corresponding

changes are invisible neither to a person nor to special hardware and software, therefore images, audio and video are used as digital containers (Fig. 1).

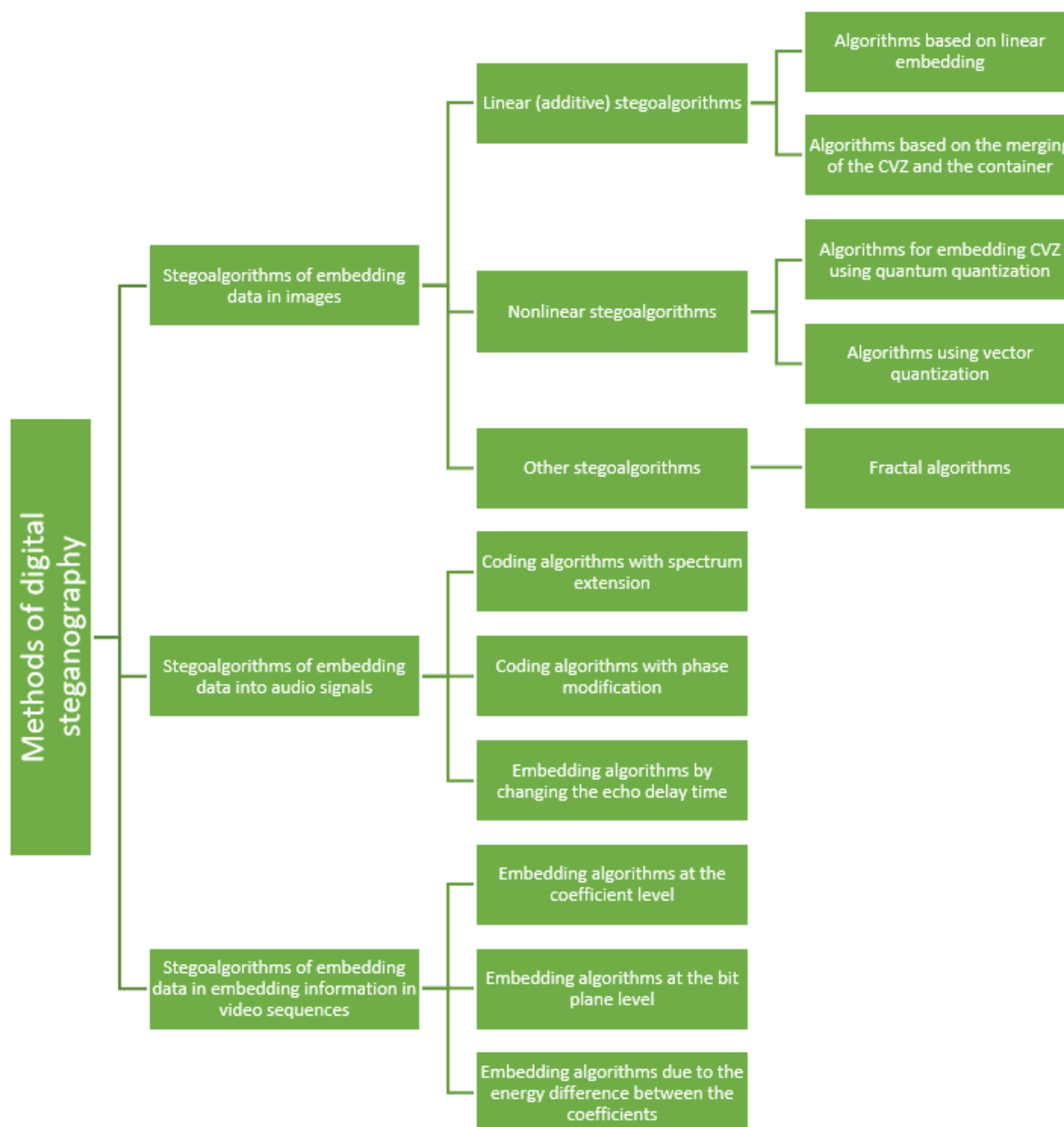


Fig. 1. Classification of digital steganography methods

According to the method of embedding information in the image, stegoalgorithms can be divided into linear (additive), nonlinear and others. In additive algorithms for the introduction of digital watermarks (DW), there assumed linear embedding of data, and their subsequent extraction in the decoder involves the use of correlation methods. In this case, the DW is either folded with the selected image, or “fused” into it. In nonlinear stegoalgorithms, scalar or vector quantization methods are used, when embedding information.

Hiding data in the spatial domain is embedding data into the original image using a computationally simple algorithm: the method of least significant bit (LSB); the method of block hiding; the method of replacing the palette; Cutter–Jordan–Bossen method. Hiding data in the frequency domain is the use of the same transformation as in compression: the method of replacing the values of the DCT coefficients (which is basic in JPEG); the method of hiding the values of the coefficients of Wavelet transform; using the features of file formats – hiding information in metadata and reserved file fields [3].

1. Kutter–Jordan–Bossen method

Kutter–Jordan–Bossen method, or the “cross method” is based on the property of the human visual system, for the eye to be least sensitive to the blue color.

The algorithm for embedding a message into an image: for embedding, you will need a container $C = \{R, G, B\}$ including information about the brightness of the red, green and blue colors of each pixel, m_i – i -th bit of the embedded message [4]. RC5 can be used as the secret key k , which sets a pseudo-random sequence for determining the coordinates of the pixel which is the object of embedding one bit of the message [5].

Among the stegoalgorithms, that cannot be directly attributed to linear or nonlinear algorithms using the ideas of fractal image encoding are now actively developing.

The implementation information will be a 1-bit message in a 1-pixel container [6]. When embedding, the brightness of the red and green colors remain unchanged, and the brightness of the blue changes according to the formula:

$$B'_{x,y} = \begin{cases} B_{x,y} + v \cdot L_{x,y}, & \text{when } m_i = 0; \\ B_{x,y} - v \cdot L_{x,y}, & \text{when } m_i = 1, \end{cases} \quad (1)$$

where $B_{x,y}$ is the brightness of the blue color in pixels with coordinates (x, y) ; v is a constant that determines the energy of the embedded bit, the larger it is, the better the resistance to interference, but the higher the visibility ($0 < v \leq 1$); $L_{x,y}$ is the pixel brightness, determined by the formula:

$$L_{x,y} = 0.299 \cdot R_{x,y} + 0.587 \cdot G_{x,y} + 0.114 \cdot B_{x,y}. \quad (2)$$

Besides, to reduce errors during extraction, you can repeat the embedding of a bit of information t times, which will enable to reduce energy (v) of the embedded bit. The optimal value can be considered $v \approx 0.15$ and $t < 20$ [4].

In order to perform the extraction, the recipient will have to predict the blue brightness value of the modified pixel based on the neighboring ones. The “cross” algorithm (pixels located in the same row and in the same column) is 7 by 7 in size [7].

To predict the value, you will need: a secret key k , the number of repetitions t , the dimension of the “cross” δ – the number of pixels on all sides from the center ($\delta = 3$ with sizes 7 by 7, Fig. 2) [8].

The prediction of the initial brightness of the modified pixel is made according to the formula:

$$B^{\wedge}_{x,y} = \frac{\sum_{i=-\sigma}^{\sigma} B_{x+i,y} + \sum_{i=-\sigma}^{\sigma} B_{x,y+i} - 2 \cdot B_{x,y}}{4 \cdot \sigma}. \quad (3)$$

Next, to determine the bit of the embedded message, the difference between the current and predicted values of the brightness of the blue color of the pixel is calculated, the resulting differences are averaged [9]:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} (B_{x,yi} - B^{\wedge}_{x,yi})}{\tau}. \quad (4)$$

And if $\bar{\delta} > 0$, then the embedded message bit $m_i = 1$, if $\bar{\delta} \leq 0$, then $m_i = 0$.

2. Testing

Embedding will occur in the image (Fig. 3a) having the size of 385×512 pixels and a bmp extension, message “Vladimir State University” with parameters: key $k = 375$, the number of rounds of calculation $r = 8$ (used for the RC5 cipher), the number of repetitions $r = 10$, energy $v = 0.2$; Fig. 3b being obtained as a result.

If you do not look closely at the image, then the modified pixels do not visually stand out, but with a detailed examination in the sky area at a special angle, you can notice the modified pixels. But if you look into the area of trees and grass, it will be quite difficult (almost impossible) to notice the modified pixels. I.e., we can conclude that the visual component of the stegosystem strongly depends on the origi-

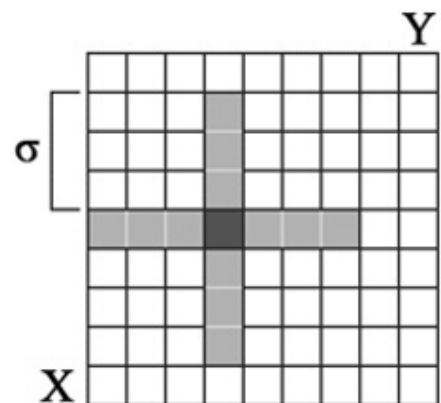


Fig. 2. Example of the evaluating “cross”

nal container. When extracting with the same embedding parameters and $\delta = 3$, we get the original message “Vladimir State University”.

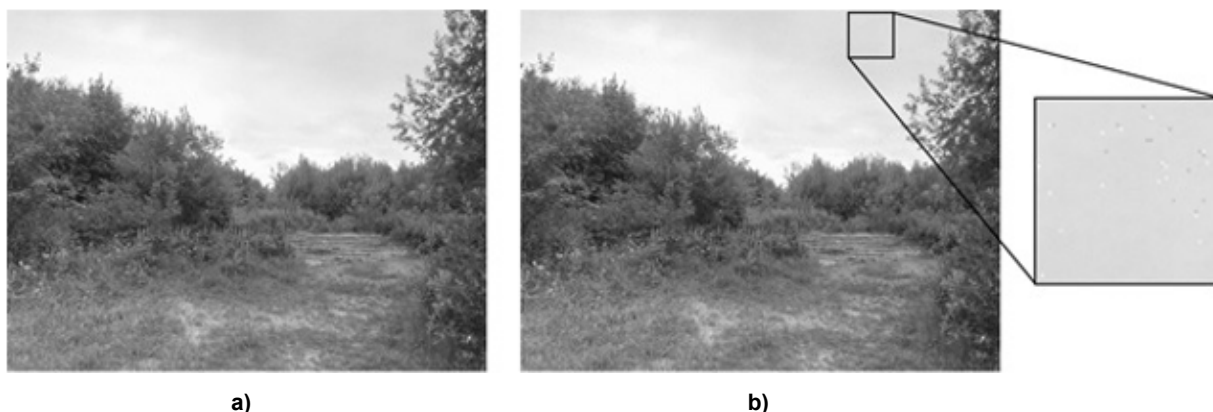


Fig. 3. Container: empty and filled

Let us conduct several tests of the dependence of the number of characters in the message on the percentage of correct extraction (Fig. 4).

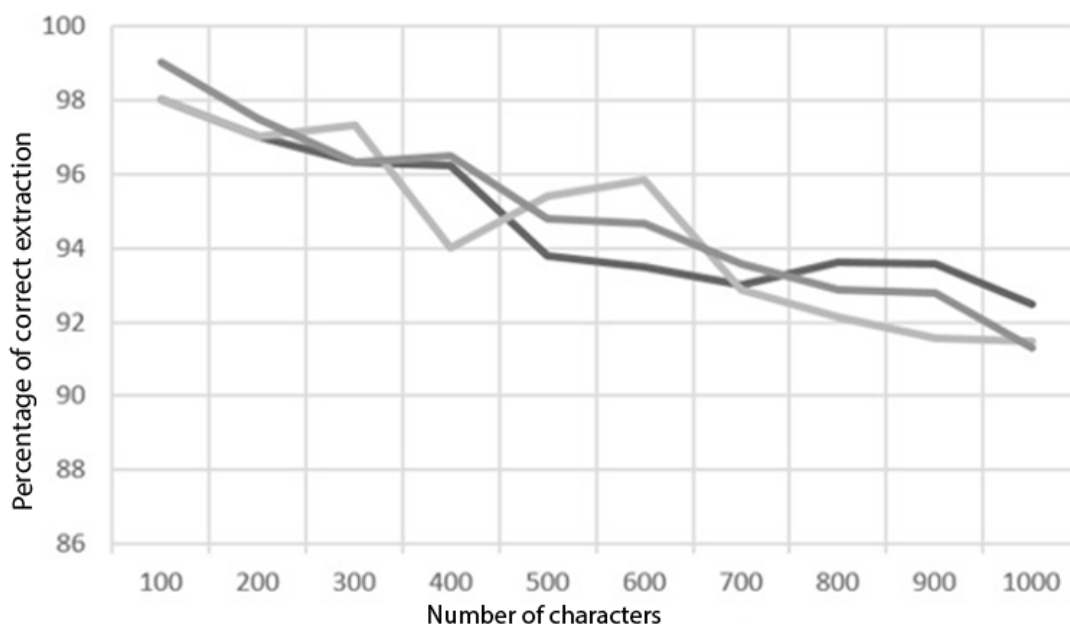


Fig. 4. Graph of the dependence of the number of characters on the percentage of correctness of the message extraction

We can make a positive conclusion that even with 1000 characters, the correctness of extracting a message from the image with a rather small resolution is above 90%. But it is obvious that a high number of characters degrades both the image quality and the extraction, since this will take up more space.

We will also conduct several tests when compressing a filled image into JPEG with the same parameters, and with the embedding energy equal to 0.9 (Fig. 5). Quality level 0 corresponds to maximum compression, and quality level 100 corresponds to minimum compression.

Embedded messages:

- 1 – @Ram:='{01^2-S#}!_S'
- 2 – QwErTy IoXaSdVgHjKlZx VbNqWxAh
- 3 – Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur

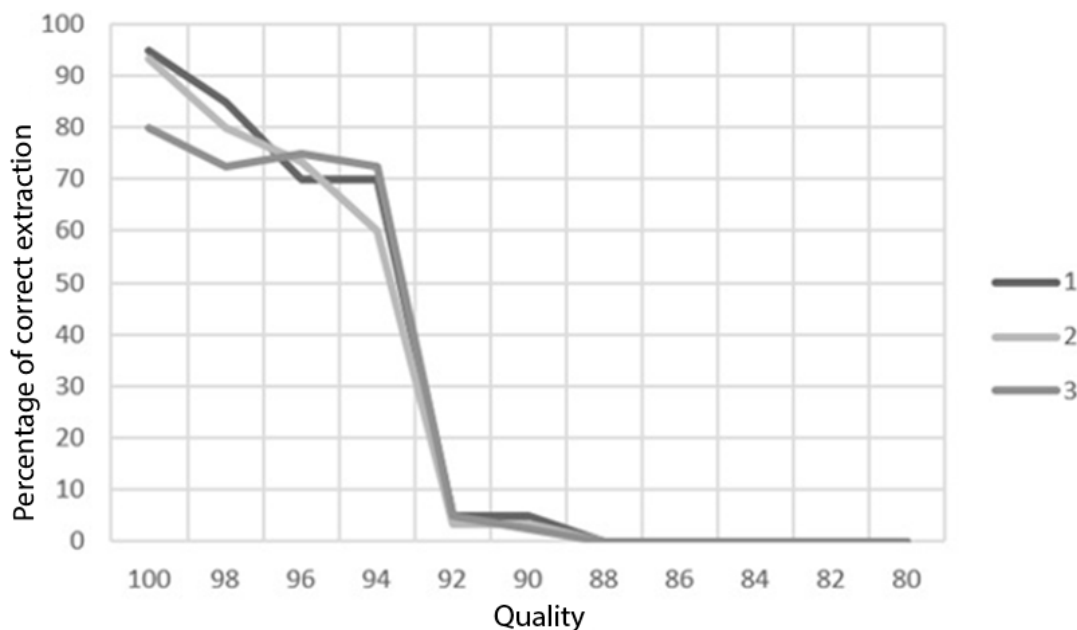


Fig. 5. Graph of the dependence of the quality level on the percentage of correctness of the message extraction

Thus, it can be concluded that JPEG compression, even at a low level and a high energy value, leads to the destruction of information hidden in the container, which is caused by the type of concealment method [10].

We will also conduct a test (Fig. 6) of the dependence of the embedding energy on the extraction quality with minimal compression of the filled image in JPEG with the same embedding parameters of the same three messages.

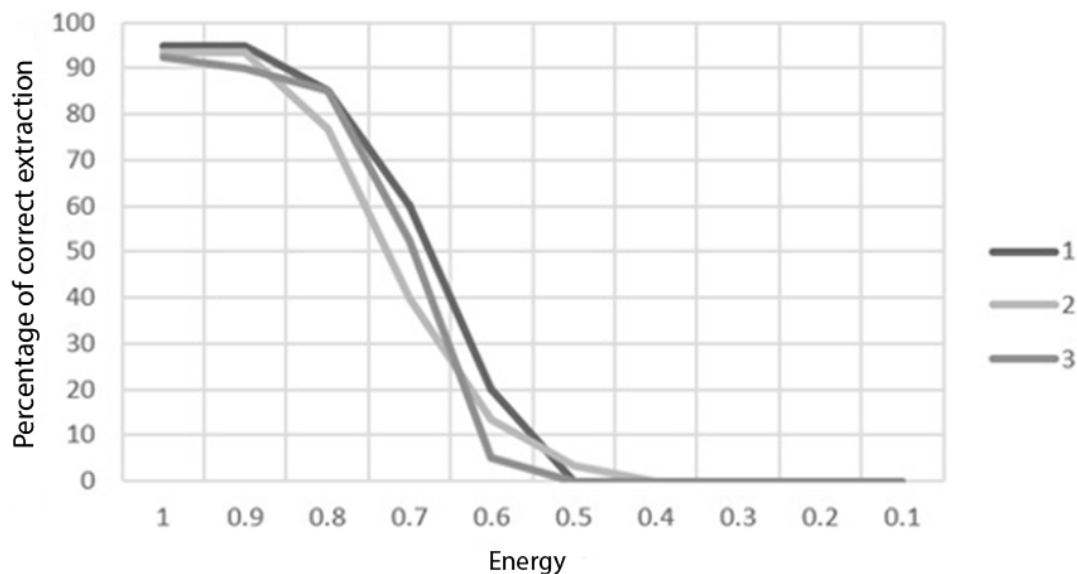


Fig. 6. Graph of energy dependence on the percentage of correctness of message extraction

Thus, this leads to the conclusion, that the optimal value of the embedding energy when compressed into JPEG lies in the range from 1 to 0.8. But such energy values will visually stand out and attract the attention of the attacker. So it is better to avoid compressing a container holding hidden information.

Conclusion

Today, due to the development of information technologies, the demand for personal information protection is growing. Digital steganography offers many new methods for this [11–13]. Digital ste-

ganography complements cryptography [14]. Their mutual integration will help to develop newer and more effective methods of ensuring security. It is also a promising and developing area of information protection, which still has problems with resistance to distortion (compression), as well as with the search for the optimal ratio of secrecy and the volume of secret data [15].

The authors express their gratitude to Associate Professor of the Department of “Foreign Languages of Professional Communication” Tatyana Ivanovna Koikova for her help and assistance in translating the article into English.

References

1. Chvarkova I.L., Tikhonenko S.G., Sadov V.S. *Povyshenie propusknoy sposobnosti i stoykosti steganograficheskikh sistem* [Increasing the throughput and durability of steganographic systems]. LAP LAMBERT Academic Publishing; 2013. 136 p. (In Russ.)
2. Ryabko B.Ya., Fionov A.N. *Osnovy sovremennoy kriptografii i steganografii* [Fundamentals of modern cryptography and steganography]. 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2013. 232 p. (In Russ.)
3. Korzhik V.I., Nebaeva K.A., Gerling E.Yu. *Tsifrovaya steganografiya* [Digital steganography]. Moscow: KnoRus; 2016. 225 p. (In Russ.)
4. Agranovskiy A.V., Balakin A.V., Gribunin V.G., Sapozhnikov S.A. *Steganografiya, tsifrovyye vodyanye znaki i stegoanaliz: monogr.* [Steganography, digital watermarks and steganalysis: monograph]. Moscow: Vuzovskaya kniga; 2009. 220 p. (In Russ.)
5. Zavetskaya T.V., Krakhmal M.V. The study of steganography methods during embedding hidden information in the frequency region of an image // *Informatics and Cybernetics*. 2020;1(19):18–26. (In Russ.)
6. Konakhovich G.F., Puzyrenko A.Yu. *Komp'yuternaya steganografiya. Teoriya i praktika* [Computer steganography. Theory and practice]. Kyiv: MK-Press; 2006. 288 p. (In Russ.)
7. Gubenko N.Ye., Sipakov D.S. Analysis of the features of digital steganography to protect information transmitted via open channels. *Informatics and Cybernetics*. 2015;2:28–38. (In Russ.)
8. Nazarova V.I. Stegositystem of the digital watermarks. *Information security of the regions*. 2010; 2(7):111–114. (In Russ.)
9. Zashcholkina K.V., Ivaschenko A.I., Ivanova E.N. Improvement of the Kutter–Jordan–Bossen method of information hiding. In: *MNPK “Modern information and electronic technologies”*. Odessa; 2013. P. 214–216. (In Russ.)
10. Bykov S.F. [JPEG compression algorithm from the position of computer steganography]. *Information Protection. Confidant*. 2000;3:26–31. (In Russ.)
11. Gribunin V.G., Okov I.N., Turintsev I.V. *Tsifrovaya steganografiya* [Digital steganography]. Moscow: SOLON-Press; 2009. 265 p. (In Russ.)
12. Cox I.J., Miller M.L., Bloom J.A., Fridrich J., Kalker T. *Digital watermarking and steganography*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishing; 2008. 624 p.
13. Dryuchenko M.A., Sirota A.A. Image stegoanalysis using deep neural networks and heteroassociative integral transformations. *Applied discrete mathematics*. 2022;55:35–58. (In Russ.) DOI: 10.17223/20710410/55/3
14. Vasina T.S. Review of modern steganography algorithms. *Science and education*. 2012;04:1–8. (In Russ.)
15. Okatov A.V. *Metody tsifrovoy steganografii* [Methods of digital steganography]. St. Petersburg: SUAI; 2016. 64 p. (In Russ.)

Список литературы

1. Чваркова И.Л., Тихоненко С.Г., Садов В.С. Повышение пропускной способности и стойкости стеганографических систем. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 136 с.
2. Рябко Б.Я., Фионов А.Н. Основы современной криптографии и стеганографии. 2-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 232 с.
3. Коржик В.И., Небаева К.А., Герлинг Е.Ю. Цифровая стеганография. М.: KnoRus, 2016. 225 с.
4. Стеганография, цифровые водяные знаки и стегоанализ: моногр. / А.В. Аграновский, А.В. Балакин, В.Г. Грибунин, С.А. Сапожников. М.: Вузовская книга, 2009. 220 с.

5. Завадская Т.В., Крахмаль М.В. Исследование методов стеганографии при встраивании скрытой информации в частотную область изображения // Информатика и кибернетика. 2020. № 1 (19). С. 18–26.
6. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: МК-Пресс, 2006. 288 с.
7. Губенко Н.Е., Сипаков Д.С. Анализ особенностей методов цифровой стеганографии для защиты информации, передаваемой по открытым каналам // Информатика и кибернетика. 2015. № 2. С. 28–38.
8. Назарова В.И. Стегосистемы цифровых водяных знаков // Информационная безопасность регионов. 2010. № 2 (7). С. 111–114.
9. Защелкин К.В., Ивашенко А.И., Иванова Е.Н. Усовершенствование метода скрытия данных Куттера – Джордана – Боссена // МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 2013. С. 214–216.
10. Быков С.Ф. Алгоритм сжатия JPEG с позиции компьютерной стеганографии // Защита информации. Конфидент. 2000. № 3. С. 26–31.
11. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. М.: СОЛОН-Пресс, 2009. 265 с.
12. Digital watermarking and steganography / I.J. Cox, M.L. Miller, J.A. Bloom et al. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishing, 2008. 624 p.
13. Дрюченко М.А., Сирота А.А. Стегоанализ цифровых изображений с использованием глубоких нейронных сетей и гетероассоциативных интегральных преобразований // Прикладная дискретная математика. 2022. № 55. С. 35–58. DOI: 10.17223/20710410/55/3
14. Васина Т.С. Обзор современных алгоритмов стеганографии // Наука и образование. 2012. № 04. С. 1–8.
15. Окатов А.В. Методы цифровой стеганографии. СПб.: ГУАП, 2016. 64 с.

Information about the authors

Илья Е. Zhigalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Information Systems and Software Engineering, Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia; ikgij@vlsu.ru.

Marina I. Ozerova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Information Systems and Software Engineering, Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia; ozarovam@rambler.ru.

Andrey V. Evstigneev, master's degree student of the Department of Information Systems and Software Engineering, Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia; Grandvil1999@mail.ru.

Информация об авторах

Жигалов Илья Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; ikgij@vlsu.ru.

Озерова Марина Игоревна, канд. техн. наук, доц. кафедры информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; ozarovam@rambler.ru.

Евстигнеев Андрей Васильевич, магистрант кафедры информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; Grandvil1999@mail.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted 18.03.2023

Статья поступила в редакцию 18.03.2023

НЕСТАНДАРТНЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЦЕНТРАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

А.В. Затонский¹, z Xenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

П.В. Плехов¹, onim@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5025-9342>

В.В. Захаров², metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

Н.Н. Христолюбов¹, nikolay.hristolubov@yandex.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена сравнению систем кондиционирования воздуха в центре обработки данных с учетом особенности его расположения в Пермском крае, РФ. Установлено, что применение более дорогой, но современной гибридной системы кондиционирования воздуха экономически целесообразно в данном регионе. **Цель работы.** Целью работы является оценка целесообразности и эффективности применения различных систем охлаждения воздуха с экономической точки зрения, в условиях размещения объекта на территории Пермского края. **Материалы и методы.** Сравниваются две системы охлаждения. Первая система охлаждения воздуха основана на прямой подаче холодного воздуха. Данная система имеет ограничения по температуре применения, ее можно использовать только при температурах окружающей среды ниже, чем температура охлаждаемого помещения примерно на 20 °С. Текущие затраты на электроэнергию, потребляемую на охлаждение помещения, в этом случае будут меньше. Вторая – классическая система кондиционирования, в которой охлаждение происходит за счет вскипания фреона в испарителе и последующего сжатия компрессором и переходов жидкую фазу в конденсаторе. Существуют различные вариации этой системы для практически любой климатической зоны. Текущие расходы (электроэнергия), вызванные работой этой системы, – выше. Но первоначальные затраты – меньше, так как такая система стоит дешевле. Ставится задача определить, будет ли положительный экономический эффект от внедрения системы с прямой подачей холодного воздуха. Исследование выполнено с помощью теоретических методов. Для этого взяты данные о температуре воздуха в г. Пермь за 2021 г. по дням и часам. **Результаты исследования.** Определено, какое количество дней и часов сможет работать одна или другая система: классического кондиционирования или гибридная система с возможностью прямой подачи охлажденного воздуха. Посчитаны затраты на электроэнергию при работе в первом и втором режимах. Определено количество необходимого климатического оборудования, с учетом его резервирования по схеме N+1. Определены примерные затраты на внедрение систем. **Обсуждение и заключение.** Выявлено, что затраты на внедрение более дорогой гибридной системы с поддержкой прямой подачи охлажденного воздуха в сравнении с классической системой кондиционирования окупятся в течение нескольких лет. Также определены существенные преимущества таких систем – более долгий срок службы вследствие меньшего использования компрессора системы охлаждения.

Ключевые слова: система кондиционирования ЦОД, Free Cooling, DX-система, дата-центр, движения воздушных масс в ЦОД

Для цитирования: Нестандартные подходы к организации климатических систем в центрах обработки данных / А.В. Затонский, П.В. Плехов, В.В. Захаров, Н.Н. Христолюбов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 24–34. DOI: 10.14529/ctcr230303

Original article

DOI: 10.14529/ctcr230303

NON-STANDARD APPROACHES TO CLIMATE SYSTEMS ORGANIZATION IN DATA PROCESSING CENTERS

A.V. Zatonkiy¹, z xenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

P.V. Plekhov¹, onim@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5025-9342>

V.V. Zakharov², metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

N.N. Khristolyubov¹, nikolay.hristolubov@yandex.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to comparison of air conditioning systems in a data processing center, taking into account peculiarities of its location, in Perm Krai, RF. It is established that the use of more expensive, but modern, hybrid air conditioning system is economically feasible in this region. **Purpose of work.** The aim of the work is to assess the feasibility and effectiveness of different air cooling systems from an economic point of view, under the conditions of the location of the facility in the Perm region. **Materials and methods.** Two cooling systems are compared. The first cooling system is based on a direct supply of cold air. This system has restrictions on the temperature of application, it can only be used at ambient temperatures lower than the temperature of the cooled room, about 20 °C. Current costs in the form of consumed electricity to cool the room in this case will be less. The second, classic air conditioning system. In which cooling occurs due to boiling of freon in evaporator and the following compression by compressor and transitions to liquid phase in condenser. There are different variations of this system for almost any climate zone. Running costs (electricity) caused by operation of this system are higher. But the initial costs are less, since this system costs less. The task is to determine whether there will be a positive economic effect from the introduction of a system with direct cold air supply. The research is done with the help of theoretical methods. For this purpose, data on the air temperature in the city of Perm for 2021 by day and hour were taken. **The results of the study.** Determined how many days and hours, can work one or the other system. Classical air conditioning or a hybrid system, with the possibility of direct supply of cooled air. Calculated the cost of electricity when working in the first and second modes. Determined the number of necessary climate control equipment, taking into account its redundancy under the scheme N+1. Approximate costs for the implementation of the systems have been determined. **Discussion and conclusion.** It was found that the cost of introducing a more expensive hybrid system with the support of direct chilled air, compared with the classical air conditioning system will pay off in a few years. Significant advantages of such systems are also identified. Longer service life due to less use of the compressor in the refrigeration system.

Keywords: data center air conditioning system, Free Cooling, DX-system, data center, air mass movement in data center

For citation: Zatonkiy A.V., Plekhov P.V., Zakharov V.V., Khristolyubov N.N. Non-standard approaches to climate systems organization in data processing centers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3):24–34. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230303

Введение

В свете глобального развития ИТ-технологий в РФ в последние годы и, как следствие, увеличения количества и мощностей центров обработки данных (ЦОД) затраты электроэнергии на системы кондиционирования также растут. Системы кондиционирования потребляют до 30–40 % электроэнергии ЦОД. При выходе их из строя или недостаточной мощности возможно нарушение работы ЦОД, ведущее к многим неприятным последствиям. Таким образом, тема снижения затрат на климатические системы никогда не потеряет актуальность. Это подтверждает, например, информация о росте потребления электроэнергии центрами обработки данных (рис. 1), отраженная в работе [1] о том, что доля мирового потребления электроэнергии ЦОД в 2025 г. составит порядка 33 % при 10 % в 2015 г.

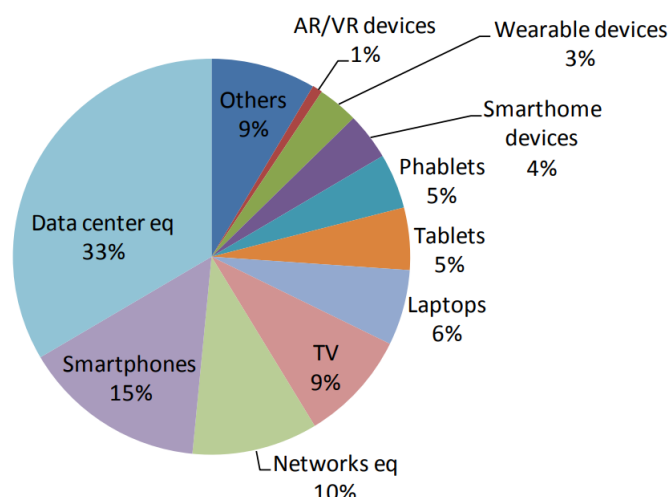


Рис. 1. Прогноз доли мирового производства информационно-коммуникационных технологий в потреблении электроэнергии по видам на 2025 г.

Fig. 1. Forecast of the share of global information and communication technology production in electricity consumption by type in 2025

- 3) малые площади позволяют размещать ЦОД в условиях густонаселенных мегаполисов ближе к потребителю услуг;
- 4) снижение ТСО.

О прогнозах тенденции роста в данном направлении можно судить на основании результата отраслевого исследования ЦОД «2020 Data Center Industry Survey Results», опубликованного Uptime institute [4].

1. Проблемы связанные с использованием оборудования высокой плотности

Исследования компании Colocation America демонстрируют тренд показателей плотности в разрезе роста мощности на одну стойку в ЦОД (рис. 2).



Рис. 2. График роста средней мощности на серверную стойку в период с 2008 по 2020 г.

Fig. 2. Graph of growth of average capacity per server rack from 2008 to 2020

Использование серверов высокой плотности (*blade chassis*) приводит к превышению возможностей климатических систем ЦОД с классическим подходом к охлаждению (использование

Кроме этого, развитие технологий серверного оборудования ведет к высокой плотности их размещения в помещениях ЦОД [2]. Плотностью центра обработки данных называют количество потребляемых киловатт на один серверный шкаф. В ближайшее время вектор развития данного направления не изменится, об этом можно судить по количеству преимуществ от его применения. Об этих преимуществах неоднократно заявлялось крупными строителями и эксплуататорами данных объектов [2, 3].

Плюсы, полученные от развития ЦОД высокой плотности:

- 1) снижение стоимости услуг для потребителя (повышение привлекательности и конкурентоспособности на рынке);
- 2) снижение стоимости строительства и аренды ЦОД;

прецизионных кондиционеров и перфорированного напольного покрытия в зоне забора воздуха оборудованием). Конструктивные особенности таких ЦОД предполагают равномерное распределение рабочих нагрузок, что проблематично при использовании вышеупомянутых технологий. Это делает невозможным дальнейшую эксплуатацию традиционного механизма обеспечения отказоустойчивости. Спроектированное по схеме N+1 климатическое оборудование будет вынуждено работать на полную мощность и потеряет функции резервирования. Также будет утерян функционал периодической ротации, что неизбежно приведет к повышенному износу оборудования. Использование механизмов миграции виртуальных машин и тиринга в системах хранения данных делает фиксацию горячей точки¹ невозможным, так как горячие участки становятся трудноуловимыми. Динамическое распределение нагрузки средствами гипервизоров максимизирует использование их потенциала и, как следствие, рост потребления электроэнергии и тепловыделения. Примеры и причины локального перегрева на рис. 3.

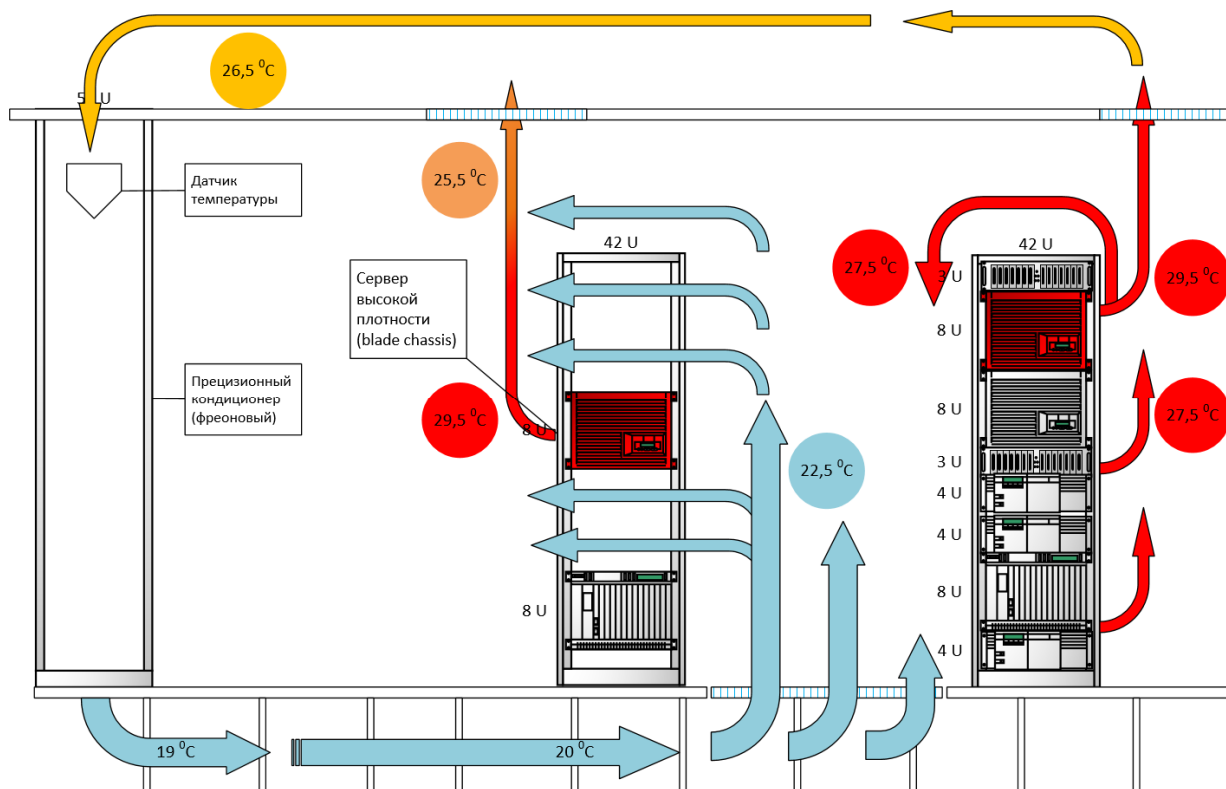


Рис. 3. Графическое представление движения воздушных масс в ЦОД²
Fig. 3. Graphical representation of air mass movement in the data center

Простой и экономически эффективный способ, позволяющий устранить данную проблему, – это модернизация климатических систем путем управления воздушным потоком. Проблемы перегрева оборудования в примере (см. рис. 3) связаны не с недостатком холодопроизводительности системы кондиционирования, а с неправильным распределением воздушных масс. В данном примере правая стойка не может получить достаточное количество холодного воздуха и поэтому вынужденно компенсирует разницу, втягивая горячий воздушный поток с тыльной стороны стойки. Левая стойка смешивает воздушные потоки горячего и холодного коридора, занижая температурные показатели датчика на кондиционере, что провоцирует снижение эффективности работы последнего. Можно сделать вывод, что действия, приводящие к уменьшению утечки и рециркуляции воздуха, будут эффективны в устранении зон с избытком тепла (рис. 4).

¹ Горячая точка – зона размещения ИТ-оборудования с температурой, превышающей допустимое значение, установленное в рекомендациях ASHRAE TC 9.9 [7].

² Горячие точки возникают чаще всего в верхней части стойки (рекомендации по тепловым нормам ASHRAE [7]).

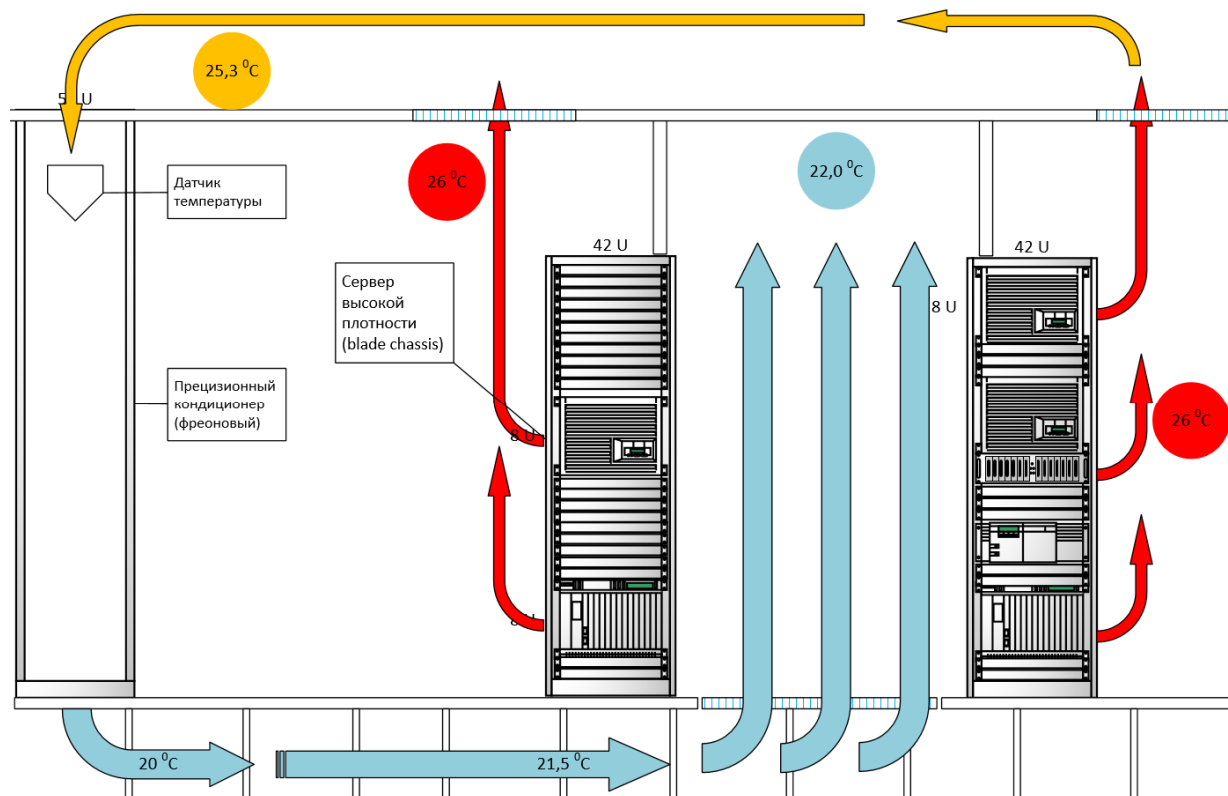


Рис. 4. Графическое представление движения воздушных масс в ЦОД с использованием системы разделения горячего и холодного коридора

Fig. 4. Graphical representation of air mass movement in a data center using a hot and cold aisle separation system

2. Материалы и методы

На примере конкретного объекта рассмотрим систему изоляции воздушных коридоров и эффективность использования прямого *Free Cooling* в климатических условиях Пермского края [5, 6, 10].

Вводные:

Место строительства – Пермский край. Расчетная географическая широта – 59° с. ш.;

- 20 серверных шкафов 600×1200 мм 42U;
- Максимальная мощность на один серверный шкаф – 10 кВт;
- Максимальная мощность на машинный зал – 170 кВт (ИТ-нагрузка);
- Схема резервирования системы бесперебойного питания – $2N$;
- Схема резервирования систем кондиционирования – $N+1$.

Для удаления теплоступлений в помещении машинного зала использованы кондиционеры с холодопроизводительностью не менее 92,7 кВт. Применяется резервирование кондиционеров $N+1$, то есть для удаления всех теплопритоков достаточно двух кондиционеров, третий находится в резерве. Кондиционеры оборудованы пароувлажнителями для поддержания заданного уровня влажности в машинном зале. Направление подачи воздуха осуществляется под фальшполом, забор воздуха производится сверху.

Для удаления теплоступлений в помещении ИБП применены шкафные прецизионные кондиционеры с холодопроизводительностью каждого не менее 25 кВт [7]. Применяется резервирование кондиционеров $N+1$, то есть для удаления всех теплопритоков достаточно одного кондиционера, второй находится в резерве. Направление подачи воздуха осуществляется фронтально вверх, забор воздуха производится с фронта [8–10].

Сравнивать будем два варианта систем кондиционирования: классическую *DX*-систему кондиционирования и *DX*-систему кондиционирования с функцией *Free Cooling* (свободное охлаждение). В качестве хладоносителя в режиме *Free Cooling* используется фреон [11]. Переход сис-

темы кондиционирования в режим *Free Cooling* происходит при температуре уличного воздуха +2 °С и ниже [12].

Для определения количества часов, в которые система кондиционирования будет работать в режиме *Free Cooling*, были применены статистические данные метеонаблюдений в г. Пермь за 2021 г. График изменения средней суточной температуры за 2021 г. представлен на рис. 5. Количество дней и часов фреоновой *DХ*-системы с функцией *Free Cooling* в летний и зимний периоды года приведены в табл. 1. Температура воздуха использована для г. Пермь [13–16].

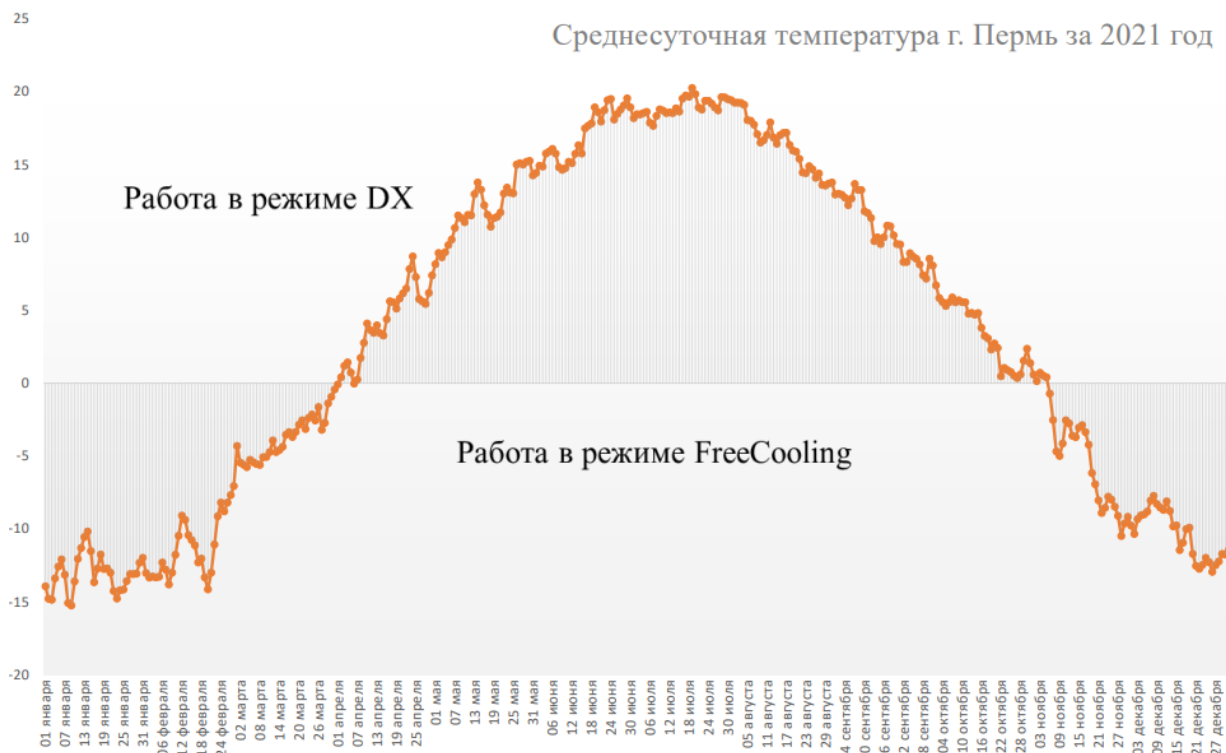


Рис. 5. График изменения средней суточной температуры за 2021 г. для г. Пермь
Fig. 5. The graph of changes in the average daily temperature for the year 2021 for Perm

Время применения рассматриваемых систем кондиционирования
Time of application of the air conditioning systems under consideration

Таблица 1
Table 1

Температурный диапазон	Количество дней	Количество часов
От -40 до +2 °С (Free Cooling)	187	4488
От +1 до +40 °С	178	4272
Итого:	365	8760

3. Результаты исследования

Ниже представлено сравнение систем с использованием функции *Free Cooling* и без нее. Также рассмотрены аналитические и расчетные сравнения решений с расчетным совокупным экономическим эффектом. В табл. 2 приведены расчетные проектные данные фреоновой *DХ*-системы охлаждения без функции *Free Cooling*, а также максимальное электропотребление одного *DХ*-шкафного прецизионного кондиционера, установленного для охлаждения машинного зала.

Максимальное электропотребление одного *DХ*-шкафного прецизионного кондиционера, установленного для охлаждения помещения ИБП, представлено в табл. 3.

Максимальное электропотребление системы кондиционирования ЦОД с применением фреоновых *DХ*-систем охлаждения без функции *Free Cooling* при 100 % проектной ИТ-нагрузке 170 кВт представлено в табл. 4.

Таблица 2

Электропотребление при максимальной проектной тепловой нагрузке в ЦОД.
Шкафной прецизионный кондиционер (Машзал)

Table 2

Electrical consumption at maximum design heat load in data center.
Cabinets precision air conditioner (Machine room)

Температура на улице, °С	Компрессор, кВт/ч	Пароувлажнитель, кВт/ч	Вентиляторы внутреннего блока, кВт/ч	Конденсатор, кВт/ч	Общая мощность потребления, кВт/ч
От -40 до +40	23,26	6,75	3,6	3,2	36,81

Таблица 3

Электропотребление при максимальной проектной тепловой нагрузке в ЦОД.
Шкафной прецизионный кондиционер (ИБП)

Table 3

Electrical consumption at maximum design heat load in data center.
Cabinet precision air conditioner (UPS)

Температура на улице, °С	Компрессор, кВт/ч	Пароувлажнитель, кВт/ч	Вентиляторы внутреннего блока, кВт/ч	Конденсатор, кВт/ч	Общая мощность потребления, кВт/ч
От -40 до +40	3,97	0	1,18	0,9	6,05

Таблица 4

Итоговая потребляемая мощность

Table 4

Total power consumption

Оборудование	Мощность, кВт/ч	Одновременная работа, кол.	Общая мощность, кВт/ч
Шкафной прецизионный кондиционер (Машзал)	36,81	2	73,62
Шкафной прецизионный кондиционер (ИБП)	6,05	1	6,05
Итого:			79,67

Поскольку система кондиционирования имеет единственный режим работы на фреоновом контуре, а режим работы ЦОД – $24 \times 7 \times 365$, то при допущении 100 % проектной ИТ-нагрузки в 170 кВт годовое потребление системы кондиционирования в натуральных и денежных единицах при средней стоимости 1 кВт/ч, равной 6 руб., приведено в табл. 5.

Таблица 5

Затраты на электроэнергию

Table 5

Electricity costs

Режим	Мощность системы кондиционирования, кВт/ч	Кол-во часов в году	Общая потребленная энергия в год, кВт/ч	Стоимость 1 кВт/ч, руб.	Общие затраты на электроэнергию, руб.
Круглогодичный	79,67	8760	697 909,20	6,00	4 187 455,20

Ниже рассмотрим аналогичные расчетные проектные данные, опираясь на ранее полученные данные о времени работы в различных режимах, но для фреоновой DX-системы охлаждения с функцией *Free Cooling*.

Максимальное электропотребление фреоновой DX-системы охлаждения ЦОД с функцией *Free Cooling* в диапазоне уличных температур воздуха от +2 °С и выше не будет отличаться от максимального потребления систем кондиционирования без функции *Free Cooling* и составит 79,67 кВт/ч.

Максимальное электропотребление одного фреонового шкафного прецизионного кондиционера в режиме *Free Cooling* (+2 °С и ниже), установленного для охлаждения машинного зала, представлено в табл. 6.

Таблица 6

Электропотребление *Free Cooling* системы (зимний режим).
Шкафной прецизионный кондиционер (Машзал)

Table 6

Electrical consumption of *Free Cooling* system (winter mode).
Cabinets precision air conditioner (Machine room)

Температура на улице, °С	Компрессор, кВт/ч	Пароувлажнитель, кВт/ч	Вентилятор внутреннего блока, кВт/ч	Конденсатор, кВт/ч	Насос, кВт/ч	Общая мощность потребления, кВт/ч
От -40 до +2	0	7,5	3,6	3,2	0,6	14,9

Максимальное электропотребление одного фреонового шкафного прецизионного кондиционера в режиме *Free Cooling* (+2 °С и ниже), установленного для охлаждения помещения ИБП, представлено в табл. 7.

Таблица 7

Электропотребление *Free Cooling* системы (зимний режим).
Шкафной прецизионный кондиционер (ИБП)

Table 7

Electrical consumption of *Free Cooling* system (winter mode).
Cabinets precision air conditioner (UPS)

Температура на улице, °С	Компрессор, кВт/ч	Пароувлажнитель, кВт/ч	Вентилятор внутреннего блока, кВт/ч	Конденсатор, кВт/ч	Насос, кВт/ч	Общая мощность потребления, кВт/ч
От -40 до +2	0	0	1,18	0,9	0,3	2,38

Максимальное электропотребление системы кондиционирования ЦОД с применением фреоновых *DX*-систем охлаждения в режиме *Free Cooling* при 100 % проектной ИТ-нагрузке 170 кВт представлено в табл. 8).

Таблица 8

Итоговая потребляемая мощность (система в режиме *Free Cooling*)

Table 8

Total power consumption (system in "Free Cooling" mode)

Оборудование	Мощность, кВт/ч	Одновременная работа, кол.	Общая мощность, кВт/ч
<i>DX</i> + <i>Free Cooling</i> шкафной прецизионный кондиционер (Машзал)	14,9	2	29,8
<i>DX</i> + <i>Free Cooling</i> шкафной прецизионный кондиционер (ИБП)	2,38	1	2,38
Итого:			32,18

Рассматриваемая система кондиционирования имеет несколько режимов работы при допущении 100 % проектной ИТ-нагрузки в 170 кВт. Годовое потребление системы кондиционирования в натуральных и денежных единицах при средней стоимости 1 кВт/ч, равной 6 руб., приведено в табл. 9.

Сравнение затрат электроэнергии

Comparison of electricity costs

Режим	Мощность системы кондиционирования, кВт/ч	Кол-во часов в году	Общая потребленная энергия в год, кВт/ч	Стоимость 1 кВт/ч, руб.	Общие затраты на электроэнергию, руб.
Летний	79,67	4 272	340 350,24	6,00	2 042 101,44
Зимний	32,18	4 488	144 423,84	6,00	866 543,04
Итого:			484 774,08		2 908 644,48

Обсуждение и заключение

Из всего вышеописанного можно сделать вывод, что, согласно приведенным выше расчетам, суммарное годовое электропотребление двух типов систем кондиционирования отличается на 31 %, а в денежном выражении применение системы кондиционирования с функцией *Free Cooling* позволит ежегодно экономить только на электроэнергии около 1,3 млн руб., что успешно продемонстрировано в таблицах. Учитывая срок службы ЦОД и систем кондиционирования в частности, на протяжении 10 лет экономия средств составит более 13 млн руб. Учитывая разницу стоимости двух типов систем не более 26 %, система кондиционирования с функцией *Free Cooling* окупается за короткий срок (около 2 лет). Помимо существенной экономии на электроэнергии, в системах с функцией *Free Cooling* выше срок службы (на 40 %) самого дорогостоящего компонента любых фреоновых систем – компрессора, так как при работе в режиме *Free Cooling* компрессор не участвует.

Эффективность предложенной схемы была рассмотрена с экономической точки зрения, в ходе исследования был предложен метод вычисления экономии при введении естественного охлаждения в различных климатических регионах. Предложенный способ позволяет рассчитывать экономический эффект от применения классической системы регулировки климата и реализации *Free Cooling*. Наибольшую эффективность режим свободного охлаждения имеет в зимний и переходный периоды года. В летний период фрикулинг применим в регионах с низким показателем температур наружного воздуха.

Список литературы

1. Andrae A.S.G., Edler T. On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 // Challenges. 2015. Vol. 6. P. 117–157. DOI: 10.3390/challe6010117
2. Koronen C., Åhman M., Nilsson L.J. Data centres in future European energy systems – energy efficiency, integration and policy // Energy Efficiency. 2020. Vol. 13, no. 1. P. 129–144. DOI: 10.1007/s12053-019-09833-8
3. Lawrence A. Rack Density is Rising // Uptime Institute Blog. New York, 2020. URL: <https://journal.uptimeinstitute.com/rack-density-is-rising>.
4. Ascianto R., Lawrence A. 2020 Data Center Industry Survey Results. New York: Uptime Institute, 2020. 443 p.
5. Rasmussen N. Guidelines for specifications of data center power density. American Power Conversion, 2005. 25 p.
6. СН 512-78. Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин. М.: Стройиздат, 1979. 28 с.
7. Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices. ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9, 2016. 60 с.
8. Rasmussen N. Calculating Total Cooling Requirements for Data. American Power Conversion, 2003. 9 с.
9. СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха». М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2020. 153 с.
10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 год. М.: Росгидромет, 2014. 109 с.

11. Чернов А.Н. Повышение эффективности работы кондиционеров, охлаждающих оборудование в центрах обработки данных: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2012. 123 с.
12. Данилов О.Л., Гаряев А.Б., Яковлев И.В. Энергосбережение в теплоэнергетике и тепло-технологиях. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 424 с.
13. Климатические данные. Просмотр климатических данных Practices [Электронный ресурс]. URL: <http://pogoda-service.ru/climate.php> (дата обращения: 13.12.2022).
14. Расписание погоды. Архив погоды [Электронный ресурс]. URL: https://tp5.ru/Погода_в_мире (дата обращения: 14.12.2022).
15. Плехов П.В., Мордвинова В.Д. Статистическая проверка примет о погоде применительно к Астраханской области // Астраханский вестник экологического образования. 2021. № 4 (64). С. 142–146. DOI: 10.36698/2304-5957-2021-4-142-146
16. Zatonkiy A., Bazhenov R., Beknazarova S. Advantages of freeware-based simulation tools for technical and technological modeling // Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021. P. 786–790.

References

1. Andrae A.S.G., Edler T. On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*. 2015;6:117–157. DOI: 10.3390/challe6010117
2. Koronen C., Åhman M., Nilsson L.J. Data centres in future European energy systems – energy efficiency, integration and policy. *Energy Efficiency*. 2020;13(1):129–144. DOI: 10.1007/s12053-019-09833-8
3. Lawrence A. Rack Density is Rising. *Uptime Institute Blog*. New York; 2020. Available at: <https://journal.uptimeinstitute.com/rack-density-is-rising>.
4. Ascierio R., Lawrence A. *2020 Data Center Industry Survey Results*. New York: Uptime Institute; 2020. 443 p.
5. Rasmussen N. *Guidelines for specifications of data center power density*. American Power Conversion; 2005. 25 p.
6. SN 512-78. *Instruktsiya po proyektirovaniyu zdaniy i pomeshcheniy dlya elektronno-vychislitel'nykh mashin* [Instructions for the design of buildings and premises for electronic computers]. Moscow: Stroyizdat; 1979. 28 p. (In Russ.)
7. *Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices*. ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9; 2016. 60 p.
8. Rasmussen N. *Calculating Total Cooling Requirements for Data*. American Power Conversion, 2003. 9 p.
9. SP 60.13330.2020 “SNiP 41-01-2003 Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh”. [SP 60.13330.2020 “SNiP 41012003 Heating, ventilation and air conditioning”]. Moscow: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation; 2020. 153 p. (In Russ.)
10. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2013 god* [Report on the peculiarities of climate on the territory of the Russian Federation in 2013]. Moscow: Rosgidromet; 2014. 109 p. (In Russ.)
11. Chernov A.N. *Povyshenie effektivnosti raboty konditsionerov, okhlazhdayushchikh oborudovanie v tsentrakh obrabotki dannykh: dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of air conditioners that cool equipment in data centers. Cand. sci. diss.]. Tyumen'; 2012. 123 p. (In Russ.)
12. Danilov O.L., Garyayev A.B., Yakovlev I.V., *Energoberezheniye v teploenergetike i teplotekhnologiyakh* [Energy Saving in Heat and Power Engineering and Heat Technology]. Moscow: MPEI Publishing House; 2010. 424 p. (In Russ.)
13. *Klimaticheskie dannye. Prosmotr klimaticheskikh dannykh Practices* [Climate data. Viewing climate data]. (In Russ.) Available at: <http://pogoda-service.ru/climate.php> (accessed 13.12.2022).
14. *Raspisaniye pogody. Arkhiv pogody* [Weather Schedule. Weather archive]. (In Russ.) Available at: https://tp5.ru/Pogoda_v_mire (accessed 14.12.2022).
15. Plekhov P.V., Mordvinova V.D. Statistical check of weather omens apply to Astrakhan region. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2021;4(64):142–146. (In Russ.) DOI: 10.36698/2304-5957-2021-4-142-146

16. Zatonkiy A., Bazhenov R., Beknazarova S. Advantages of freeware-based simulation tools for technical and technological modeling. In: *Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*. 2021. P. 786–790.

Информация об авторах

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; z Xenon@narod.ru.

Плехов Павел Владимирович, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; onim@rambler.ru.

Захаров Вадим Владимирович, ведущий инженер кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; metkol@yandex.ru.

Христолюбов Николай Николаевич, студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; nikolay.hristolubov@yandex.ru.

Information about the authors

Andrey V. Zatonkiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; z Xenon@narod.ru.

Pavel V. Plekhov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; onim@rambler.ru.

Vadim V. Zakharov, Leading engineer of the Department of Information and Analytical Support for Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; metkol@yandex.ru.

Nikolay N. Khristolubov, Student, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; nikolay.hristolubov@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.02.2023

The article was submitted 17.02.2023

FEDERATED LEARNING FOR VISION-BASED OBSTACLE AVOIDANCE IN MOBILE ROBOTS

Al-Khafaji Israa M. Abdalameer^{1,2}, misnew6@gmail.com
A.V. Panov¹, lks.ital@yandex.ru

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

² Mustansiriyah University, Baghdad, Iraq

Abstract. Federated learning (FL) is a machine learning approach that allows multiple devices or systems to train a model collaboratively, without exchanging their data. This is particularly useful for autonomous mobile robots, as it allows them to train models customized to their specific environment and tasks, while keeping the data they collect private. **Research Objective** to train a model to recognize and classify different types of objects, or to navigate around obstacles in its environment. **Materials and methods** we used FL to train models for a variety of tasks, such as object recognition, obstacle avoidance, localization, and path planning by an autonomous mobile robot operating in a warehouse FL. We equipped the robot with sensors and a processor to collect data and perform machine learning tasks. The robot must communicate with a central server or cloud platform that coordinates the training process and collects model updates from different devices. We trained a neural network (CNN) and used a PID algorithm to generate a control signal that adjusts the position or other variable of the system based on the difference between the desired and actual values, using the relative, integrative and derivative terms to achieve the desired performance. **Results** through careful design and execution, there are several challenges to implementing FL in autonomous mobile robots, including the need to ensure data privacy and security, and the need to manage communications and the computational resources needed to train the model. **Conclusion.** We conclude that FL enables autonomous mobile robots to continuously improve their performance and adapt to changing environments and potentially improve the performance of vision-based obstacle avoidance strategies and enable them to learn and adapt more quickly and effectively, leading to more robust and autonomous systems.

Keywords: federated learning (FL), neural network (CNN), Internet of Things (IoT), obstacle avoidance, vision-based, mobile robots

For citation: Al-Khafaji Israa M. Abdalameer, Panov A.V. Federated learning for vision-based obstacle avoidance in mobile robots. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(3):35–47. DOI: 10.14529/ctcr230304

Научная статья
УДК 004.89
DOI: 10.14529/ctcr230304

ФЕДЕРАТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ В МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ

Ал-Хафаджи Исра М. Абдаламир^{1,2}, misnew6@gmail.com
А.В. Панов¹, lks.ital@yandex.ru

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

² Университет Мустансирия, Багдад, Ирак

Аннотация. Федеративное обучение – это подход к машинному обучению, который позволяет нескольким устройствам или системам совместно обучать модель без обмена данными. Это особенно полезно для автономных мобильных роботов, поскольку позволяет им обучать модели, адаптированные к их конкретной среде и задачам, сохраняя конфиденциальность собираемых ими данных.

Цель исследования состоит в том, чтобы научить модель распознавать и классифицировать различные типы объектов или обходить препятствия в окружающей среде. **Материалы и методы:** использовано федеративное машинное обучение для обучения моделей различным задачам, таким как распознавание объектов, обход препятствий, локализация и планирование пути с помощью автономного мобильного робота, работающего на складе. Робот оснащен датчиками и процессором для сбора данных и выполнения задач машинного обучения. Робот должен связываться с центральным сервером или облачной платформой, которая координирует процесс обучения и собирает обновления моделей с разных устройств. Нейронная сеть обучена с использованием алгоритма PID для генерации управляющего сигнала, который регулирует положение или другую переменную системы на основе разницы между желаемыми и фактическими значениями, используя относительные, интегративные и производные условия для достижения желаемой производительности. **Результаты.** Даже при условии тщательного проектирования и исполнения существует несколько проблем при реализации федеративного обучения в автономных мобильных роботах, включая необходимость обеспечения конфиденциальности и безопасности данных, а также необходимость управления коммуникациями и вычислительными ресурсами, необходимыми для обучения модели. **Заключение.** Был сделан вывод о том, что федеративное обучение позволяет автономным мобильным роботам постоянно повышать свою производительность и адаптироваться к изменяющимся условиям, а также потенциально улучшать эффективность стратегий обхода препятствий на основе зрения и позволяет им быстрее и эффективнее учиться и адаптироваться, что приводит к созданию более надежных и автономных систем.

Ключевые слова: федеративное обучение (FL), нейронная сеть (CNN), Интернет вещей (IoT), визуальный обход препятствий, роботы на основе зрения, мобильные роботы

Для цитирования: Al-Khafaji Israa M. Abdalameer, Panov A.V. Federated learning for vision-based obstacle avoidance in mobile robots // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 35–47. DOI: 10.14529/ctcr230304

Introduction

Federated learning (FL) is a machine learning approach that allows multiple decentralized devices, such as smartphones or drones, to collaborate and train a model without sharing their data directly [1]. This approach can be particularly useful for vision-based obstacle avoidance, as it allows the devices to improve their ability to detect and avoid obstacles while preserving the privacy of their data [2].

In a FL system for vision-based obstacle avoidance, the devices would each have a local model that they use to make predictions about the environment around them. These local models would be updated regularly through the FL process, in which the devices share model updates with a central server without sharing the underlying data [3]. The server would then aggregate the model updates and use them to update the global model, which would be shared back to the devices to improve their local models (Fig. 1).

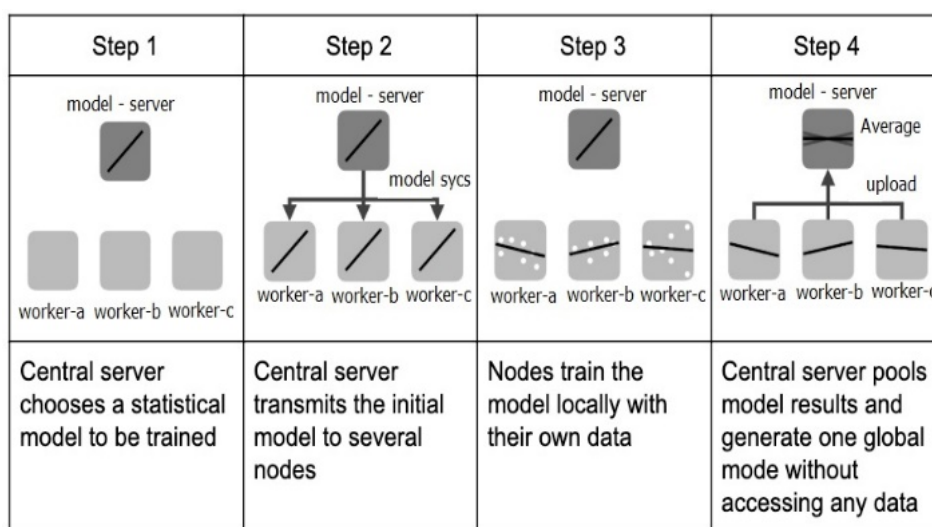


Fig. 1. Central case for FL process

1. Related work

The article of [5] proposed a unified learning approach for vision-based obstacle avoidance in mobile robots, allowing multiple robots to train a common deep neural network model without exchanging their data. They evaluated their approach on a dataset of real-world images captured by a robot moving in a crowded environment. In a similar vein.

In an article of [6] the authors demonstrated the use of FL to enable a group of mobile robots to collaboratively learn a model for obstacle avoidance. The robots are equipped with cameras, and use their camera images to learn a model that can predict the probability of an obstacle in a particular location. Bots communicate with each other and share their model updates, collectively allowing them to improve model accuracy over time. One major advantage is this could help improve the robustness and generalizability of the learned model, and enable robots to adapt to a wide variety of environments and situations.

In an article of [7] also proposed a unified learning approach for vision-based navigation in mobile robots, allowing multiple robots to train a shared deep neural network model without exchanging their data. The FL approach is particularly useful for privacy-sensitive applications, such as vision-based obstacle avoidance, where devices may not want to share sensitive information about their surroundings. It can also be useful in situations where data is distributed across a large number of devices, such as Internet of Things (IoT) applications, or when data privacy is a concern.

Overall, this paper demonstrates the potential of unified learning to enable collaborative learning in mobile robotics applications, and shows how it can be used to improve the performance of vision-based obstacle avoidance tasks.

In article [8] suggested a combined learning-based approach for vision-based barrier detection and avoidance in mobile robots. The proposed approach allowed multiple robots to learn collaboratively to model common obstacle detection and avoidance, while maintaining the privacy of their individual data. The authors demonstrated the effectiveness of the proposed approach through simulation and real-world experiments.

In article [9] proposed a learning approach for obstacle detection and avoidance in mobile robots and the authors demonstrated the effectiveness of a distributed deep learning approach for collaborative detection and obstacle avoidance in mobile robots.

As for article [10] presented a distributed deep learning approach for vision-based obstacle detection and avoidance in mobile robots and demonstrated the effectiveness of the proposed approach through simulations and real-world experiments.

The textbook of [11] covers deep learning techniques, which are commonly used in federal learning for robotics. It discusses the process of collecting and labeling training data, training a machine learning model using backpropagation, and evaluating the model's performance. It also covers techniques for improving the performance of the model, such as regularization and data augmentation. A survey article of [12] covers robot learning from demonstration, which is a federal learning method that involves collecting and labeling training data by observing a human demonstrating the desired behavior. It discusses the importance of defining the task, selecting appropriate sensors and actuators, and designing a control system that can generalize from the demonstrated behavior to new situations. It also covers techniques for evaluating and improving the performance of the learned behavior.

The survey article of [13] covers meta-learning for robotics, which is a federal learning method that involves learning how to learn from a set of related tasks. It discusses the importance of defining the task and selecting appropriate sensors and actuators, as well as the challenges of designing a control system that can generalize to new tasks. It also covers techniques for evaluating and improving the performance of the learned behavior, such as using a meta-learner to adapt to new tasks.

These are just a few of the many works that have been published on FL to avoid vision-based barriers. There is still much room for further research in this area, including the development of more efficient and effective algorithms, the integration of other sensors (eg, lidar, radar), and the application of FL to more complex tasks such as simultaneous localization and mapping (SLAM).

2. Methodology

The methodology for federal learning of a robot has been discussed in literature by various authors. Some common steps involved in the process of federal learning for a robot have been highlighted (Fig. 2).

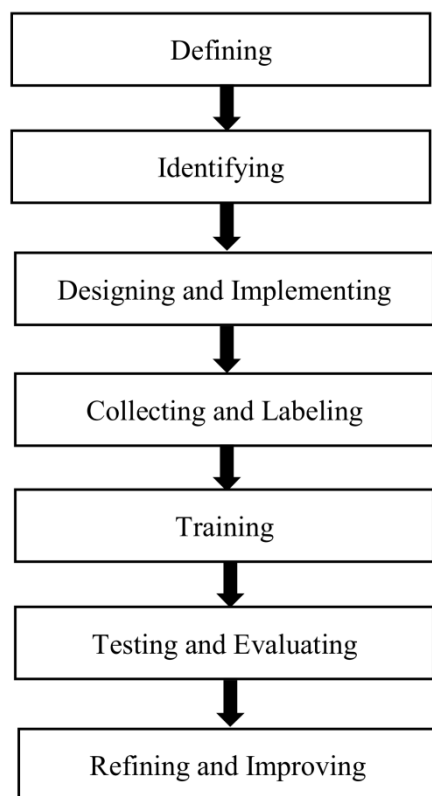


Fig. 2. Shows the specific goals and tasks a robot is being trained to perform in the federal robot learning methodology

the next step. This involves using the collected and labeled data to train a machine learning model that can predict the appropriate actions for the robot to take in various situations.

3.1. Sim-to-real for robot federal learning

Sim-to-real refers to the process of transferring knowledge or skills learned in a simulated environment to a real-world environment. This can be particularly useful in the field of robotics, as it allows for efficient and safe training and testing of robots without the risk of damaging the physical hardware [18].

One approach to sim-to-real transfer in robotics is federated learning, which is a machine learning technique that allows multiple robots to learn from their own data and experiences while still collaborating and sharing information with each other. In FL, the robots are able to learn from their own data without the need to share sensitive or private information with a central server or other robots. This can be useful for improving the performance and reliability of robots in complex and dynamic environments [19].

There are many challenges and open questions in the field of sim-to-real transfer and federated learning for robots, including how to effectively transfer knowledge between different robots and environments, how to handle noise and uncertainty in the real world, and how to ensure that the learned behaviors are safe and robust. Despite these challenges, sim-to-real transfer and FL have the potential to significantly advance the capabilities of robots and enable them to perform a wider range of tasks and functions [20].

3.2. Deep learning for vision-based obstacle avoidance

One way to implement vision-based obstacle avoidance using deep learning is to use a convolutional neural network (CNN) to process images from a camera or other visual sensors. The CNN can be trained on a dataset of images that includes a variety of different types of obstacles, such as walls, furniture, and other objects. The network can then be used to classify the objects in the images and predict their location relative to the robot or vehicle [21, 22].

Once the CNN has been trained and is able to accurately classify and locate obstacles, it can be used in real-time to avoid collisions as the robot or vehicle moves through the environment. For example,

The article of [14] identifying the sensors and actuators that the robot will use to perceive and interact with its environment has been emphasized. This involves selecting the appropriate sensors and actuators based on the specific needs and requirements of the task or tasks that the robot will be performing.

The article of [15] defining the task or tasks that the robot will be trained to perform has been suggested as the initial step. This involves identifying the specific actions and behaviors that the robot should be able to perform, as well as the conditions under which it will be expected to perform them, collecting and labeling training data has been highlighted as a critical step in the process. This involves gathering a large dataset of examples that demonstrate the desired behavior of the robot, and labeling the data to indicate the correct actions for the robot to take in each situation.

The article of [16] designing and implementing a control system for the robot has been proposed as the next step. This involves developing the algorithms and software that will be used to control the robot's sensors and actuators in order to achieve the desired behavior by testing and evaluating the performance of the robot has been proposed as an essential step in the process. This involves using the trained machine learning model to control the robot and evaluating its performance on a variety of tasks and in different environments.

The article of [17] training a machine learning model using the collected and labeled data has been suggested as

the network could output steering commands to steer the robot around an obstacle or could trigger a braking system to stop the vehicle before it collides with an obstacle [23].

There are many challenges involved in implementing vision-based obstacle avoidance using deep learning, including the need for large amounts of high-quality training data and the need to carefully tune the network architecture and hyperparameters to achieve good performance. However, with careful design and training, it is possible to achieve effective obstacle avoidance using deep learning techniques [24, 25].

3.3. Vision-based obstacle avoidance models

Machine learning models, including vision-based obstacle avoidance models, are essential for autonomous vehicles and robots to navigate environments safely using camera input to detect and avoid obstacles [26].

1. Classification is an approach in which the model is trained to classify each image as containing an obstacle or not, and the model predicts the presence of an obstacle in the current frame [27].

2. Object detection is another approach in which the model is trained to detect and classify specific types of obstacles, such as pedestrians or vehicles, and identify the location and type of any obstacles in the current frame [28].

3. Depth estimation is the third approach in which the model estimates the distance to obstacles in the camera's field of view and determines the proximity of obstacles to navigate around them [29].

To build a robust and accurate vision-based obstacle avoidance model, it is crucial to have a diverse and representative training dataset, regardless of the approach used [30].

3.4. The details of training

The process of training a neural network for obstacle avoidance can be divided into several steps (Fig. 3). As stated by [31] the first step is data collection, where a dataset of images representing obstacles likely to be encountered by the robot in its environment is gathered. The dataset should include images of various obstacles, such as walls and furniture, and clear paths annotated with labels indicating whether the path ahead is blocked or free.

The second step, data preprocessing, involves preparing the collected images for training. According to the article of [32] this may include resizing or cropping the images to a consistent size, applying image augmentation techniques to increase the diversity of the dataset, and normalizing the pixel values to a standard range.

Next, the architecture of the CNN model needs to be designed, as mentioned by [33]. This includes deciding on the number and size of the convolutional layers, the number and size of the fully connected layers, and the activation functions to use. It may also involve choosing the appropriate loss function and optimizer for the task.

Once the model architecture has been designed, the model can be trained using the collected and preprocessed dataset. As described in the article of [34] during training, the model is presented with images from the dataset and their corresponding labels, and the weights of the model are updated based on the error between the predicted labels and the true labels. Training continues until the model reaches a satisfactory level of accuracy on the training dataset.

After training, the model should be evaluated on a separate dataset to assess its performance. This will help identify any overfitting or underfitting and allow for adjustments to be made to the model or training process as needed.

Finally, once the model has been trained and evaluated, it can be deployed on the robot for use in obstacle avoidance. The model can be used to

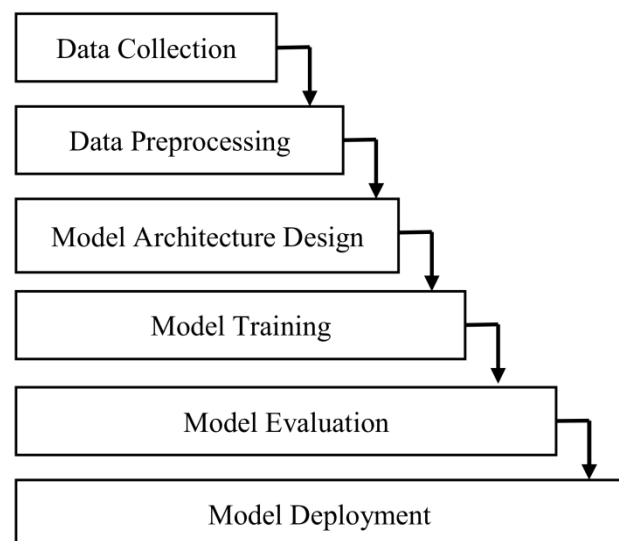


Fig. 3. Steps of convolutional neural network (CNN) training to avoid obstacles

classify images captured by the robot's sensors and predict whether the path ahead is blocked or free, allowing the robot to navigate its environment safely.

3.5. A vision-based obstacle avoidance strategy for mobile robots

To implement this approach, the training data from both simulated agents and real robots would need to be collected and aggregated in a centralized location, such as a server or cloud-based platform. The shared model would then be trained using this aggregated data, with the goal of learning a generalizable obstacle avoidance strategy that can be applied to a variety of different robots and environments [35].

One benefit of using a FL approach in this context is that it allows the model to be trained using a larger and more diverse dataset, which can improve its performance and generalizability [36]. Additionally, because the data remains on the device, there are privacy and security benefits to using a FL approach.

Typically, obstacle avoidance involves using a sensor, such as a camera, to capture images of the environment and then processing those images to identify obstacles that the robot should avoid. In the case described, the convolutional neural network (CNN) is trained to classify the environment ahead as either “blocked” or “free”, based on the input images it receives. This allows the robot to make decisions about how to navigate its environment and avoid obstacles. The performance of the CNN-based obstacle classifier will depend on the quality and diversity of the training data, as well as the design of the CNN itself (Fig. 4) [37].

It is important to note that using a CNN to classify obstacles as either “blocked” or “free” is a simplified approach, and in practice, real-world environments may contain a wide variety of obstacles that may need to be handled differently. A more sophisticated obstacle avoidance strategy may involve classifying obstacles into multiple categories and defining specific behaviors for each category.

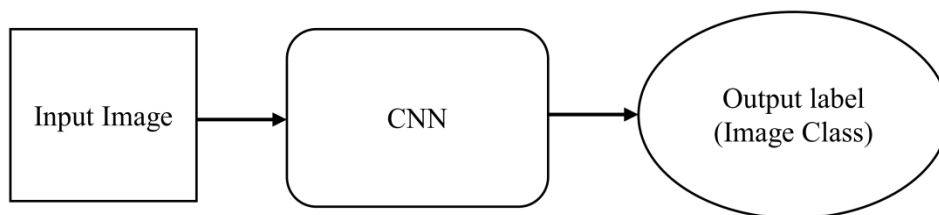


Fig. 4. Architecture of neural network (CNN)

A deep convolutional neural network (CNN) is a type of machine learning model that is commonly used for image classification tasks [37]. CNNs are particularly effective at learning features and patterns in images, and have been successful in a wide range of image-based tasks, including object recognition, image segmentation, and facial recognition.

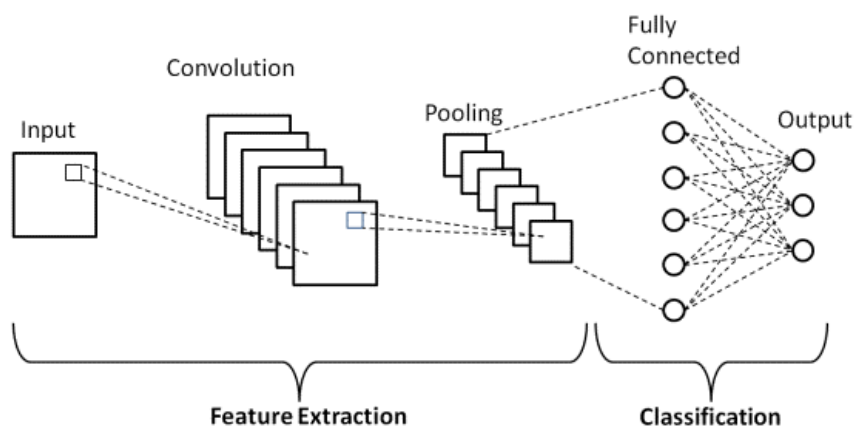


Fig. 5. Components of CNNs that consist of multiple layers of artificial neural networks

CNNs are composed of multiple layers of artificial neural networks, which are inspired by the structure and function of the brain. They consist of an input layer, one or more hidden layers, and an output

layer. The hidden layers of a CNN are typically composed of convolutional layers, which apply a set of learnable filters to the input data and produce a set of output feature maps. These feature maps are then processed by additional layers, such as pooling layers and fully connected layers, to extract and combine the relevant features for the task at hand (Fig. 5).

We applied moving a robot with a mass of 10 kg in the presence of obstacles using federated learning and equipped with a camera and other sensors, and has the ability to process visual data and make orientation decisions using control algorithms. The robot was placed in an environment with many obstacles, and tasked to navigate around them as it moved through the environment.

To enable the robot to learn to detect and avoid obstacles using federated learning, we performed the following process:

1. The robot collects visual data as it moves through the environment using a camera and other sensors.
2. The visual data is used to train a local model to detect and avoid obstacles, using machine learning algorithms such as deep learning.
3. The local model is used to guide the robot's behavior as it moves through the environment, and to generate routing commands to avoid obstacles.
4. The process is repeated over time, with the bot constantly updating its local model as it collects more data and experience.

To represent the relationships between visual data, the location of obstacles, and required steering commands, using equations and algorithms such as convolutional neural networks (CNN) to process visual data and identify obstacles, and control theory algorithms such as PID controllers to generate steering commands based on the location and shape of obstacles [38].

The robot is moving in a straight line and encounters an obstacle in its path. The camera takes an image of the obstruction, and the CNN processes the image and determines the location and shape of the obstruction. The PID controller then calculates the steering command needed to direct the robot around the obstacle using equations such as:

$$\text{Steering command} = K_p \cdot (\text{desired position} - \text{current position}) + K_i \cdot \text{integral error} + K_d \cdot \text{derivative error}.$$

The equation

$$\text{Steering command} = K_p \cdot (\text{desired position} - \text{current position}) + K_i \cdot \text{integral error} + K_d \cdot \text{derivative error}$$

is a form of the PID (Proportional-Integral-Derivative) control algorithm, which is a widely used control method in robotics and other fields. The PID algorithm is designed to control the position, velocity, or other dynamic variables of a system by comparing the desired value of the variable (the “setpoint”) with the actual value as measured by sensors (the “process variable”).

In the equation

$$\text{Steering command} = K_p \cdot (\text{desired position} - \text{current position}) + K_i \cdot \text{integral error} + K_d \cdot \text{derivative error},$$

the “steering command” is the output of the PID controller, which is used to control the movement of the robot. The “desired position” is the target location that the robot is trying to reach, and the “current position” is the actual location of the robot as measured by the sensors [39].

The K_p , K_i , and K_d terms are constants that determine the responsiveness of the controller. K_p is the proportional gain, K_i is the integral gain, and K_d is the derivative gain. The proportional gain determines the extent to which the controller responds to the current error between the desired and actual positions. The integral gain helps to eliminate steady-state error by accounting for the accumulated error over time. The derivative gain helps to stabilize the control loop by responding to the rate of change of the error.

The “integral error” and “derivative error” terms are calculated based on the error between the desired and actual positions at different points in time. The integral error is the sum of the errors over time, and the derivative error is the change in the error over time. These terms help to fine-tune the control action and prevent oscillations.

Overall, the PID algorithm is used to generate a control signal that adjusts the position or other vari-

able of the system based on the difference between the desired and actual values, using the proportional, integral, and derivative terms to achieve the desired performance.

This approach of using PID control for robotic obstacle avoidance has been widely used in the field. For instance, in the work of [40] a PID controller was used to guide a mobile robot through a cluttered environment. Additionally, the use of federated learning for obstacle avoidance has also been explored in recent literature, such as in the work of [41] where a federated learning approach was used to train an autonomous vehicle to navigate a complex urban environment.

4.1. Approaches to FL, and the deep learning models used for vision-based obstacle avoidance

Centralized learning is simple and efficient, but it has some limitations. One limitation is that it requires a large amount of data to be collected and transmitted to the central location, which can be costly and time-consuming. Additionally, there may be privacy concerns associated with collecting and transmitting sensitive data to a central location [42].

On the other hand, federated learning is a machine learning approach in which each device or location trains a local model on its own data, and the models are then aggregated to create a global model [43].

In terms of deep learning models for vision-based obstacle avoidance, one approach is to use convolutional neural networks (CNNs) to process images and identify obstacles. CNNs are particularly well-suited for image processing tasks because they are able to extract features from images and recognize patterns.

There are several ways to create customized simulation environments for use in federated learning of robots:

1. One option is to use a general-purpose physics engine, such as Bullet or ODE to simulate the dynamics of the environment and the robot's movement within it. Bullet is an open-source physics engine designed for real-time simulations. It is known for its high performance and accuracy, making it a popular choice for use in video games and other interactive applications. Bullet provides a wide range of features, including support for rigid body dynamics, kinematics, and collisions, as well as soft body dynamics and deformable objects [44].

- ODE is another open-source physics engine that is widely used in the gaming and simulation industries. It is designed to simulate the dynamics of rigid bodies and articulated bodies, and includes support for a variety of contact models and collision detection algorithms. ODE is known for its fast and stable performance, making it well-suited for use in real-time simulations [45].

There are many other physics engines available, each with its own set of features and capabilities. Some other popular physics engines include Havok, PhysX, and Unity's built-in physics engine. The choice of which physics engine to use will depend on the specific requirements of your application and the trade-offs that you are willing to make in terms of performance, accuracy, and complexity.

2. Another option is to use a specialized robot simulation platform, such as:

- Gazebo or V-REP. Gazebo is an open-source robotics simulation platform developed by OpenAI that is widely used in robotics research and education. It has a large user community and is compatible with a variety of robot hardware platforms and software frameworks, including ROS (Robot Operating System). It provides a 3D physics engine and a flexible plugin architecture that allows you to easily add new models, sensors, and actuators to your simulation [46];

- V-REP (Virtual Robot Experimentation Platform) is a commercial robot simulation platform developed by Coppelia Robotics. It has a user-friendly interface and a wide range of features, including realistic physics simulation, support for a variety of programming languages, and integration with various robot hardware platforms. V-REP also includes a library of pre-built models of robots and environments, and allows you to create custom models using its built-in modeling tools [47].

Both Gazebo and V-REP can be useful tools for simulating robots and their environments, and can be used to test and develop robotics algorithms, perform virtual prototyping and testing, and teach robotics concepts.

Regardless of the approach you choose, it is important to carefully design and test your simulation environment to ensure that it accurately reflects the real-world conditions in which the robot will operate. This will help ensure that the results of your federated learning experiments are reliable and meaningful.

4.2. Some FL applications

FL has been applied in various sectors, such as healthcare, FinTech, insurance, IoT, and other technologies (Table 1).

– In the healthcare industry, FL has been used to address the lack of resources, especially during the pandemic crisis. With FL, participating institutions can train the same algorithm on their own internal data pool, which creates a data source from which they can draw knowledge. This technique enables medical professionals to focus their efforts on improving patient care, without compromising the security and privacy of sensitive information [48].

– In the FinTech sector, businesses that utilize technology to conduct their financial activities, FL has become a popular solution. The regulations governing data protection are constantly expanding, making it difficult to obtain permission and legal approval, preserve data, and transfer data across networks. However, FL offers a quick fix by utilizing edge hardware and edge processing capability, which enables collaborative machine learning training on dispersed data without the requirement for data transfer between participants. FL has created a framework for FinTech that reduces risks, develops cutting-edge strategies for customers and organizations, and justifies trust between the two parties [49].

– In the insurance sector, fraudulent actions frequently take place, which limits the insurance company's ability to help the insured. However, FL can address this problem by enabling businesses to determine the patterns of their consumers without breaking the data clause. The goal of FL is to stop illegal or fraudulent activities and not compromise the insured's privacy. Therefore, FL can be used to train and direct the algorithms with the data without sharing data sets [50].

– In IoT, FL is being utilized by several enterprises to train their algorithms on a variety of datasets without trading data. FL seeks to protect the information gathered through several channels and keep important data close at hand. By utilizing FL, personalization can be achieved, and devices' functionality in IoT applications can be improved [51].

– FL has been used in other sectors and technologies, such as enhancing predictive texts, Siri's voice recognition, blockchain technologies, and cybersecurity. Google's Android Keyboard and Apple's Siri have utilized FL to improve their functionality without compromising the user's sensitive information. FL is essential to cybersecurity as well, as it protects the device's info and solely distributes that model's updates throughout linked networks [52].

Table 1

Advantages of FL for Vision-Based Obstacle Avoidance in Mobile Robots in a nutshell

Advantage	Description
Improved performance	Training on a larger, more diverse dataset can improve the performance of the model
Improved generalizability	Training on a diverse dataset can improve the model's ability to generalize to new situations
Privacy and security benefits	Data remains on the device, protecting sensitive data

4.3. The future of FL

This approach has the potential to be particularly useful for robots, as it allows them to learn from data generated by their own interactions with the environment, rather than relying on a central server or cloud-based service to provide training data. One potential application of federated learning for robots is in the development of more robust and adaptable control systems. For example, a robot that uses FL to train a control model based on its own sensor data could potentially learn to adapt to different environments or tasks more quickly and effectively than a robot that relies on a fixed control model.

FL also has another potential application for robots, in the development of more intelligent and autonomous systems. As discussed in the article of [52], a robot that uses FL to learn from the data generated by its own interactions with the environment could potentially develop a more accurate understanding of its surroundings, leading to more efficient and effective decision-making.

Moreover, the bright future of FL for robotics is emphasized in the article of [51], as it has the potential to enable robots to learn and adapt faster and more efficiently, leading to more robust and autonomous systems. Another potential application for FL is for bots in Privacy-Preserving Machine Learning for healthcare services [48].

Conclusion

A FL approach can be used to train a deep convolutional neural network (CNN) for vision-based obstacle avoidance. This approach has the advantage of allowing the model to be trained using a larger, more diverse dataset, which can improve its performance and generalizability. Additionally, because the data remains on the device, there are privacy and security benefits to using a FL approach. While more research is needed to understand the full potential of this approach, it has the potential to improve the performance of vision-based obstacle avoidance strategies for mobile robots.

In summary, FL is a powerful tool for training vision-based obstacle avoidance systems for mobile robots. By aggregating data from multiple sources and training the model on a diverse dataset, FL can help to improve the generalizability and performance of the obstacle classifier. It also has the added benefit of keeping the data private and secure, which is an important consideration when training models with sensitive data. Therefore, FL is a viable solution for implementing a vision-based obstacle avoidance system for robots.

In the future, other approaches can be developed to avoid visual barriers, using recurrent neural networks (RNN) or long term memory networks (LSTM) to process image sequences, or using adapters or attention mechanisms to estimate the importance of different features in images. Ultimately, the choice of a deep learning model will depend on the specific requirements of the obstacle avoidance task and the available data.

References

1. Konečný J. et al. *Federated learning: Strategies for improving communication efficiency*. 2016. arXiv preprint arXiv:1610.05492. DOI: N/A (not published in a journal yet)
2. Kairouz P. et al. *Advances and open problems in federated learning*. 2019. arXiv preprint arXiv:1912.04977. DOI: N/A (not published in a journal yet)
3. McMahan H.B. et al. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. 2017. P. 1273–1282). DOI: 10.7490/f1000research.1115539.1
4. Yang Q. et al. Federated machine learning: Concept and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*. 2019;10(2):1–19. DOI: 10.1145/3329874
5. Zhang Y., Liu J., Yang Y. Unified Learning of Vision-Based Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018;3(4):3675–3682. DOI: 10.1109/LRA.2018.2854793
6. Zhang Y., Wang Y., Chen J., Yang Y. Federated Learning for Vision-Based Obstacle Detection in Unmanned Aerial Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019;68(6):5556–5564. DOI: 10.1109/TVT.2019.2903571
7. Liu J., Zhang Y., Yang Y. Unified Learning of Vision-Based Navigation for Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics*. 2018;34(5):1205–1212. DOI:10.1109/TRO.2018.2854078
8. Mudaris H., Akbarzadeh A., Kayacan E. Federated learning-based approach for vision-based barrier detection and avoidance in mobile robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020;5(2):3227–3234. DOI: 10.1109/LRA.2020.2961299
9. Chen E.E., Huang C.M., Lin C.Y. An instructional approach to standardized obstacle detection and avoidance for mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019;116:142–152. DOI: 10.1016/j.robot.2019.03.009
10. Agarwal N., Gupta R., Dasgupta S. A distributed deep learning approach for vision-based obstacle detection and avoidance in mobile robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018;3(4):3177–3184. DOI:10.1109/LRA.2018.2867125
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep learning*. MIT Press. Google Scholar: https://scholar.google.com/scholar?q=Deep+learning+goodfellow&btnG=&hl=en&as_sdt=0%2C5. DOI: 10.1016/B978-0-12-810408-8.00001-3
12. Argall B.D., Chernova S., Veloso M., Browning B. A survey of robot learning from demonstration. *Robotics and Autonomous Systems*. 2009;57(5):469–483. DOI: 10.1016/j.robot.2008.10.024
13. Lee D., Lee J., Cho K. Meta-learning for robotics: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2019;30(10):2924–2940. DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2884123
14. Chen S., Li L., Li Q., Zhou D., Xu B. A Review on the Sim-to-Real Transfer of Robotics. *Complexity*. 2021. P. 1–21. DOI: 10.1155/2021/5550982

15. Zhu Y., Yang S., Yang C. A federated learning framework for privacy-preserving autonomous driving. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020;69(1):1027–1036. DOI: 10.1109/TVT.2019.2950774
16. Xu C., Li Y., Li X., Zhang Y. A federated deep learning architecture for privacy-preserving perception of self-driving cars. *Sensors*. 2021;21(1):162. DOI: 10.3390/s21010162
17. Li Z., Liang X., Chen K. Multi-agent reinforcement learning for distributed cooperative obstacle avoidance in complex environments. *Neurocomputing*. 2019;339:149–163. DOI: 10.1016/j.neucom.2018.11.081
18. Hua Y., Wang R., Qiao H. Sim-to-Real Reinforcement Learning for Robotics: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*. 2022. P. 1–16. DOI: 10.1109/TCDS.2022.3153253
19. Yu X., Qiu Y., Chen S., Zhou D. Sim-to-real transfer in robotics: A comprehensive review of deep learning techniques. *Journal of Field Robotics*. 2022;39(4):721–736. DOI: 10.1002/rob.22004
20. Ishida K., Hsieh M.A., Tomizuka M. Challenges in applying reinforcement learning to industrial robots. *Annual Reviews in Control*. 2021;52:210–224. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2021.08.005
21. Pomerleau D.A., Thorpe C.E., Sirkka J.K. Vision-based obstacle avoidance. *The Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 1989;6(3):223–234. DOI: 10.1016/S0921-8890(05)80034-8
22. Yang B., Liu W., Hu H. A vision-based obstacle detection and avoidance system for UAVs using deep neural networks. *Sensors*. 2018;18(7):2152. DOI: 10.3390/s18072152
23. Bency R.A., Selvi S.T., Bhagyaveni M.S. Vision-Based Obstacle Detection and Avoidance using Deep Learning. In: *2020 5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*. 2020. P. 1–7.
24. Kato H., Endo T., Takahashi T., Ito K. Vision-based obstacle avoidance using deep convolutional neural network with high-level features. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2015. P. 131–136. DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7418677
25. Kim S.J., Kim B.H., Cho H.G. Vision-based Obstacle Avoidance of Autonomous Mobile Robots using Deep Learning. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*. 2018;24(5):420–427. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0056
26. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review. *Expert Systems with Applications*. 2021;172:114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535
27. Rao V.P., Rautaray S.S., Panda R. Vision-based obstacle detection and avoidance for unmanned aerial vehicles: A review. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020;98(1):1–23. DOI: 10.1007/s10846-019-01136-7
28. Nikouei M.A., Gheisari S., Hosseini M.G. An efficient method for real-time pedestrian detection and tracking using deep learning. *Applied Soft Computing*. 2020;87:105996. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105996
29. Hu S., Xue B., Xia H. Real-time obstacle detection using stereo vision for unmanned ground vehicles. *Journal of Field Robotics*. 2019;36(4):859–881. DOI: 10.1002/rob.21889
30. Jeon H.G., Kim J.Y., Kim J. A survey of obstacle avoidance methods for unmanned ground vehicles. *Applied Sciences*. 2020;10(2):480. DOI: 10.3390/app10020480
31. Bojarski M., Del Testa D., Dworakowski D., Firner B., Flepp B., Goyal P., Jackel L.D., Monfort M., Muller U., Zhang J., Zhang X., Zhao J., Zieba K. *End to end learning for self-driving cars*. 2016. arXiv:1604.07316
32. Deng Z., Yang Z., Chen L., Peng F. A survey on deep learning for intelligent vehicle autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018;19(12):3808–3824. DOI: 10.1109/TITS.2018.2846598
33. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016. P. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
34. Simonyan K., Zisserman A. *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. 2014. arXiv preprint arXiv:1409.1556.
35. Li H., Ouyang Y., Chen X., Chen J. Federal machine learning for autonomous vehicles: A decentralized learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019;21(10):4252–4262. DOI: 10.1109/TITS.2019.2917806

36. Bonawitz K., Eichner H., Grieskamp W., Huba D., Ingerman A., Ivanov V., Kiddon C., Konečný J., McMahan H.B., Vanderveen G., Wei D. *Towards federated learning at scale: System design*. 2019. arXiv preprint arXiv:1902.01046.
37. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In: *Advances in neural information processing systems*. 2012. P. 1097–1105.
38. Omidvar M.N., Rahmani R., Zohoori M., Tafazzoli F. Autonomous Navigation of Mobile Robots using Computer Vision and Control Theory. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020. P. 8786–8792.
39. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A review of literature. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*. 2021;6(3):48–53. DOI: 10.32628/IJSRCSEIT.0639
40. Kehoe T.B. et al. Using probabilistic reasoning over time to enable human-robot collaboration. *The International Journal of Robotics Research*. 2013;32(14):1611–1628. DOI: 10.1177/0278364913495723
41. Karpathy A. et al. *Federated learning for autonomous vehicles*. 2020. arXiv preprint arXiv:2002.11242. DOI: N/A (since it is a preprint and not yet published in a peer-reviewed journal)
42. Sheller M., Rouhani B.D. Privacy and Security in Federated Learning: Recent Advances and Future Directions. *IEEE Access*. 2021;9:27054–27072. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3060827
43. McMahan B., Moore E., Ramage D., Hampson S., Arcas B.A. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. 2017. P. 1273–1282. Available at: <http://proceedings.mlr.press/v54/mcmahan17a.html>.
44. Coumans E. Bullet physics simulation: Recent developments and future challenges. In: *Eurographics*. 2010. P. 45–63. DOI: 10.2312/egst.20101005
45. Erleben K., Sporning J., Henriksen K. Physics-based animation. In: *Proceedings of the 32nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 2005. P. 707–712. DOI: 10.1145/1186822.1073219
46. Koenig N., Howard A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. In: *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*. 2004. Vol. 3. P. 2149–2154. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389754
47. Rohmer E., Singh S.P.N., Freese M. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework. In: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013. P. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696545
48. Someya K., Kinoshita Y., Tsuji M., Iwata M. Privacy-Preserving Machine Learning for Healthcare Services Using Federated Learning. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Human System Interaction*. 2021. P. 551–556. DOI: 10.1109/HSI52188.2021.9471561
49. Kim J.H., Song J.W., Kim K. Edge Computing Based on Federated Learning for Privacy and Security in FinTech. *Applied Sciences*. 2021;11(14):6329. DOI: 10.3390/app11146329
50. Ji X., Dong X., Zhang C., Wang Y., Yang M., Ma J. Federal Learning for Fraud Detection in Insurance Industry. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Intelligence and Applications*. 2021. P. 75–80. DOI: 10.1145/3460421.3460444
51. Yuan Z., Liu J., Chen L., Jiang J. Federated Learning for Internet of Things: Opportunities, Challenges, and Solutions. *Sensors*. 2021;21(1):266. DOI: 10.3390/s21010266
52. Mao K., Lu Y., Ji M., Feng X., Wang L., Zhou Z. A Survey on Federated Learning for Edge Intelligence: Challenges and Solutions. *IEEE Access*. 2021;9:42500–42512. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3079187

Information about the authors

Al-Khafaji Israa M. Abdalameer, Postgraduate student of the Department of Corporate Information Systems of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; Assistant of the Faculty of Natural Sciences, Mustansiriyah University, Baghdad, Iraq; misnew6@gmail.com.

Alexander V. Panov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; Iks.ital@yandex.ru.

Информация об авторах

Ал-Хафаджи Исра М. Абдаламир, аспирант кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; ассистент факультета естественных наук, Университет Мустансирия, Багдад, Ирак; misnew6@gmail.com.

Панов Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц. кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; Iks.ital@yandex.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted 01.01.2023

Статья поступила в редакцию 01.01.2023

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ В МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ

В.Ю. Арьков¹, arkov.vyu@ugatu.su, <https://orcid.org/0000-0002-7913-4778>
А.М. Шарипова¹, a.shamsieva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9011-3188>
Г.Г. Куликов², grisha@molniya-ufa.ru

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

² АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Уфа, Россия

Аннотация. Большинство методов машинного обучения основаны на статистической теории обучения, при этом часто используется упрощение процедур для достижения приемлемой скорости вычислений. **Цель исследования.** Сформировать общий подход к оценке неопределённости в моделях машинного обучения. В эконометрике в любой модели в обязательном порядке ставится неопределённость в форме стандартного отклонения («сигмы») для коэффициентов и для прогнозов. Проблема заключается в том, что в машинном обучении нельзя аналитически посчитать неопределённость через «сигму». Поэтому вместо аналитических методов мы предлагаем использовать численные методы. **Материалы и методы.** Для детального рассмотрения вопроса оценивания неопределённости выбраны классические методы регрессионного анализа, в которых уделяется большое внимание неопределённости коэффициентов модели и – что более важно – точности прогнозов, полученных по такой модели. **Результаты.** Предлагается технология оценки неопределённости, демонстрируемая на модельном примере для того, чтобы показать, что она согласуется с традиционными классическими методами по результатам. В дальнейшей практике мы предлагаем использовать кросс-валидацию. **Заключение.** При использовании машинных моделей сложных процессов, в том числе прогнозов, построенных по таким моделям, при принятии управленческих решений становится всё более актуальной проблема оценивания неопределённости и вытекающих из этой неизбежной неопределённости рисков. Данная проблема может быть решена на основе непараметрических методов, хотя для этого потребуется гораздо большая вычислительная мощность, чем та, которая используется для обучения машинной модели. Предлагаемый подход можно обобщить и для других методов машинного обучения, например, для задачи классификации и кластеризации.

Ключевые слова: неопределённость параметров, обучение с учителем, моделирование, методы прогнозирования

Для цитирования: Арьков В.Ю., Шарипова А.М., Куликов Г.Г. Оценивание неопределённости в машинном обучении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 48–58. DOI: 10.14529/ctcr230305

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230305

UNCERTAINTY ESTIMATION IN MACHINE LEARNING

V.Yu. Arkov¹, arkov.vyu@ugatu.su, <https://orcid.org/0000-0002-7913-4778>
A.M. Sharipova¹, a.shamsieva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9011-3188>
G.G. Kulikov², grisha@molniya-ufa.ru

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

² JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russia

Abstract. Most machine learning methods are based on statistical learning theory, often using procedural simplification to achieve acceptable computational speed. **The purpose of the study.** To form a general approach to uncertainty estimation in machine learning models. In econometrics, in any model the uncertainty is necessarily put in the form of standard deviation (sigma) for coefficients and based on it the sigma for predictions is constructed. The problem is that in machine learning we cannot analytically calculate

uncertainty through sigma. Therefore, we propose to use numerical methods instead of analytical methods. **Materials and methods.** For a detailed consideration of uncertainty estimation, we choose classical methods of regression analysis, which pay much attention to the uncertainty of model coefficients and – more importantly - the accuracy of the predictions obtained from such a model. **Results.** We propose a technique for estimating uncertainty, demonstrated by a model example in order to show that it is consistent with traditional classical methods in terms of results. In future practice, we propose to use cross validation. **Conclusion.** When using machine models of complex processes, including forecasts based on such models, the problem of evaluating uncertainty and risks arising from the inevitable uncertainty becomes more and more relevant when making managerial decisions. This problem can be solved on the basis of nonparametric methods, although it will require much more computing power than that used to train a machine model. The proposed approach can be generalized to other machine learning methods, for example, to the problem of classification and clustering.

Keywords: parameter uncertainty, supervised learning, modeling, prediction methods

For citation: Arkov V.Yu., Sharipova A.M., Kulikov G.G. Uncertainty estimation in machine learning. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(3):48–58. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230305

Введение

За последние десятилетия в различных областях деятельности быстро распространяются технологии машинного обучения. Это происходит по различным причинам, включая растущий объём данных, доступных в цифровой форме, достаточную вычислительную мощность даже на уровне настольных персональных компьютеров, а также благодаря большому количеству свободно распространяемого программного инструментария, например библиотеки Sci-Kit Learn для языка Python.

Машинное обучение часто рассматривается как извлечение полезной информации и даже знаний из «сырых» необработанных данных – область деятельности, частично пересекающаяся по решаемым задачам и используемым методам с искусственным интеллектом. Существующие алгоритмы машинного обучения позволяют подстраивать структуру и параметры модели по имеющимся экспериментальным данным, которые в данном случае называют «обучающей выборкой». В процессе обучения модели производится оптимизация выбранного (обычно квадратичного) критерия качества. Далее производится подтверждение качества модели, которое также называется термином «валидация». Для этого используется контрольная выборка – часть исходной выборки, которая не участвовала в обучении модели. Такая валидация проводится многократно путём различного разделения исходной выборки на обучающую и контрольную, в результате чего часто используется термин «кросс-валидация», или «скользящая проверка». За счёт кросс-валидации пытаются обеспечить обобщающие свойства машинной модели и исключить «переобучение», то есть подгонку модели под конкретную выборку.

Зачастую обнаруживается, что многие технологии машинного обучения реализуют уже известные и хорошо проработанные статистические методы, такие как, например, метод наименьших квадратов (МНК). Отметим, что традиционный, классический МНК позволяет получить не только параметры регрессионной модели, но и оценить их неопределённость в форме некоторых параметров распределения оценок коэффициентов полученной модели. Чаще всего распределение характеризуется двумя параметрами – математическим ожиданием и стандартным отклонением. В данном случае используется аналитический подход к оценке неопределённости – в предположении, что для описания гауссовского распределения будет достаточно использовать два параметра, а в МНК используется именно это предположение о нормальности случайной составляющей. Следующим шагом является построение доверительных интервалов при заданной вероятности – вначале для коэффициентов модели, а затем и для прогнозов.

К сожалению, многие существующие инструменты нацелены на обучение модели и её валидацию, при этом гораздо меньше внимания уделяется изучению статистических свойств полученных оценок. Кроме того, проблема кросс-валидации не так основательно исследована, как процесс обучения модели, что, скорее всего, объясняется ограничениями в плане доступной вычислительной мощности. Данное предположение частично подтверждается тем фактом, что, не-

смотря на все общеизвестные ограничения и недостатки, в машинном обучении широко используется квадратичный критерий качества. Отметим, что первоначально метод наименьших квадратов использовался в ручных расчётах. Тем не менее, сумма квадратов отклонений по-прежнему используется как основной критерий качества, в том числе для алгоритмов глубокого обучения, реализуемых на мощных суперкомпьютерах.

В данной работе предлагается находить оценку неопределённости моделей машинного обучения на основе технологий кросс-валидации. Предлагаемый подход до некоторой степени аналогичен оценке неопределённости в метрологии через имитационное моделирование, хотя и основан на аналитическом подходе, используемом в статистических процедурах.

1. Квадратичные критерии машинного обучения

Выясняется, что процесс кросс-валидации является очень требовательным к вычислительным ресурсам. Более того, тщательное проведение кросс-валидации может потребовать гораздо больше вычислений, чем собственно обучение машинной модели [1]. В результате пользователю зачастую предлагается провести лишь небольшое количество разбиений исходной выборки на обучающую и контрольную. Например, в работе [2] Лакшминарайанан описывает эксперименты с обучением ансамблей глубоких нейросетей с попыткой оценивания неопределённости. Здесь многослойные нейросети обучаются на «стандартном» наборе данных по бостонским объектам недвижимости. Автор упоминает в качестве максимального количества двадцать разделений исходного набора данных на обучающую и контрольную выборки. После обучения производилось оценивание качества моделей регрессии и классификации. Хотя в данном примере для каждой метрики качества были получены оценки неопределённости в виде интервалов значений, сам объём работы по кросс-валидации скорее всего нельзя считать достаточным.

Чтобы подчеркнуть важность оценивания неопределённости, следует напомнить так называемые «четыре типа аналитики». Первое – это описательная аналитика, раздел статистики, описывающий форму и параметры распределения случайной величины. Здесь выполняется описание событий прошлого в форме различных обобщающих показателей типа минимума, максимума, среднего и стандартного отклонения. Далее следует второй тип – диагностическая аналитика, указывающая предполагаемые причины событий прошлого.

Третий тип аналитики – предиктивная (предсказательная); это инструмент для построения прогнозов и предсказаний. Такое применение машинных моделей явным образом реализовано в статистическом обучении, например, в форме прогнозирования по регрессионным моделям. Джеймс и Хэйсти в работе [3] подчёркивают, что включение в модель слишком большого количества объясняющих переменных, не связанных напрямую с изучаемым объектом, не обязательно улучшают прогностические возможности машинных моделей, таких как регрессия.

Прогностические модели могут также содержать оценивание неопределённости, указывает Саксена [4]. В указанной работе для неопределённости прогнозов строится непараметрическое описание в предположении негауссовского распределения, которое в дальнейшем аппроксимируют аналитической функцией.

Четвёртый тип – предписывающая аналитика – выдаёт рекомендации по принятию решений на основе машинных прогнозов, см., например, работу Фатера и Нолла [5]. Этот этап ближе к управлению предприятием и производственными процессами, чем к анализу данных как таковому. Отметим, что принятие решений должно включать оценку рисков и управление рисками, что требует оценивать неопределённость использованных прогнозов.

Метод наименьших квадратов используется при построении математических моделей как технических, так и экономических систем, см. работу Ванга [6]. Математическое моделирование технических объектов по реальным данным часто относят к технологиям идентификации моделей, в то время как построение математических моделей экономических систем проводится в рамках технологий эконометрики (эконометрии). Несмотря на некоторое различие в терминологии, технологии идентификации и эконометрики во многом схожи.

Регрессионный анализ в области идентификации систем и эконометрики позволяет получать модели в форме уравнения с коэффициентами и их стандартными отклонениями, как бу-

дет показано ниже. Далее следует построение доверительных интервалов (пределов значений оценок) и проверка статистической значимости полученных оценок коэффициентов. В этом случае моделирование проводится в предположении нормальности распределения результатов регрессионного анализа, что является следствием вычислений по методу наименьших квадратов.

Следует подчеркнуть, что, в отличие от экономических систем, однотипные технические объекты часто производятся в большом количестве в рамках серийного производства. При этом конструкция и характеристики современной техники подчиняются требованиям стандартов, а также конструкторской и технологической документации. Такими образом, в технических науках открываются возможности для построения усреднённых математических моделей, которые затем можно индивидуально уточнять по экспериментальным данным, как описано в работе Аль-Саида [7].

Интеллектуальный анализ данных – data mining – представляет собой подход к поиску скрытых закономерностей и взаимосвязей в больших массивах данных, как описано в работе Лесковец [8]. Первоначально эта методология называлась «разведочный анализ данных», см. работы Тьюки [9] или Брюса [10]. Техники разведочного и интеллектуального анализа данных также включают в себя регрессию и МНК.

2. Неопределенность моделей

Математические модели, полученные методами машинного обучения, представляют собой более сложные объекты, чем традиционные результаты МНК. Количество параметров машинных моделей с каждым годом возрастает по мере увеличения доступных вычислительных ресурсов. Например, предварительно обученная модель GPT-3, построенная по технологии глубокого обучения, использует сотни миллиардов параметров для обработки естественного языка. Такой уровень сложности полностью исключает любые попытки аналитически оценить неопределённость каждого коэффициента модели. При описании подобных моделей большое внимание уделяется успешным примерам применения, в то время как оценки неопределённости оставляют без внимания, см., например, статью Корнгибеля и Мууни [11] с обсуждением возможностей машинной замены живого общения.

С другой стороны, методика кросс-валидации предоставляет дополнительные инструменты для численного (непараметрического) оценивания неопределённости, хотя при этом требуется гораздо больше вычислительных ресурсов, чем для собственно обучения машинной модели.

Метод наименьших квадратов в регрессионном анализе достаточно подробно проработан и исследован, см. работу Снедекора [12]. Здесь обычно предполагается постоянная дисперсия случайной составляющей (ошибки, остатков), что в эконометрике называют термином «гомоскедастичность».

Подробно обсуждение основ МНК можно найти в многочисленной литературе по эконометрике, такой как работа Фомби, Джонсона и Хилла [13]. Для успешного применения МНК требуется выполнение ряда необходимых предпосылок, описанных в теореме Гаусса – Маркова; за этим следует обсуждение свойств сходимости, состоятельности и т. п. Теорема Гаусса – Маркова отражает обобщённый подход к регрессионному анализу, см. работы Конга [14], Лайке [15], Другаса [16] или Циммермана [17].

В идеале оценки коэффициентов уравнения регрессии должны сопровождаться оценками их стандартных отклонений, как показано в примере ниже.

$$y = a + b x. \tag{1}$$

$(\sigma_a) \quad (\sigma_b)$

Типичная последовательность действий в регрессионном анализе включает следующие шаги:

- 1) оценка уравнения регрессии;
- 2) построение точечного и интервального прогноза;
- 3) построение графиков линии регрессии и доверительного интервала для результативного признака;
- 4) оценка остатков и анализ свойств и графиков остатков.

Завершающая стадия представляет собой проверку выполнения предпосылок МНК – условий, описанных в теореме Гаусса – Маркова, что обеспечивает желательные асимптотические свойства оценок, таких как нормальность, эффективность и состоятельность.

Далее рассмотрим вычислительный эксперимент, описанный Грином в [18]. Имитационное моделирование по методу Монте-Карло позволяет получить непараметрическое представление распределения оценок по МНК. Модифицируем план эксперимента для удобства демонстрации следующим образом. Факторный признак x генерируется как равномерно распределённая случайная величина. Результативный признак y линейно коррелирован с фактором x . Прибавляем нормально распределённое случайное возмущение e , как показано ниже.

$$\begin{aligned} y &= x - 100 + e; \\ x &\sim U(150; 200); \\ e &\sim N(0; 10). \end{aligned} \tag{2}$$

Данная обучающая выборка генерируется 1000 раз с объёмом каждой выборки 100 наблюдений.

По каждой обучающей выборке проводится построение уравнения регрессии и оценка коэффициентов уравнения. Для дальнейшего рассмотрения будем изучать поведение оценки коэффициента регрессии, определяющего наклон линии регрессии. Используя полученную «выборку» оценок коэффициента, проводят оценку формы распределения в виде гистограммы и диаграммы размаха (box-and-whiskers plot) (рис. 1). Поскольку распределение оценок по МНК должно быть близко к нормальному, для сравнения построена гауссовская кривая плотности вероятности для соответствующих среднего значения и стандартного отклонения.

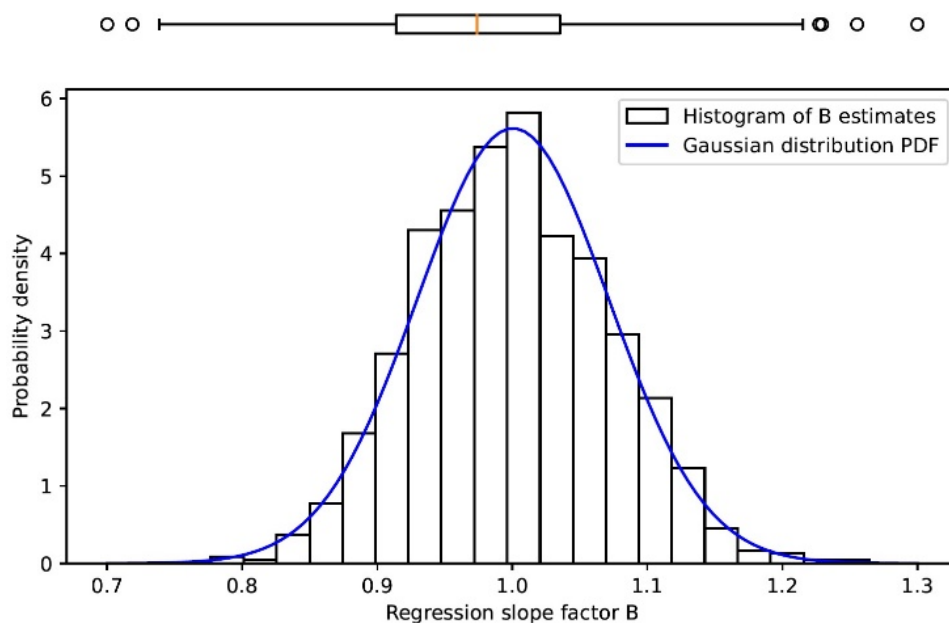


Рис. 1. Распределение оценок коэффициента регрессии
Fig. 1. Distribution of regression coefficient estimates

Рассмотрим расширенное представление результатов имитационного моделирования. На рис. 2 изображён ряд линейных прогнозов, причём на заднем фоне приводятся все выборки (наборы исходных данных). Можно видеть, что дисперсия прогноза возрастает, когда значение факторного признака x приближается к границам диапазона известных значений. Поскольку мы сгенерировали 1000 выборок и по каждой из них провели оценивание линейной модели, общая продолжительность вычислительного эксперимента в 1000 раз больше, чем однократное получение оценки по МНК.

После проведения дисперсионного анализа неопределённости оценок (ANOVA) строятся доверительные интервалы на основе оценок стандартного отклонения прогноза [19]. Таким образом, неопределённость прогнозов оценивают «почти аналитически», что невозможно реализовать для сложных моделей машинного обучения.

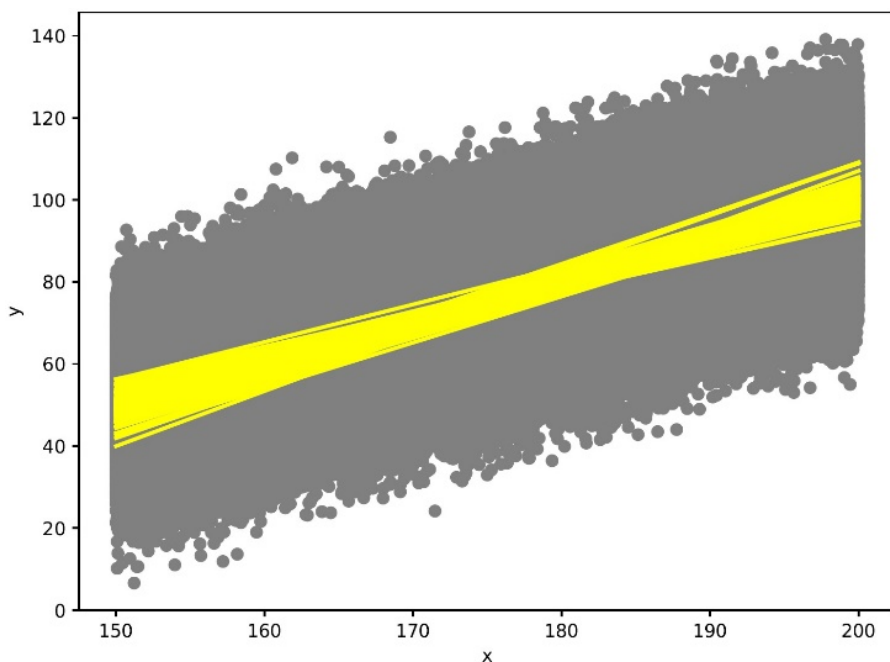


Рис. 2. Линейные прогнозы для серии выборок
Fig. 2. Linear predictions for a series of samples

Экстраполируя описанную логику аналитического оценивания неопределённости в машинном обучении, можно было бы ожидать подобные оценки в виде стандартного отклонения для каждого параметра, как показано на рис. 3. Каждая оценка значения параметра сопровождается его стандартным отклонением, что должно приводить к оцениванию дисперсии прогнозов.

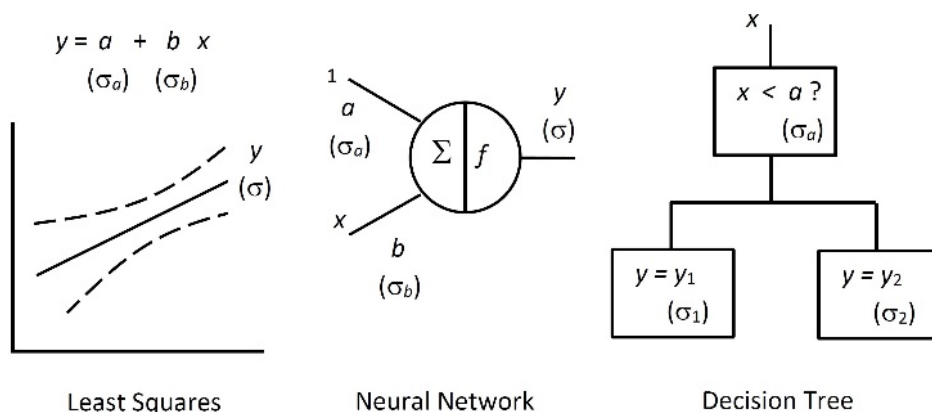


Рис. 3. Аналитическое представление неопределённости в машинном обучении
Fig. 3. Analytical representation of uncertainty in machine learning

Однако в большинстве случаев аналитический подход к изучению машинных моделей практически неприменим по ряду причин – и прежде всего из-за очень высокой сложности и нелинейности модели. Именно поэтому применение МНК для нелинейных систем сводится к «линеаризации» моделей за счёт включения в линейное уравнение нелинейных членов, которые рассматриваются как дополнительные «линейные регрессоры».

Рассмотрение истории вопроса и сравнительный анализ приводит к выводу о том, что методы машинного обучения предлагают гораздо менее ясное представление полученных моделей и меньший уровень понимания их внутреннего устройства. Возможное объяснение для отсутствия этапа серьёзного анализа результатов моделирования заключается в том, что машинная модель и алгоритмы машинного обучения строятся полностью на основе обучающей выборки и не учитывают априорное или экспертное знание об изучаемом объекте [20].

3. Постановка задачи

Задачи оценивания неопределённости формулируются следующим образом. В нашем распоряжении имеется набор исходных экспериментальных данных (обучающая выборка), содержащая линейно коррелированные факторный и результативный признаки. Требуется оценить неопределённость прогнозов значений результативного признака в виде доверительного интервала, предпочтительно малочувствительного к выбросам (аномалиям). Чтобы продемонстрировать предлагаемый подход, используется упрощённая постановка задачи, которую можно затем обобщить на задачу нелинейного многомерного моделирования.

Рассмотрим постановку задачи более подробно. Исходные данные для машинного обучения подготовлены для анализа и представлены в табличной форме, где факторный и результативный признаки расположены по столбцам как (x, y) . Считаем, что результативный признак y линейно связан с фактором x . Коэффициенты линейного уравнения считаем неизвестными. Данные содержат аддитивный случайный шум с нормальным распределением.

На основе предложенного набора данных обучается некоторая машинная модель $M(c)$, содержащая большое количество параметров (коэффициентов) c . Обучение машинной модели производится так, чтобы минимизировать квадратичный критерий отклонения фактического и прогнозного значений результативного признака: $\sum \Delta y^2 \rightarrow \min$. В процессе обучения машинной модели определяются её структура и параметры так, чтобы обеспечить обобщённое описание взаимосвязи вход-выход за счёт разделения данных на обучающую и контрольную выборки в заданном соотношении.

Задаём значения факторного признака в пределах интервала известных значений обучающей выборки X и получаем прогноз значений результативного признака Y с помощью обученной модели, содержащей оценки параметров c .

Наконец, требуется оценить неопределённость прогноза выхода модели как интервал возможных значений, соответствующий доверительному интервалу и менее чувствительному к выбросам, а также к «толстым хвостам» распределения Y . В целях наглядности представления будем рассматривать два типа машинных моделей – линейную регрессию и случайный лес.

4. Вычислительный эксперимент

Рассмотрим постановку вычислительного эксперимента в среде Python для исследования неопределённости оценок и прогнозов. Предлагаемый нами непараметрический подход к оцениванию неопределённости прогнозов по регрессионной модели имеет некоторое сходство с экспериментами Грина по методу Монте-Карло [18]. Отметим, что регрессионный анализ представляет собой пример численных методов и непараметрического подхода к анализу данных [19]. Общая идея оценивания через моделирование распространяется на изучение свойств прогнозов следующим образом.

Будем многократно (в цикле) генерировать обучающую выборку – каждый раз с новым состоянием генератора случайных чисел, что обеспечивается автоматически при новом вызове функций `RAND` и `RANDN`. Далее обучаем машинные модели по новой выборке. Обе выбранные модели – линейная регрессия и случайный лес – используют квадратичный критерий в процессе обучения и поэтому обеспечивают сходные результаты в плане прогнозирования. Значения факторного признака для построения прогноза линейно нарастают на протяжении выбранного интервала за счёт использования функции `Linspace` и соответствуют диапазону значений фактора в обучающей выборке. При многократном повторении этапов генерирования данных и обучения модели на каждой итерации цикла строим прогнозы для одних и тех же значений фактора по каждой вновь полученной модели. Затем собираем все прогнозные значения в массив для дальнейшей обработки и оценивания распределения.

Общая форма распределения прогнозов представлена на рис. 4 в виде гистограмм. Рассматриваются два крайних значения фактора и соответствующие им прогнозы для результативного признака: $y(150)$ и $y(200)$. В то время как прогнозы по МНК имеют нормальное распределение, прогнозы модели типа случайный лес дают несколько иные результаты. Чтобы исследовать указанные различия, на график также нанесены гауссовские кривые плотности вероятности, построенные с фактическими значениями среднего и сигмы, вычисленными для массива прогнозов.

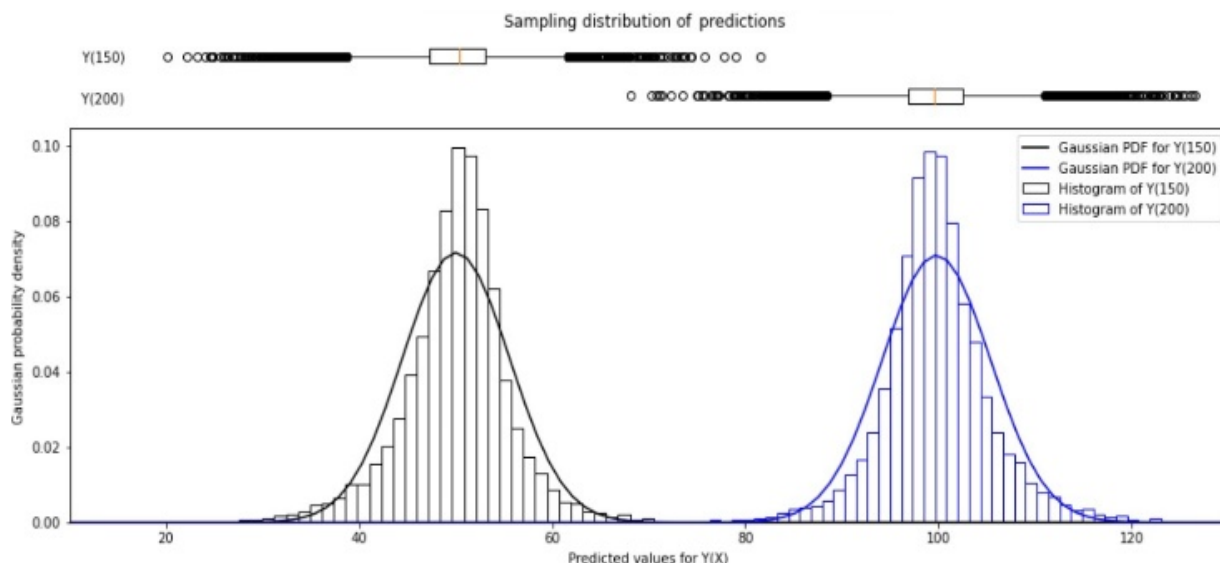


Рис. 4. Диаграммы размаха и гистограммы для прогнозов по случайному лесу
Fig. 4. Box plots and histograms for random forest forecasts

На рис. 4 также приведены диаграммы размаха по обоим прогнозным значениям. Как можно видеть, оба распределения обладают островершинностью (эксцессом) и имеют достаточно длинные «хвосты», что подтверждается большим количеством выбросов за пределами квартильного интервала. Центральная часть кривых более узкая – по сравнению с теоретическим гауссовским распределением. На рис. 5 показано общее расположение всех обучающих выборок (серые маркеры), а также прогнозы, полученные по регрессионной модели. Центральная кривая, соответствующая линии регрессии, получена как медиана всех прогнозов для заданного значения фактора. Нижняя и верхняя границы диапазона прогнозных значений рассчитываются исходя их квартильной вариации как отклонения от медианы на полтора межквартильных размаха – в соответствии с методикой построения диаграммы размаха.

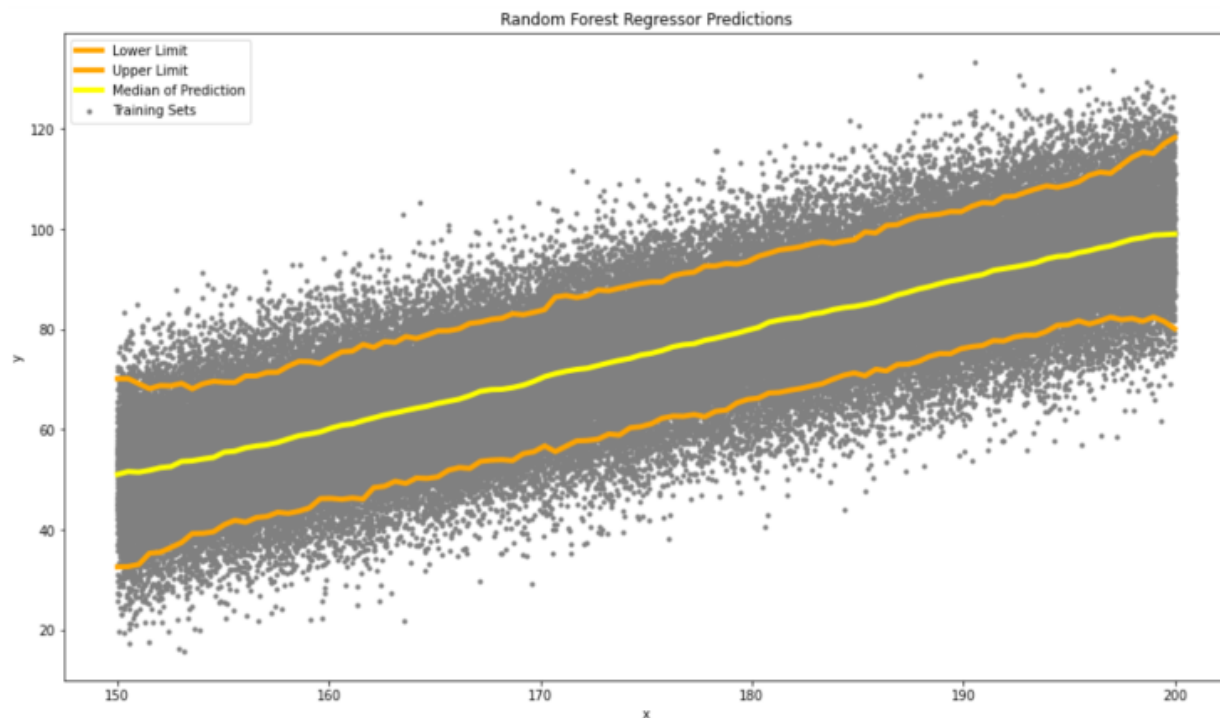


Рис. 5. Неопределённость прогнозов по случайному лесу в форме квартильной вариации
Fig. 5. Uncertainty of the random forest predictions in the form of quartile variation

Три квартиля Q1, Q2 и Q3 получены по массиву (выборке) прогнозов с использованием интерполяции для чётного объёма выборки. Межквартильный размах IQR определяется как расстояние между первым и третьим квартилями. Оценки нижней и верхней границы диапазона прогнозных значений находятся так, чтобы получить оценки, близкие к доверительным интервалам «три сигмы» при уровне доверительной вероятности около 99,7 %.

Основные соотношения для расчётов выглядят следующим образом:

$$IQR = Q3 - Q1$$

$$\text{Median} = Q2$$

$$\text{Low limit} = Q1 - 1.5 IQR$$

$$\text{Upper limit} = Q3 + 1.5 IQR$$

В дополнение к оцениванию неопределённости прогнозов можно констатировать сглаживающий эффект за счёт квантильного усреднения регрессионных оценок. Как медиана, так и границы интервалов для прогноза становятся более гладкими – по сравнению с индивидуальным прогнозом, полученным по одной выборке (см. рис. 5). На рис. 5 и 6 построенные по модели прогнозы демонстрируют общие свойства оценок МНК: наклон линии регрессии несколько ниже, чем наклон исходной линии. Таким образом, оценка коэффициента регрессии оказывается меньше, чем соответствующий параметр исходной модели, по которой были сгенерированы данные. Следует отметить, что аналогичное поведение характерно для многих моделей машинного обучения, когда используется квадратичный критерий качества, а после обучения модели определяют квадратичную метрику качества.

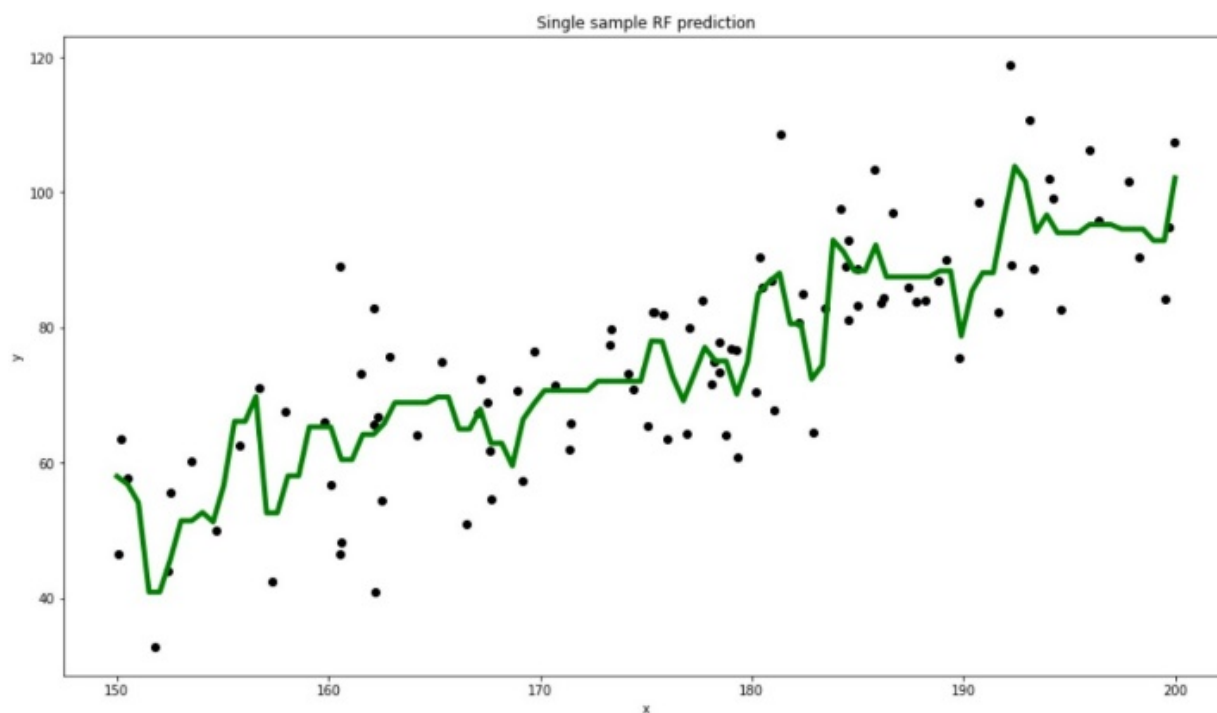


Рис. 6. Прогноз результативного признака для случайного леса, обученного по одной выборке
Fig. 6. Predicted output of random forest trained on single sample

Недавние усовершенствования в области интерактивных параллельных вычислений предоставляют дополнительные возможности для приложений машинного обучения на основе Python, R или MATLAB [21, 22]. Кроме того, недавно стал доступен автоматический инструментарий машинного обучения AutoML, что облегчает работу большого числа исследователей данных. Распространённый пример AutoML – пакет Auto-sklearn [23], в котором особое внимание уделяется оптимизации гиперпараметров. Отметим, что на каждой итерации обучения Auto-sklearn создаёт целый ансамбль моделей. Далее выполняется упрощённая оценка ошибки в форме медианного значения, а также 5-го и 95-го перцентилей, что является побочным результатом оценивания и может выступать в качестве меры неопределённости.

Выводы и дальнейшая работа

В данной работе рассмотрен общий подход к проведению регрессионного анализа, а результаты экстраполированы на оценивание неопределённости в моделях машинного обучения, чтобы заполнить нишу в существующих программных пакетах. Предлагаемый непараметрический подход основан на технике кросс-валидации и позволяет получать оценки неопределённости для прогнозов, полученных на основе машинных моделей. В то время как аналитическое оценивание неопределённости затруднено в связи с существенной нелинейностью машинных моделей, непараметрический подход позволяет получить альтернативные оценки для прогнозных значений. Следует отметить, что стандартное отклонение как мера неопределённости может адекватно описывать гауссовское распределение, которое не всегда присутствует в реальных данных. Поэтому предлагается в качестве стандартной меры разброса использовать «квартильную вариацию» на основе диаграммы размаха, что является более гибким, универсальным и статистически устойчивым средством.

Дальнейшие исследования в области оценивания неопределённости машинных прогнозов могут распространить предложенный подход на другие методы машинного обучения, такие как классификация, кластеризация и снижение размерности. При работе с большими массивами реальных данных исследователю придётся использовать вычислительные ресурсы суперкомпьютера, поскольку оценивание неопределённости через многократную кросс-валидацию требует вычислительной мощности – гораздо большей, чем для обучения машинной модели. Приемлемый уровень ускорения вычислений может быть достигнут, например, при использовании графических процессоров.

Список литературы/References

1. Arkov V.U. Uncertainty estimation in mechanical and electrical engineering. In: *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems ICOECS*. Manchester, U.K. 2021. P. 436–440.
2. Lakshminarayanan B., Pritzel A., Blundell C. Simple and Scalable Predictive Uncertainty Estimation using Deep Ensembles. In: *31st Conference on Neural Information Processing Systems NIPS*. Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA. 2017. P. 6405–6416.
3. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning*. Springer, NY; 2021. 426 p.
4. Saxena A., Celaya J., Saha B., Saha S., Goebel K. Evaluating prognostics performance for algorithms incorporating uncertainty estimates. In: *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 2010. P. 1–11. DOI: 10.1109/AERO.2010.5446828
5. Vater J., Harscheidt L., Knoll A. Smart Manufacturing with Prescriptive Analytics. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Technology and Management ICITM*. 2019. P. 224–228.
6. Wang L., Garnier H. *System Identification, Environmental Modelling, and Control System Design*. Springer, London; 2012. 648 p.
7. El-Sayed A.F. *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines*. CRC Press, Boca Raton; 2017. 1476 p.
8. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. *Mining of Massive Datasets*. Cambridge: Cambridge University Press; 2020. 565 p.
9. Tukey J.W. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley; 1977. 712 p.
10. Bruce P., Bruce A. *Practical Statistics for Data Scientists*. O'Reilly Media; 2017. 368 p.
11. Korngiebel D., Mooney S. Considering the possibilities and pitfalls of Generative Pre-trained Transformer (GPT-3) in healthcare delivery. *Digital Medicine*. 2021;4(1):93. DOI: 10.1038/s41746-021-00464-x
12. Snedecor G.W. *Statistical methods*. Iowa State University Press; 1938. 356 p.
13. Fomby T.B., Johnson S.R., Hill R.C. Review of Ordinary Least Squares and Generalized Least Squares. In: *Advanced Econometric Methods*. Springer, New York, NY; 1984. DOI: 10.1007/978-1-4419-8746-4_2
14. Kong Q., Siau T., Bayen A. Least Squares Regression. In: *Python Programming and Numerical Methods: A Guide for Engineers and Scientists*. Academic Press. 2021. P. 279–293.

15. Lyche T. Least Squares. In: *Numerical Linear Algebra and Matrix Factorizations*. Texts in Computational Science and Engineering book series 22. Springer International Publishing. 2020. P. 199–222.
16. Drygas H. Consistency of the least squares and Gauss-Markov estimators in regression models. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw Gebiete*. 1971;17:309–326.
17. Zimmerman D.L. Least Squares Estimation for the Gauss–Markov Model. In: *Linear Model Theory*. Springer, Cham. 2020.
18. Greene W. *Econometric Analysis*. Pearson, New York; 2020.
19. Kiusalaas J. *Numerical Methods in Engineering with Python 3*. Cambridge University Press, Cambridge; 2013.
20. Sohil F., Sohail M., Shabbir J. *An introduction to statistical learning with applications in R*. Springer Science and Business Media. New York; 2013.
21. Reuther A. et al. Interactive Supercomputing on 40,000 Cores for Machine Learning and Data Analysis. In: *2018 IEEE High Performance extreme Computing Conference (HPEC)*. 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/HPEC.2018.8547629
22. Raschka S., Patterson J., Nolet C. *Machine Learning in Python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence*. 2020. arXiv:2002.04803v2. DOI: 10.48550/arXiv.2002.04803
23. Feurer M. et al. Auto-sklearn: Efficient and Robust Automated Machine Learning. In: *Automated Machine Learning*. 2019.

Информация об авторах

Арков Валентин Юльевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; arkov.vyu@ugatu.su.

Шарипова Алия Маратовна, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; a.shamsieva@gmail.com.

Куликов Григорий Геннадьевич, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Уфа, Россия; grisha@molniya-ufa.ru.

Information about the authors

Valentin Yu. Arkov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; arkov.vyu@ugatu.su.

Aliia M. Sharipova, Cand. Sci. (Eng), Ass. Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; a.shamsieva@gmail.com.

Grigory G. Kulikov, Technical Director, JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russia; grisha@molniya-ufa.ru.

Статья поступила в редакцию 12.12.2022

The article was submitted 12.12.2022

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья
УДК 501, 533, 004.021
DOI: 10.14529/ctcr230306

СОПОСТАВЛЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ РАВНОВЕСНОЙ И КONTИНУАЛЬНОЙ МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД НА ПРИМЕРЕ ОДНОМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ

Д.А. Тукмаков, tukmakovda@imm.knc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>

Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный
исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия

Аннотация. Работа посвящена проблемам математического моделирования гидродинамических процессов в неоднородных средах. **Цель исследования** состоит в сопоставлении методик моделирования течений неоднородных сред. Сопоставлялись континуальная и равновесная методики моделирования динамики газовзвеси – газа с дисперсными включениями. Сравнивались расчеты, проведенные равновесной математической моделью динамики газовзвеси с численными реализациями континуальных математических моделей динамики газовзвеси с идеальной и вязкой теплопроводной несущей средой. Сопоставлялись различные параметры моделируемых процессов, полученных различными математическими моделями. **Материалы и методы.** В работе представлены две методики моделирования динамики многофазных сред. В равновесной методике неоднородная среда описывается как идеальный газ с расчетом поправочных коэффициентов газодинамических функций, в континуальной методике моделирования для частиц вводится понятие «средней плотности», таким образом и для несущей фазы – газа – и для дисперсной фазы решается система уравнений, состоящая из уравнения сохранения плотности, для дисперсной фазы – уравнения сохранения «средней плотности», уравнений сохранения импульса компонент смеси и уравнений сохранения энергии газа и дисперсной фазы. Системы уравнений движения однофазной и двухфазной сред интегрировались численным конечно-разностным методом второго порядка точности. Для подавления численных осцилляций на каждом временном шаге применялся метод нелинейной коррекции сеточной функции. Программный комплекс моделирования динамики газовзвеси состоял из нескольких компонент: подпрограмма задания граничных условий, подпрограмма формирования конечно-разностного разбиения физической области, основная программа расчета динамики неоднородной среды. **Результаты.** Моделировался процесс распада разрыва в однородном газе и в газовзвеси. Численные расчеты распада разрыва давления в однородном газе и численные расчеты распада разрыва в газовзвеси, полученные равновесной методикой моделирования, сопоставлялись с аналитическими решениями, известными из литературы. Определено, что наибольшая скорость распространения возмущения в газовзвеси наблюдается в равновесной модели, меньшая скорость распространения – в континуальной модели с идеальной средой, наименьшая скорость наблюдается в газовзвеси с вязкой теплопроводной средой. Выявлено, что для течений с различными начальными интенсивностями разрыва давления наличие дисперсной фазы в смеси оказывает различное влияние. **Выводы.** Полученные закономерности демонстрируют особенности каждой из методик моделирования динамики газовзвеси, что возможно использовать при разработке компьютерных моделей динамики многофазных сред.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, численные модели, многофазные среды, газовзвеси, равновесная модель, континуальная модель

Благодарности. Работа выполнена по теме «Развитие динамики многофазных сред, аэрогидроупругих систем и механики оболочек с приложениями в машиностроении и нефтедобыче» № 121021800126-4 в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Для цитирования: Тукмаков Д.А. Сопоставление компьютерных реализаций равновесной и континуальной методик моделирования многофазных сред на примере одномерного нестационарного течения газовзвеси // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 59–75. DOI: 10.14529/ctcr230306

COMPARISON OF COMPUTER IMPLEMENTATIONS OF EQUILIBRIUM AND CONTINUOUS METHODS FOR MODELING MULTI-PHASE MEDIA ON THE EXAMPLE OF A ONE-DIMENSIONAL UNSTATIONARY GAS SUSPENSION FLOW

D.A. Tukmakov, tukmakovda@imm.knc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>

Institute of Mechanics and Engineering – Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russia

Abstract. The work is devoted to the problems of mathematical modeling of hydrodynamic processes in inhomogeneous media. **The purpose** of the study is to compare the techniques for modeling the flows of inhomogeneous media. The continuum and equilibrium methods of modeling the dynamics of a gas suspension – a gas with dispersed inclusions – were compared. Comparisons were made between calculations carried out by an equilibrium mathematical model of the dynamics of gas suspensions with numerical implementations of continual mathematical models of the dynamics of gas suspensions with an ideal and viscous heat-conducting carrier medium. Various parameters of the simulated processes obtained by various mathematical models were compared. **Materials and methods.** The paper presents two methods for modeling the dynamics of multiphase media. In the equilibrium method, an inhomogeneous medium is described as an ideal gas with the calculation of the correction coefficients of gas-dynamic functions, in the continuum modeling method for particles, the concept of “average density” is introduced; thus, for both the carrier phase – gas and the dispersed phase, a system of equations is solved consisting of the density conservation equation, for of the dispersed phase, the “average density” conservation equation, the momentum conservation equations of the mixture components, and the energy conservation equations of the gas and dispersed phase. The systems of equations of motion of single-phase and two-phase media were integrated by a numerical finite-difference method of the second order of accuracy. To suppress numerical oscillations at each time step, the method of nonlinear correction of the grid function was used. The software package for modeling the dynamics of a gas suspension consisted of several components: a subroutine for setting the boundary conditions, a subroutine for the formation of a finite-difference partition of a physical domain, and the main program for calculating the dynamics of an inhomogeneous medium. **Results.** The discontinuity decay process in a homogeneous gas and in a gas suspension was modeled. Numerical calculations of pressure discontinuity decay in a homogeneous gas and numerical calculations of discontinuity decay in a gas suspension, obtained by the equilibrium modeling technique, were compared with analytical solutions known from the literature. It is determined that the highest propagation velocity of a disturbance in a gas suspension is observed in an equilibrium model, a lower propagation velocity in a continuum model with an ideal medium, and the lowest velocity is observed in a gas suspension with a viscous heat-conducting medium. It was found that for flows with different initial pressure discontinuity intensities, the presence of a dispersed phase in the mixture has a different effect. **Conclusions.** The regularities obtained demonstrate the features of each of the methods for modeling the dynamics of gases, which can be used in the development of computer models of the dynamics of multiphase media.

Keywords: computer simulation, numerical models, multiphase media, gas suspensions, equilibrium model, continuum model

Acknowledgments. The work was carried out on the topic “Development of the dynamics of multiphase media, aerohydroelastic systems and shell mechanics with applications in mechanical engineering and oil production” No. 121021800126-4 within the framework of the state task of the Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Tukmakov D.A. Comparison of computer implementations of equilibrium and continuous methods for modeling multi-phase media on the example of a one-dimensional unstationary gas suspension flow. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3):59–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230306

Введение

Одной из задач компьютерных технологий является разработка программ компьютерного моделирования динамических процессов в механике жидкости и газа [1–22]. Несмотря на наличие различных пакетов моделирования, в том числе коммерческих, по-прежнему актуальным является разработка программ компьютерного моделирования течения сплошных сред. Одним из развивающихся разделов механики жидкости и газа является динамика неоднородных сред [4–6]. Основной сложностью моделирования таких процессов является учет взаимодействия компонент смеси или же учет влияния дисперсных компонент примеси на динамику несущей среды – жидкости или газа. В моделировании динамики неоднородных сред в литературе есть несколько подходов. Моделирование течений неоднородных сред как однородной жидкости или газа с добавлением коэффициентов, учитывающих неоднородность движущейся среды, – равновесный подход. В этом случае система уравнений движения включает в себя уравнения сохранения плотности, импульса и энергии для всей смеси в целом. Также моделирование динамики неоднородных сред возможно с помощью решения полной гидродинамической системы уравнений для каждой из компонент смеси с учетом взаимодействия компонент – континуальный подход моделирования динамики неоднородных сред. В данной работе проводится сопоставление равновесного и континуального подходов моделирования динамики неоднородных сред. В монографии [4] представлены теоретические основы моделирования динамики неоднородных сред. В монографиях [5, 6] представлены различные математические модели динамики запыленных сред, реализующие континуальную методику динамики неоднородных сред. В работе [7] в рамках акустического приближения рассматривались процессы распространения акустических возмущений в газокапельных средах с учетом конденсации капельной фазы. В исследовании [8] получена математическая модель течения двухкомпонентной сжимаемой смеси, моделировалось взаимодействие ударной волны с газокапельной взвесью. В публикации [9] численно моделировалась многофазное течение с фазовыми переходами. Модель состоит из уравнений динамики многокомпонентной невязкой среды. В работе [10] исследовалась неустойчивость тонкого слоя вязкой жидкости в линейном и нелинейном приближениях. Получены аналитические решения системы уравнений динамики сплошных сред. В работе [11] численно исследовано распространение цилиндрической ударной волны и ее взаимодействие с прилегающим слоем гетерогенной двухфазной среды. Получена технология, позволяющая проводить численное исследование динамики распространения цилиндрических ударных волн в областях, заполненных гетерогенными смесями. В публикации [12] рассматривались проблемы компьютерного моделирования течений в управляемых газоструйных системах и гидродневоагрегатах, в конструкцию которых входят кольцевые сопла с различной геометрией в случае, когда движущаяся среда имеет многокомпонентный состав. В публикации [13] представлена математическая модель, использующая уравнение полной энергии, для численного исследования распространения ударных волн в гетерогенных двухфазных средах. Анализировались результаты расчетов течений аэрозолей, проведенных методами крупных частиц. В публикации [14] представлены расчеты в пакете ANSYS течения в проточной части вихревого расходомера. Исследовалась возможность оптимизации процесса расчетов течений в вихревом расходомере. В публикации [15] разработана равновесная модель односкоростной теплопроводной гетерогенной смеси, в которой учтен теплообмен между компонентами смеси. Для полученной математической модели разработан численный алгоритм решения методом Годунова.

Анализ литературы демонстрирует, что разработка компьютерных алгоритмов моделирования процессов гидрогазодинамики однородных и неоднородных сред на данный момент является актуальной проблемой компьютерных технологий. В данной работе проводятся расчеты одномерных течений неоднородной среды – газозвеси, в которой масса дисперсной компоненты равна массе несущей среды. Расчеты проведены с помощью двух различных методик моделирования течений неоднородных сред, результаты расчетов сопоставляются. Новизна исследования заключается в сравнении параметров характеристик течений, описываемых разными методиками моделирования. Выявленные сопоставлением особенности методик моделирования течений газозвесей могут быть использованы при разработке компьютерных программ моделирования течений неоднородных сред.

Математическая модель

Для нестационарного течения с одномерной геометрией, уравнения движения газа можно записать в виде [1]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p - \delta_{ij}\tau) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left([e + p - \delta_{ij}\tau]u + \delta_{ij}\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0. \quad (3)$$

Здесь δ_{ij} – символ Кронекера, течение вязкой среды описывается при $\delta_{11} = 1$, течение идеального газа при $\delta_{12} = 0$; p, ρ, u, T, e – давление, плотность, скорость, температура и полная энергия газа. Равновесная модель динамики газозвеси описывается системой уравнений [4]:

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_E u_E)}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_E u_E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_E u_E^2 + p_E) = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial(e_E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}([e_E + p_E]u_E) = 0. \quad (6)$$

В равновесной модели применяются те же обозначения, что и для однородного газа с индексом «E». Для записи параметров системы используются следующие выражения:

$$\rho_{E0} = (1 - \alpha)\rho_{10} + \alpha\rho_{20}; \quad T_E = e_E/c_{VE};$$

$$R_E = (1 - \alpha)\rho_{10}R((1 - \alpha)\rho_{10} + \alpha\rho_{20})^{-1};$$

$$p_E = \rho_E R_E T_E; \quad c_{VE} = c_{pE} - R_E; \quad \gamma_E = c_{pE}/c_{VE};$$

$$c_{pE} = ((1 - \alpha)\rho_{10}c_{p1} + \alpha\rho_{20}c_{p2})((1 - \alpha)\rho_{10} + \alpha\rho_{20})^{-1};$$

$$c_E = c\sqrt{(1 - \alpha)\rho_{10}\gamma_E(\gamma(1 - \alpha)\rho_{10} + \alpha\gamma\rho_{20})^{-1}}.$$

Здесь R_E, R – газовые постоянные газа и смеси; c_{p1}, c_{p2} – теплоемкости при постоянном давлении газа и дисперсной компоненты; c_{pE}, c_{VE}, c_E – теплоемкость при постоянном давлении смеси, теплоемкость при постоянном объеме смеси, скорость звука в смеси; γ, γ_E – постоянная адиабаты газа и смеси; $\alpha, \rho_{10}, \rho_{20}$ – объемное содержание, физическая плотность газа и дисперсной компоненты.

Континуальная математическая модель одномерного течения газозвеси описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1^2 + p - \delta_{ij}\tau) = -F + \alpha \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial(e_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left([e_1 + p - \delta_{ij}\tau]u_1 + \delta_{ij}\lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = -\delta_{ij}Q - |F|(u_1 - u_2) - \alpha \left(\frac{\partial(pu_1)}{\partial x} \right); \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial x} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 u_2^2) = F - \alpha \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial(e_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_2 u_2) = -\delta_{ij}Q. \quad (12)$$

Индексами «1» и «2» обозначены физические параметры несущей и дисперсной фазы газовой смеси. Здесь используются следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \rho_2 &= \alpha_2 \rho_{20}; \\ e_2 &= \rho_2 C_{p2} T_2; \\ \tau &= \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u_1}{\partial x}; \\ F &= F_{ar} + F_{dA} + F_{am}; \\ F_{ar} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha}{d} C_d \rho_1 |u_1 - u_2| (u_1 - u_2); \\ F_{dA} &= \alpha \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right); \\ F_{am} &= 0,5 \alpha \rho_2 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial t} - u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right); \\ C_{d2} &= \delta_{ij} \left(\frac{24}{\text{Re}_{12}} + \frac{4}{\text{Re}_{12}^{0,5}} \right) + 0,4; \\ M_{12} &= |u_1 - u_2| / c; \\ \text{Re}_{12} &= \rho_1 |u_1 - u_2| d \mu^{-1}; \\ \text{Pr} &= c_p \mu \lambda^{-1}. \end{aligned}$$

Здесь μ , λ , τ – вязкость, теплопроводность, функция учета вязкости; F_{am} – сила присоединенных масс; F_{dA} – динамическая сила Архимеда; F_{ar} – сила аэродинамического сопротивления [4]; C_{d2} – коэффициент сопротивления частицы; M_{12} – относительное число Маха; Re_{12} – относительное число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; ρ_2 – средняя плотность дисперсной фазы.

Для искоемых функций задавались следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} u_1(t, 1) = 0; \quad u_1(t, N) = 0; \quad u_2(t, 1) = 0; \quad u_2(t, N) = 0; \\ e_1(t, 1) = e_1(t, 2); \quad e_2(t, 1) = e_2(t, 2); \quad e_1(t, N) = e_1(t, N-1); \quad e_2(t, N) = e_2(t, N-1); \\ \rho_1(t, 1) = \rho_1(t, 2); \quad \rho_2(t, 1) = \rho_2(t, 2); \quad \rho_1(t, N) = \rho_1(t, N-1); \quad \rho_2(t, N) = \rho_2(t, N-1). \end{aligned}$$

Физическая область течения – отрезок $[a, b]$ в переменных (x, t) отображается на единичный интервал $[0, 1]$, в переменных (ξ, t) , $\xi = \xi(x)$. В обобщенных координатах [1] система уравнений движения двухфазной двухтемпературной двухскоростной монодисперсной смеси (6)–(12) приобретает вид:

$$\mathbf{q}_t + \mathbf{E}_\xi = \mathbf{H}; \quad (13)$$

$$\mathbf{q} = [\rho_1, \rho_2, \rho_1 u_1, \rho_2 u_2, e_1, e_2]^T; \quad J = \frac{\partial x}{\partial \xi};$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} J \rho_1 u_1 \\ J \rho_2 u_2 \\ \left(\rho_1 u_1^2 + p - \frac{4}{3} J \mu \partial u / \partial \xi \right) J \\ J \rho_2 u_2^2 \\ J \left((e_1 + p - \tau) u_1 + J \lambda \partial T_1 / \partial \xi \right) \\ J e_2 u_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F + J \alpha \partial p / \partial \xi \\ F - J \alpha \partial p / \partial \xi \\ -Q - |F| (u_1 - u_2) + J \alpha \partial (p u_1) / \partial \xi \\ Q \end{bmatrix}.$$

Система (13) решалась явным методом Мак-Кормака второго порядка [20] с последующим применением схемы нелинейной коррекции решения [21]. Явная схема Мак-Кормака включает в себя последовательно выполняемые шаги «предиктор» (14) и «корректор» (15):

$$\mathbf{q}_j^* = \mathbf{q}_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta \xi} (\mathbf{E}_{j+1}^n - \mathbf{E}_j^n) + \Delta t \mathbf{H}_j^n; \quad (14)$$

$$\mathbf{q}_j^{n+1} = 0,5(\mathbf{q}_j^n + \mathbf{q}_j^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta \xi} (\mathbf{E}_j^* - \mathbf{E}_{j-1}^*) + 0,5 \Delta t \mathbf{H}_j^*. \quad (15)$$

Здесь $x(\xi) = L\xi + L_0$, $J = L$, в расчетах $L_0 = 0$, $\Delta \xi = \Delta x/L = (L/(N-1))/L$ – шаг по пространственному направлению; Δt – шаг по времени; N – количество узлов разбиения сетки. Шаг по времени выбирался исходя из условия Куранта – Фридрихса – Леви [1]. Для получения монотонного численного решения к сеточной функции на каждом временном шаге применялась схема нелинейной коррекции [2, 3]. Алгоритм коррекции выполнялся последовательно вдоль всех узлов на каждом временном слое. Рассмотрим алгоритм коррекции решения на примере функции f . В случае, если выполняются условия $(\delta f_{j-1/2} \cdot \delta f_{j+1/2}) < 0$ или $(\delta f_{j+1/2} \cdot \delta f_{j+3/2}) < 0$, то к функции f в j -м узле применяется алгоритм схемы коррекции: $\tilde{f}_j = f_j + \kappa(\delta f_{j+1/2} - \delta f_{j-1/2})$. Нижний индекс обозначает номер узла сетки. Здесь использованы обозначения: $\delta f_{j+1/2} = f_{j+1} - f_j$, $\delta f_{j+3/2} = f_{j+2} - f_{j+1}$. В противном случае $\tilde{f}_j = f_j$, \tilde{f}_j – значение функции в j -м узле после перехода на $(n+1)$ -й временной слой по схеме Мак-Кормака; κ – коэффициент коррекции.

Программная реализация

Численный алгоритм реализован в виде программного комплекса. Изменения в структуре численно интегрируемых уравнений позволяют проводить расчеты как для идеальной математической модели, так и для вязкой теплопроводной среды. Компьютерная реализация численной модели течения жидкости или газа состоит из следующих частей: определение геометрических параметров физической области течения, в одномерном случае только размеров области, формирование разбиения области моделирования, задание граничных условий и непосредственно самого процесса численного интегрирования системы аэрогидродинамических уравнений. В данной работе компьютерная программа написана на языке программирования Fortran. Программный код, составляющий компьютерную модель, представляет собой набор последовательно реализуемых компонент. Алгоритм программной реализации численной модели динамики газовзвеси имеет следующую последовательность:

- 1) задаются физические параметры газа и твердых частиц;
- 2) из файлов считываются начальные значения функций, геометрия области и характеристики ее сеточного разбиения;
- 3) строится сеточное разбиение области течения смеси;
- 4) определяется значение величин межфазного обмена импульсом и межфазного теплообмена;
- 5) реализуется конечно-разностное решение уравнений динамики смеси;
- 6) проводится нелинейная коррекция сеточных функций;
- 7) значения искомых функций в узлах сетки на каждом временном слое выводятся в файл.

Вычисление значений параметров неоднородной среды на каждом последующем временном слое осуществляется последовательным применением шагов 4–6. Программный комплекс состоит из нескольких компонент: подпрограмма задания граничных условий, подпрограмма формирования конечно-разностного разбиения физической области, основная программа расчета динамики неоднородной среды.

На рис. 1а изображена структура программы моделирования динамики однофазной сплошной среды. На рис. 1б представлена структура программы численного моделирования динамики неоднородной среды, реализующей континуальную методику моделирования неоднородной среды. В структуре программы численной реализации континуальной методики моделирования динамики неоднородных сред присутствует два отличия: в основной программе численно интегрируется полная гидродинамическая система уравнений для всей совокупности компонент смеси, также присутствует подпрограмма учета межфазного взаимодействия.

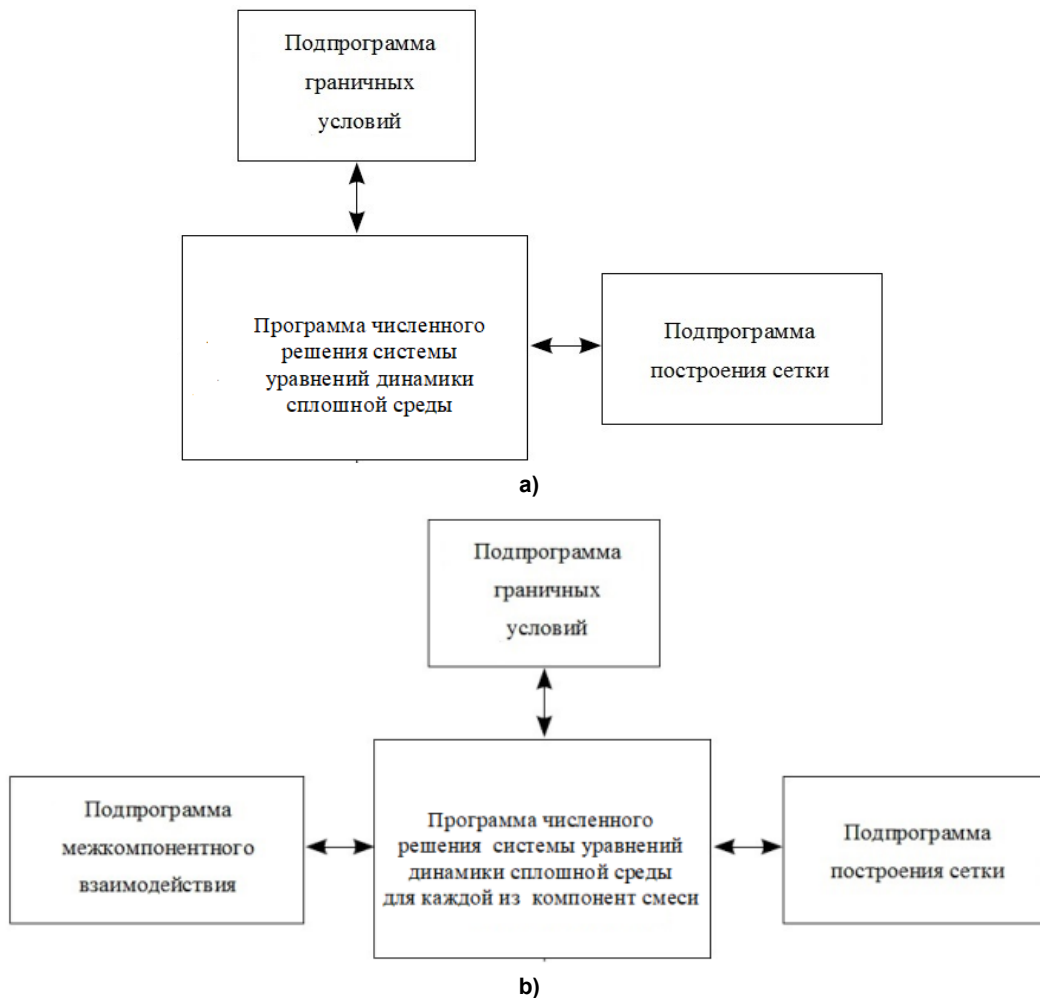


Рис. 1. Схема программы численного моделирования течения однородной среды (а) и многофазной среды, реализующей континуальную методику моделирования динамики неоднородных сред (б)

Fig. 1. Scheme of the program for numerical simulation of the flow of a homogeneous medium (a) and of a multiphase medium, which implements the continuum method for modeling the dynamics of inhomogeneous media (b)

Результаты расчетов

Для сопоставления различных моделей динамики многофазных сред рассматривался процесс распада разрыва [21] в газозвеси [5, 6].

Предполагалось, что канал разделен разделяющей поверхностью на две части: в одной половине давление газа $p_1 = 100$ кПа, в другой части канала давление газа p_2 , $p_2 > p_1$ (рис. 2). После разрушения разделяющей поверхности формируется ударная волна, движущаяся из области с высоким давлением в область с низким давлением, при этом происходит изменение физических параметров газа. Длина канала $L = 10$ м, количество узлов сетки $N = 500$. Несущая среда описывалась как воздух. Физическая плотность материала дисперсной компоненты и теплоемкость материала дисперсной компоненты составляла $\rho_{20} = 2500$ кг/м³, $C_{p1} = 903$ Дж/кг·К, объемное содержание $\alpha = 0,0005$, дисперсность частиц $d = 2$ мкм.

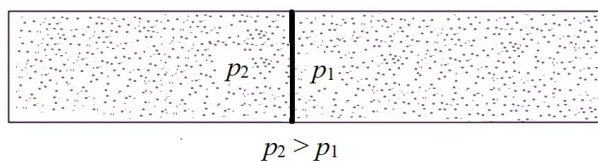


Рис. 2. Схематическое изображение начального момента распада прямого скачка уплотнения в газозвеси

Fig. 2. Schematic representation of the initial moment of the collapse of a direct shock wave in a gas suspension

В процессе распространения ударной волны в газе происходит существенное изменение плотности газа [21] (рис. 3).

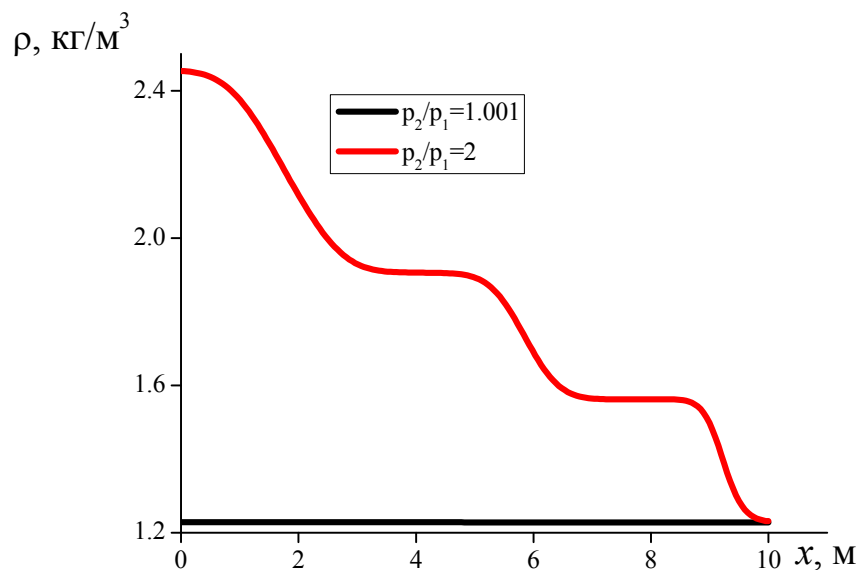


Рис. 3. Пространственное распределение плотности газа при различных интенсивностях распада разрыва в однородном газе
Fig. 3. Spatial distribution of gas density at different intensities of discontinuity decay in a homogeneous gas

На рис. 4 изображено пространственное распределение скорости газа при моделировании процесса распада разрыва при интенсивности разрыва $(p_2 - p_1)/p_1 = 0,001$. В полученных расчетах отличие скоростей газа, полученных по модели идеального и вязкого теплопроводного газа составляет $|u_i - u_v| \approx 10\% u_i$.



Рис. 4. Пространственное распределение скорости газа в однородном газе для различных моделей динамики газа, момент времени $t = 15$ мс, интенсивность перепада давлений $p_2/p_1 = 1,001$
Fig. 4. Spatial distribution of gas velocity in a homogeneous gas for various models of gas dynamics, time $t = 15$ ms, intensity of pressure drop $p_2/p_1 = 1,001$

При этом для ударно-волнового течения $(p_2 - p_1)/p_1 = 1$ различия для скоростей, полученных по двум различным моделям динамики газа, не являются существенными (рис. 5).

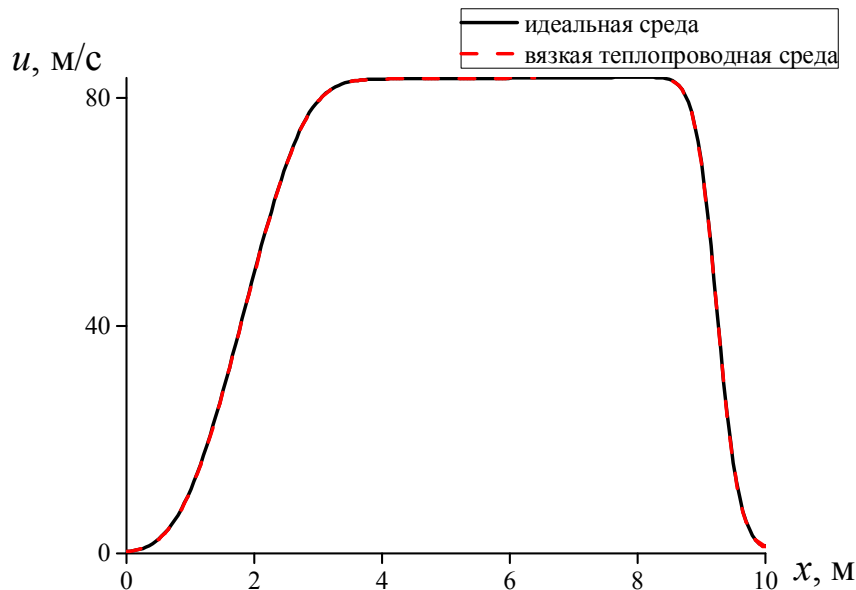


Рис. 5. Пространственное распределение скорости газа в однородном газе для различных моделей динамики газа, момент времени $t = 12$ мс, интенсивность перепада давлений $p_2/p_1 = 2$

Fig. 5. Spatial distribution of gas velocity in a homogeneous gas for various models of gas dynamics, time $t = 12$ ms, intensity of pressure drop $p_2/p_1 = 2$

В абсолютных значениях разность скоростей между вязким теплопроводным и идеальным газом возрастает вместе со скоростью течения, но составляет не более $|u_i - u_v|/u_i \approx 0,5\%$ от скорости движения газа u_i в ударно-волновом течении (рис. 6). Для течений с различными интенсивностями распределение плотности газа существенно отличается, при малых интенсивностях течений возможно пренебречь изменениями плотности среды, тогда как для ударно-волнового течения изменения в плотности среды более существенны (см. рис. 6).

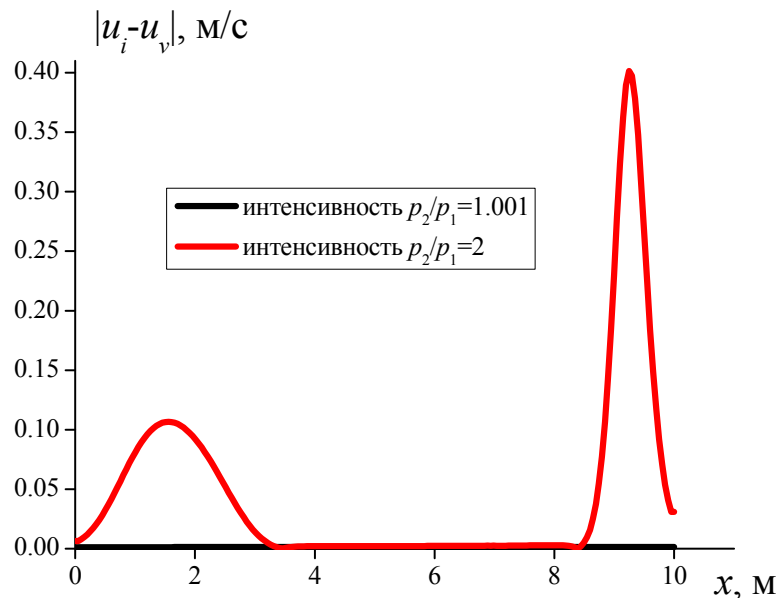


Рис. 6. Пространственное распределение модуля разности скоростей газа, вычисленных при моделировании динамики однородного газа моделью вязкого теплопроводного газа и идеального газа, $t = 12$ мс

Fig. 6. Spatial distribution of the modulus of the difference in gas velocities calculated when modeling the dynamics of a homogeneous gas with a model of a viscous heat-conducting gas and an ideal gas, $t = 12$ ms

Отличие континуальной и равновесной моделей динамики газозвесей заключается в том, что при моделировании движения однородной среды и динамики несущей фазы газозвеси в континуальной модели начальные распределения давления газа совпадают, тогда как в равновесной модели при тех же параметрах несущей среды начальное давление газа имеет меньшее значение (рис. 7). Давление газа при моделировании динамики газозвеси равновесной моделью составляет 99,95 % от давления в однородном газе или газовой фазе, моделируемой континуальной моделью. Отличием континуальной модели динамики многофазных сред является наличие температурной неравновесности. Даже при равной начальной температуре фаз в процессе движения газозвеси формируется разность температур несущей и дисперсной фазы газозвеси.

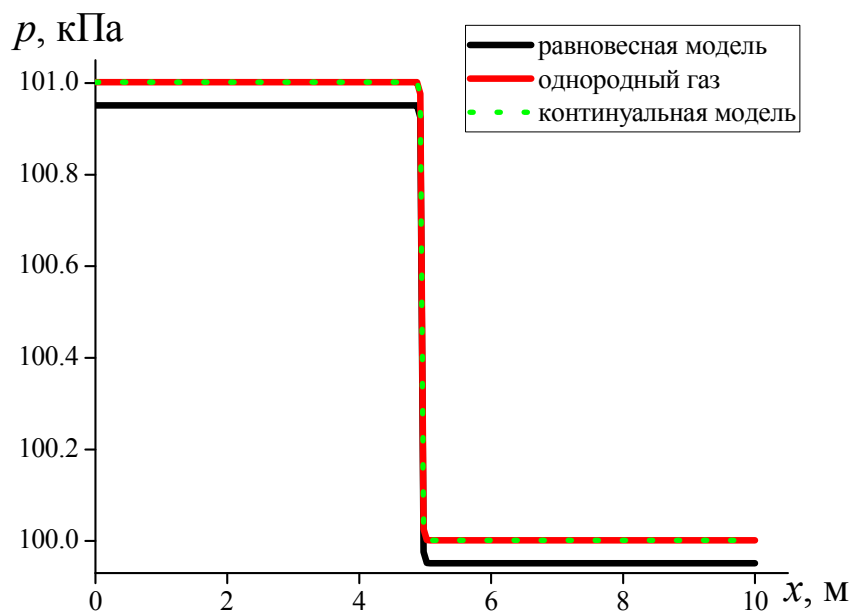


Рис. 7. Начальные распределения давления при моделировании распада разрыва в однородном газе и в газозвеси при динамике газозвеси континуальной и равновесной моделях при одинаковых начальных параметрах газа

Fig. 7. Initial pressure distributions in modeling the discontinuity decay in a homogeneous gas and in a gas suspension with the gas suspension dynamics by the continuum and equilibrium models for the same initial gas parameters

На рис. 8 представлено сопоставление модуля разности температуры несущей и дисперсной компоненты для двух различных интенсивностей перепада давления $p_2/p_1 = 1,01$, $p_2/p_1 = 2$. Даже при малых интенсивностях течений (см. рис. 8), в континуальной модели с вязкой и теплопроводной несущей средой и несущей средой – идеальным газом существенно отличаются температуры газовой и дисперсной фаз смеси. Для начального перепада давлений $p_2/p_1 = 2$ для несущей среды – идеального газа величина разности температур фаз существенно больше – $|T_1 - T_2| = 14,32$ К, чем если модель учитывает вязкость и теплопроводность среды – $|T_1 - T_2| = 0,35$ К. Для начального перепада давлений $p_2/p_1 = 1,01$ в модели с несущей средой – идеальным газом величина интенсивности разности температур – $|T_1 - T_2| = 0,23$ К, если модель учитывает вязкость и теплопроводность несущей среды тот же параметр – $|T_1 - T_2| = 0,0026$ К.

Равновесная модель, как и модель динамики идеального газа, позволяет получить аналитические решения [21]. Сопоставление численных расчетов, полученных как для однородной идеальной среды, так и для равновесной модели динамики газозвеси, демонстрирует приемлемое соответствие 75 % от аналогичных аналитических решений, что связано с диссипацией численного решения [1, 5, 6] (рис. 9).

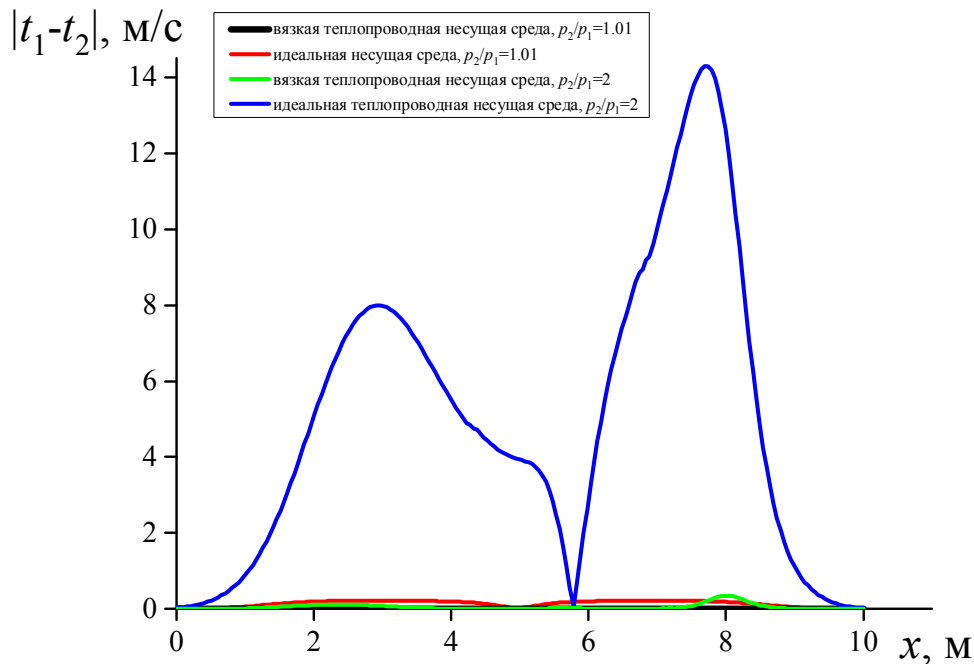


Рис. 8. Пространственное распределение модуля разности температуры фаз при моделировании динамики газозвеси континуальными моделями с вязкой теплопроводной и идеальной несущей средой для разных интенсивностей начального перепада давлений

Fig. 8. Spatial distribution of phase temperature difference modulus when modeling gas suspension dynamics by continual models with a viscous heat-conducting and ideal carrier medium for different intensities of the initial pressure drop

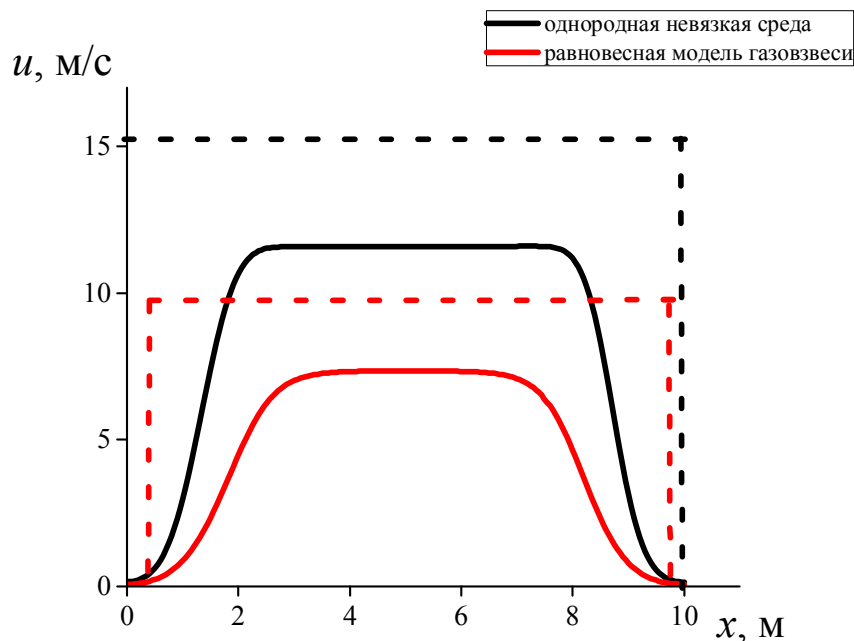


Рис. 9. Сопоставление численных расчетов – сплошной линией и аналитических расчетов – пунктирной линией. Интенсивность начального перепада давления $p_2/p_1 = 1,1$

Fig. 9. Comparison of numerical calculations – a solid line and analytical calculations – a dotted line. The intensity of the initial pressure drop $p_2/p_1 = 1.1$

На рис. 10 представлены результаты численных расчетов давления и температуры газа в газозвеси при интенсивности распада разрыва давления $(p_2 - p_1)/p_1 = 0,01$ в два различных момента

времени – $t = 5$ мс и $t = 8$ мс, из рис. 10 следует, что наибольшая скорость распространения ударной волны наблюдается в равновесной модели, меньшая скорость наблюдается в континуальной модели с идеальной несущей средой, еще меньшая скорость распространения в ударной волне с вязкой теплопроводной средой (см. рис. 10а). При этом, чем выше скорость распространения возмущения, тем меньше температура газа, достигаемая в ударной волне, наименьшая скорость и наибольшая температура газа в модели динамики газозвеси с вязкой теплопроводной средой (см. рис. 10б).

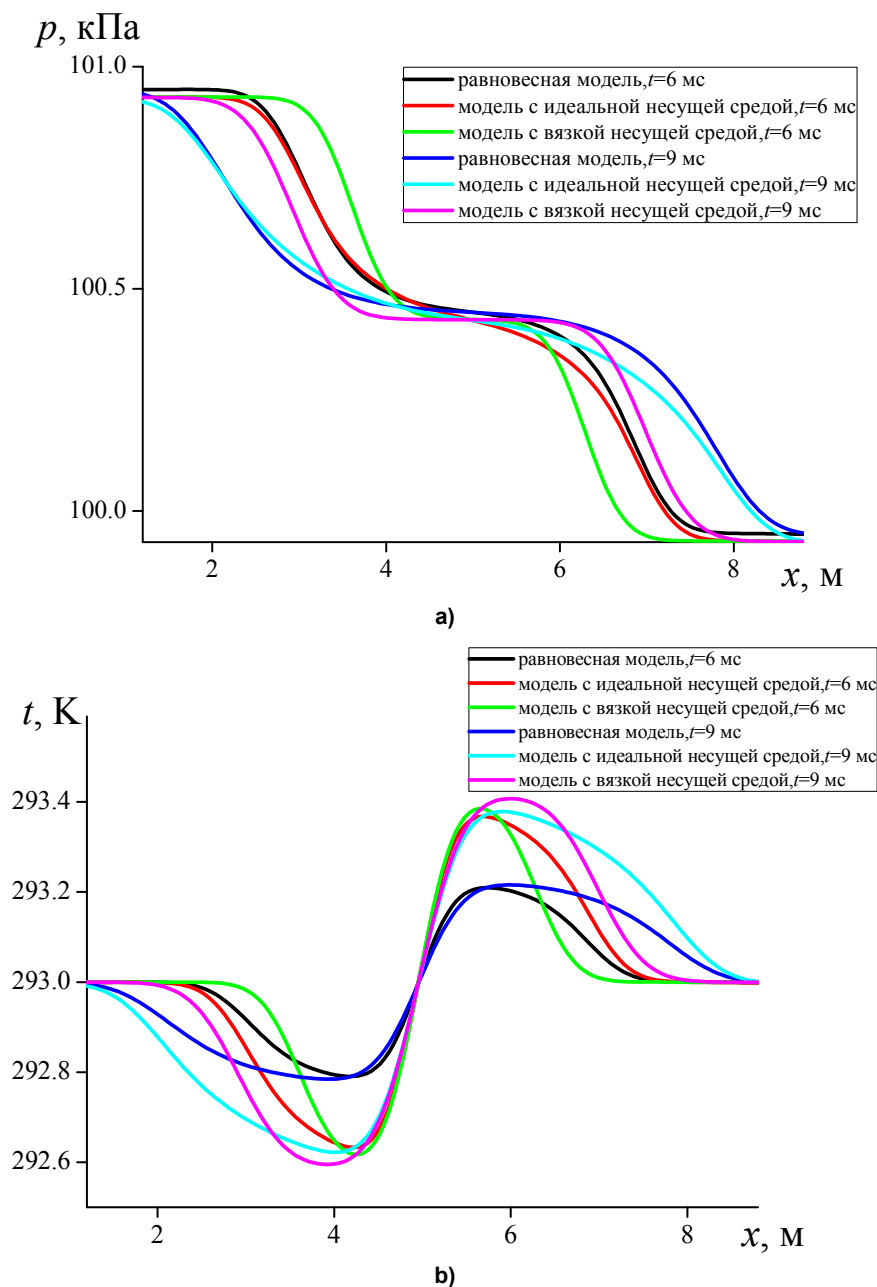


Рис. 10. Пространственные распределения в различные моменты времени давления газа (а) и температуры газа (б) при моделировании динамики газозвеси различными математическими моделями
Fig. 10. Spatial distributions at different times of gas pressure (a) and gas temperature (b) when modeling the dynamics of a gas suspension by various mathematical models

При уменьшении интенсивности течения увеличиваются различия в результатах расчетов скорости однородного газа и скорости газовой фазы в газозвеси, а также скорости среды в равновесной модели (рис. 11). Для интенсивностей начального перепада давления $p_2/p_1 = 2$,

$p_2/p_1 = 1,1$, $p_2/p_1 = 1,01$ отношения к максимальной скорости идеального однородного газа (u_{ig}) максимальной скорости газа в континуальной модели динамики газозвеси с идеальной средой – u_{gsi}/u_{ig} , газозвеси с вязкой теплопроводной несущей средой – u_{gsv}/u_{ig} , максимальной скорости среды в равновесной модели газозвеси – u_{gse}/u_{ig} (см. таблицу). Из таблицы следует, что наиболее существенно скорость течения газа в газозвеси уменьшается относительно однородной идеальной среды (при той же интенсивности начального перепада давления) для расчетов течения газозвеси континуальной методикой моделирования с вязкой теплопроводной средой, менее интенсивно скорость среды уменьшается в равновесной модели, еще меньше уменьшается в континуальной модели с идеальной средой.

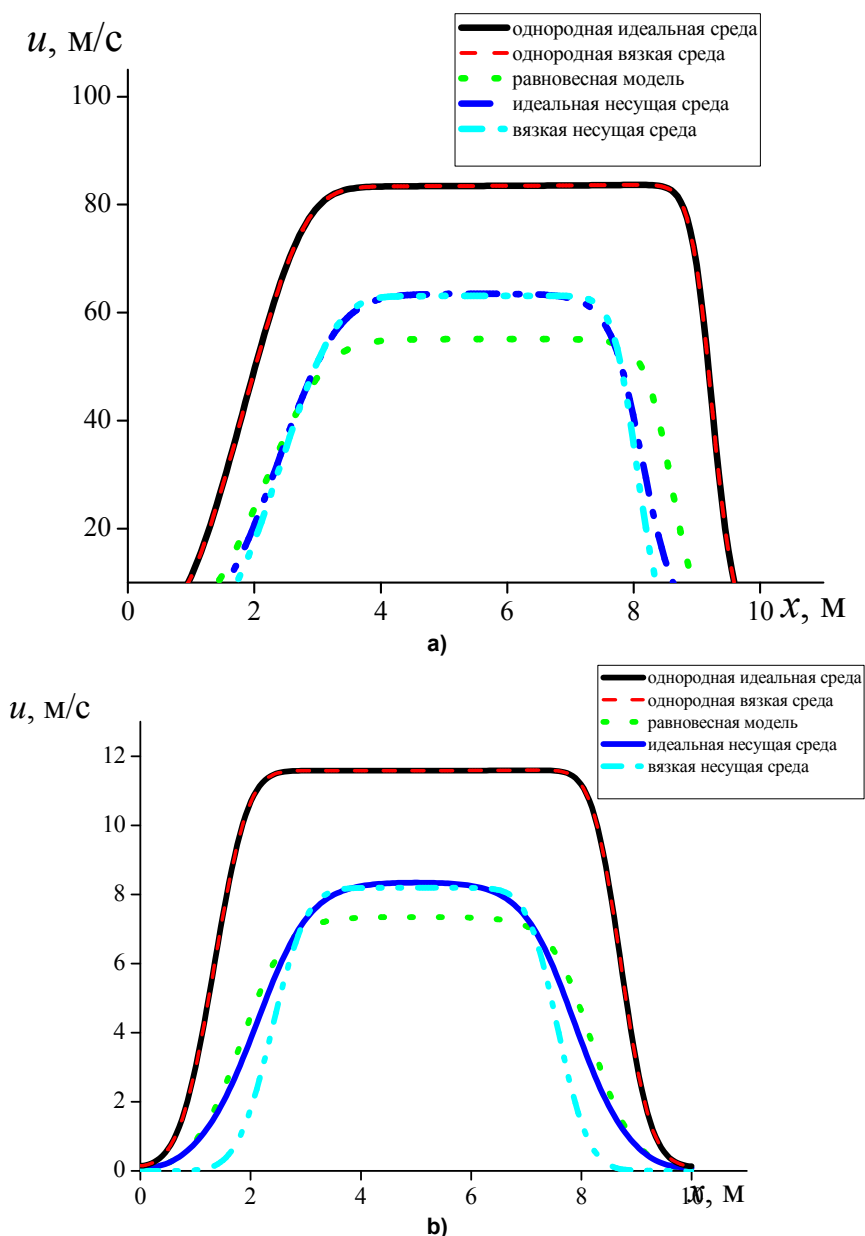


Рис. 11. Пространственное распределение скорости газа при моделировании распада разрыва в однородном газе и в газозвеси равновесной и континуальной математическими моделями при начальной интенсивности разрыва давлений $p_2/p_1 = 2$ (а); $p_2/p_1 = 1,1$ (б); $p_2/p_1 = 1,01$ (с)

Fig. 11. Spatial distribution of gas velocity when modeling discontinuity decay in a homogeneous gas and in a gas suspension by equilibrium and continuum mathematical models at the initial intensity of pressure discontinuity $p_2/p_1 = 2$ (a); $p_2/p_1 = 1.1$ (b); $p_2/p_1 = 1.01$ (c) (см. также с. 72)

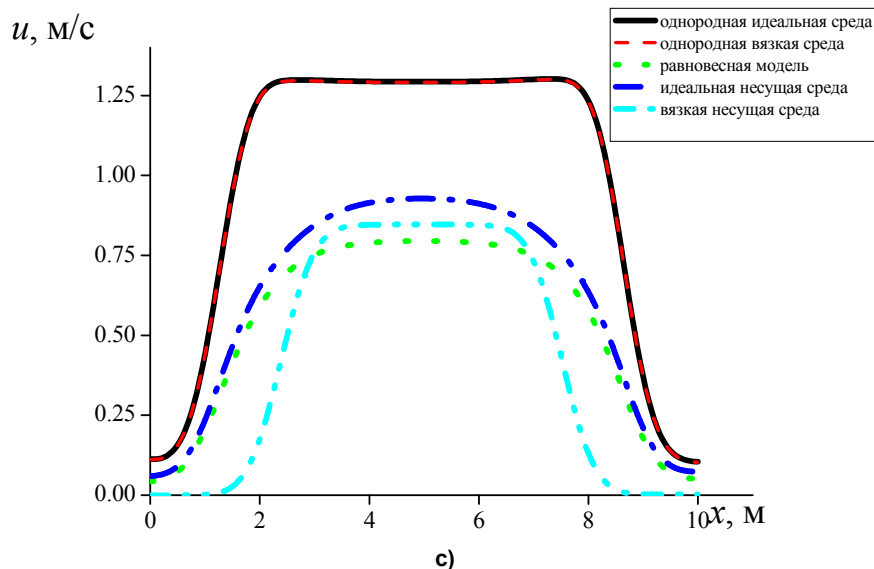


Рис. 11. Окончание
Fig. 11. End

Отношения максимальных значений скоростей несущей среды
Ratios of the maximum values of the carrier medium

p_2/p_1	u_{gsi}/u_{ig}	u_{gsv}/u_{ig}	u_{gse}/u_{ig}
$p_2/p_1 = 2$	76,86 %	75,17 %	69,68 %
$p_2/p_1 = 1,1$	72 %	70 %	63,28 %
$p_2/p_1 = 1,01$	71 %	64 %	60,5 %

Выводы

В данной работе представлены сопоставления расчетов численных реализаций математических моделей одномерных течений газозвесей. Сопоставлялись равновесная методика моделирования динамики многофазной среды с континуальной методикой моделирования динамики многофазных сред, в рамках которой были получены модели, описывающие несущую фазу смеси как идеальный газ и как вязкую теплопроводную среду. Определено, что наибольшая скорость распространения возмущения в газозвеси наблюдается в равновесной модели, меньшая скорость распространения – в континуальной модели с идеальной средой, наименьшая скорость наблюдается в газозвеси с вязкой теплопроводной средой. Выявлено, что при различных интенсивностях течений наличие дисперсной фазы в смеси оказывает различное влияние. Полученные закономерности возможно использовать при разработке компьютерных моделей динамики многофазных сред.

Список литературы

1. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2 т.: пер. с англ. М.: Мир, 1991. Т. 2. 552 с.
2. Тукмаков А.Л. Численное моделирование акустических течений при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 33–36.
3. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Математическое моделирование. 1993. № 3. С. 74–83.
4. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
5. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах, СПб.: Недра, 2003. 284 с.
6. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газозвесах частиц металлов. Новосибирск, 2015. 301 с.

7. Numerical Simulation of Condensation of Natural Fog Aerosol under Acoustic Wave Action / C. Liu, Y. Zhao, Z. Tian, H. Zhou // *Aerosol Air and Quality Reserch*. 2021. Vol. 21, iss. 4. P. 1–21. DOI: 10.4209/aaqr.2020.06.0361
8. Yeom G.S., Chang K.S. Shock wave diffraction about a wedge in a gas-microdroplet mixture // *International journal of heat and mass transfer*. 2010. Vol. 53. P. 5073–5088. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.056
9. Saurel R., Boivin P., Le Metayer O. A general formulation for cavitating, boiling and evaporating flows // *Computers and Fluids*. 2016. Vol. 128. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.01.004
10. Прокудина Л.А., Саламатов Е.А. Математическое моделирование неустойчивости тонкого слоя вязкой жидкости // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2009. № 3 (136). С. 48–54.
11. Ковалев Ю.М., Шестаковская Е.С. Численное исследование распространения цилиндрических ударных волн в гетерогенных средах // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2013. Т. 13, № 3. С. 102–108.
12. Карташев А.Л., Карташева М.А. Система математического моделирования течений в управляемых газоструйных системах и гидропневмоагрегатах с кольцевыми соплами // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2013. Т. 13, № 4. С. 30–37.
13. Ковалев Ю.М., Ковалева Е.А. Анализ возможности применения некоторых численных методов для решения задач механики многокомпонентных сред // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2014. Т. 14, № 1. С. 57–62.
14. Карташев А.Л., Кривоногов А.А. Математическая модель трансформации двумерного течения в проточном тракте вихревого расходомера в трехмерное течение // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2017. Т. 17, № 2. С. 93–102. DOI: 10.14529/ctcr170208
15. Суоров В.С. Гиперболическая модель односкоростной теплопроводной смеси с учетом межфракционного теплообмена // *Теплофизика высоких температур*. 2018. Т. 56, № 6. С. 975–985. DOI: 10.31857/S004036440003570-1
16. Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газовзвеси // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2022. Т. 22, №1. С. 90–102. DOI: 10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102
17. Tukmakov D.A. Nonstationary one-dimensional mathematical model of the dynamics of incompressible two-phase medium // *Technical Physics*. 2023. No. 1. DOI: 10.1134/S1063784222100097
18. Tukmakov D.A. One-dimensional unsteady numerical model of gas suspension flow caused by gravitational sedimentation of particles with a constant velocity // *Journal of applied mechanics and technical physics*. 2022. Vol. 63, iss. 7. P. 1218–1226. DOI: 10.1134/S0021894422070148
19. Тукмаков Д.А. Численное моделирование взаимодействия газовзвеси с ударной волной континуальными математическими моделями с идеальной и диссипативными несущими средами // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. 2022. Т. 11, № 4. С. 67–87. DOI: 10.14529/cmse220405
20. Тукмакова Н.А., Тукмаков Д.А. Численное моделирование динамики испаряющейся многофракционной парок капельной смеси метана в трубе с учетом закрутки потока // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2023. Т. 23, № 1. С. 106–118. DOI: 10.14529/power230111
21. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с.
22. Базаров И.П. Термодинамика. СПб.: Лань, 2010. 384 с.

References

1. Fletcher C.A. *Computation Techniques for Fluid Dynamics*. Springer-Verlang, Berlin et al.;1988. 502 p.
2. Tukmakov A.L. Numerical simulation of acoustic flows at resonance gas oscillations in a closed tube // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatcionnaya tekhnika*. 2006;4:33–36. (In Russ.)
3. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. [Application of compact difference schemes to the study of unsteady compressible gas flows]. *Mathematical modeling*. 1993;3:74–83. (In Russ.)

4. Nigmatulin R.I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of mechanics of heterogeneous media]. Moscow: Nauka; 1978. 336 p. (In Russ.)
5. Kutushev A.G. *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh processov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh* [Mathematical modeling of wave processes in aerodisperse and powder media]. St. Petersburg: Nedra; 2003. 284 p. (In Russ.)
6. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel T.A. *Volnovye processy v gazovzvesyakh chastic metallov* [Wave processes in gas suspensions of metal particles]. Novosibirsk; 2015. 301 p. (In Russ.)
7. Liu C., Zhao Y., Tian Z., Zhou H. Numerical Simulation of Condensation of Natural Fog Aerosol under Acoustic Wave Action. *Aerosol Air and Quality Research*. 2021;21(4):1–21. DOI: 10.4209/aaqr.2020.06.0361
8. Yeom G.S., Chang K.S. Shock wave diffraction about a wedge in a gas-microdroplet mixture. *International journal of heat and mass transfer*. 2010;53:5073–5088. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.056
9. Saurel R., Boivin P., Le Metayer O. A general formulation for cavitating, boiling and evaporating flows. *Computers and Fluids*. 2016;128:53–64. DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.01.004
10. Prokudina L.A., Salamatov E.A. Mathematical simulation of treacle slice unsteadiness. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2009;3(136):48–54. (In Russ.)
11. Kovalev Yu.M., Shestakovskaya E.S. Numerical analysis of cylindrical shock waves in heterogeneous environments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2013;13(3):102–108. (In Russ.)
12. Kartashov A.L., Kartasheva M.A. System of mathematical modeling of flows in controlled gas-jet systems and hydropneumatic devices with annular nozzles. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2013;13(4):30–37. (In Russ.)
13. Kovalev Yu.M., Kovaleva E.A. The analysis of some numerical methods application for the solution of multicomponent media mechanics tasks. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2014;14(1):57–62. (In Russ.)
14. Kartashev A.L., Krivonogov A.A. Mathematical model of transformation a 2D simulation flowing part of vortex flowmeter to 3D case. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2017;17(2): 93–102. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170208
15. Surov V.S. Hyperbolic model of a single-speed, heat-conductive mixture with interfractional heat transfer. *High Temperature*. 2018;56(6):890–899. DOI: 10.1134/S0018151X1806024X
16. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Numerical study of the influence of the parameters of dispersed particles on the deposition of the solid phase of an electrically charged polydisperse gas suspension. *Izvestiya of Saratov university. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2022; 22(1):90–102. (In Russ.) DOI: 10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102
17. Tukmakov D.A. Nonstationary one-dimensional mathematical model of the dynamics of incompressible two-phase medium. *Technical Physics*. 2023;(1). DOI: 10.1134/S1063784222100097
18. Tukmakov D.A. One-dimensional unsteady numerical model of gas suspension flow caused by gravitational sedimentation of particles with a constant velocity. *Journal of applied mechanics and technical physics*. 2022;63(7):1218–1226. DOI: 10.1134/S0021894422070148
19. Tukmakov D.A. Numerical Simulation of the Interaction of a Gas Suspension with a Shock Wave by Continual Mathematical Models with Ideal and Dissipative Carrier Media. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2022;11(4): 67–87. (In Russ.) DOI: 10.14529/cmse220405
20. Tukmakova N.A., Tukmakov D.A. The numerical simulation of an evaporating multifraction vapor-droplet mixture of methane in a pipe taking into account the swirling flow. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(1):106–118. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230111
21. Ovsyannikov L.V. *Lektsii po osnovam gazovoy dinamiki* [Lectures on the Fundamentals of Gas Dynamics]. Moscow; Izhevsk: Institute for Computer Research; 2003. 336 p. (In Russ.)
22. Bazarov I.P. *Termodinamika* [Thermodynamics]. St. Petersburg: Lan Publ.; 2010. 384 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Тукмаков Дмитрий Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия; tukmakovda@imm.knc.ru.

Information about the author

Dmitry A. Tukmakov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Researcher, Institute of Mechanics and Engineering – Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russia; tukmakovda@imm.knc.ru.

Статья поступила в редакцию 17.04.2023

The article was submitted 17.04.2023

Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья
УДК 004.67 + 339.13
DOI: 10.14529/ctcr230307

ПРОБЛЕМЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СУБЪЕКТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

О.В. Логиновский¹, loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>
Е.А. Лясковская¹, liaskovskaia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0857>
Р.Р. Габдулин², nadsistema@yandex.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Производственная компания «Челябинский тракторный завод», Челябинск, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию процессов цифровой трансформации экономических субъектов, рассматриваемых в качестве открытых социально-экономических систем. С использованием статистических данных обосновано дальнейшее развитие процессов цифровой трансформации, а также необходимость разработки информационно-аналитического и методического обеспечения управления этими процессами. Систематизирована сущность и разработано авторское понятие цифровой трансформации социально-экономической системы, рассмотрены ее цели и направления для различных уровней экономики. Рассмотрены этапы, направления и индикаторы цифровой трансформации государственного управления. Исследованы направления и динамика цифровой трансформации субъектов РФ и ее проблемы. **Цель исследования** состоит в исследовании цифровой трансформации в контексте управления развитием социально-экономических систем, состояний субъекта, объекта и системы управления, а также формирования комплекса проблемных полей цифровой трансформации субъектов РФ в контексте их функциональных, структурных, ресурсных и информационных характеристик как открытых динамических социально-экономических систем. **Материалы и методы.** Статистической основой исследования выступили данные российских и зарубежных аналитических агентств, данные Росстата и международных статистических баз данных, характеризующие процессы информатизации и цифровизации российской и мировой экономик, данные о стратегиях цифровой трансформации субъектов РФ, представленные на сайтах Правительства России, федеральных и региональных органов исполнительной власти. В исследовании использованы методы корреляционно-регрессионного, кластерного, структурного и контент-анализа, а также системный подход. Теоретической и методической базой выступили работы российских и зарубежных исследователей, отчеты мировых и российских консалтинговых агентств и исследовательских центров, нормативно-правовые документы РФ и международных организаций. **Результаты.** Систематизированы роль, значение и функции цифровизации. Разработано определение цифровой трансформации как характеристики социально-экономической системы, используемой для описания целей, процесса и результатов цифрового развития, приводящего к трансформационному изменению параметров управляющей и управляемой систем, переводу систем на качественно новый уровень, который проявляется в радикальном изменении бизнес-модели, бизнес-процессов, выпускаемых продуктов и оказываемых услуг. Диагностированы региональные диспропорции в цифровом развитии субъектов Российской Федерации. Определены проблемные поля цифровой трансформации субъектов РФ в контексте четырех составляющих – функционального, структурного, информационного и ресурсного их описания как социально-экономических систем (далее – СЭС). **Заключение.** Разработанное понятие цифровой трансформации основано на системной парадигме и может использоваться для разработки комплекса методов, моделей, показателей и индикаторов цифрового развития СЭС. Разработанный комплекс проблемных полей цифровой трансформации субъектов РФ как СЭС может использоваться для разработки систем поддержки управленческих решений, активизации цифрового развития субъектов РФ, повышения его результативности, эффективности и устойчивости.

Ключевые слова: цифровизация, цифровая трансформация, цифровая экономика, цифровое развитие, цифровизация государственного управления

Для цитирования: Логиновский О.В., Лясковская Е.А., Габдулин Р.Р. Проблемы цифровой трансформации субъектов Российской Федерации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 76–92. DOI: 10.14529/ctcr230307

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230307

PROBLEMS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE SUBJECTS OF THE RUSSIAN FEDERATION

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>
E.A. Lyaskovskaya¹, liaskovskaiaea@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0857>
R.R. Gabdulin², nadsistema@yandex.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Production Company "Chelyabinsk Tractor Plant" LLC, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The work is devoted to the study of the processes of digital transformation of economic entities considered as open socio-economic systems. With the use of statistical data, the further development of digital transformation processes, as well as the need to develop information-analytical and methodological support for the management of these processes, is substantiated. The essence is systematized and the author's concept of digital transformation of the socio-economic system is developed, its goals and directions for various levels of the economy are considered. The stages, directions and indicators of the digital transformation of public administration are considered. The directions and dynamics of the digital transformation of the subjects of the Russian Federation and its problems are studied. **The purpose of the study** is to study digital transformation in the context of managing the development of socio-economic systems, states of the subject, object and management system, as well as the formation of a complex of problem fields of digital transformation of the subjects of the Russian Federation in the context of their functional, structural, resource and information characteristics as open dynamic socio-economic systems. **Materials and methods.** The statistical basis of the new study was data from Russian and foreign analytical agencies, data from Rosstat and international statistical databases that characterize the processes of informatization and digitalization of the Russian and world economies, data on digital transformation strategies of the constituent entities of the Russian Federation, presented on the websites of the Government of Russia, federal and regional executive authorities. The study used methods of correlation-regression, cluster, structural and content analysis, as well as a systematic approach. The theoretical and methodological base was the work of Russian and foreign researchers, reports of world and Russian consulting agencies and research centers, legal documents of the Russian Federation and international organizations. **Results.** The role, meaning and functions of digitalization are systematized. A definition of digital transformation has been developed as a characteristic of a socio-economic system used to describe the goals, process and results of digital development, leading to a transformational change in the parameters of the control and managed systems, transferring systems to a qualitatively new level, which manifests itself in a radical change in the business model, business processes, products and services. Regional disproportions in the digital development of the constituent entities of the Russian Federation are diagnosed. The problematic fields of digital transformation of the subjects of the Russian Federation are identified in the context of 4 components – their functional, structural, informational and resource description as SES. **Conclusion.** The developed concept of digital transformation is based on the system paradigm and can be used to develop a set of methods, models, indicators and indicators for the digital development of socio-economic systems. The developed complex of problematic fields of digital transformation of the subjects of the Russian Federation as SES can be used to develop management decision support systems, activate the digital development of the subjects of the Russian Federation, increase its effectiveness, efficiency and sustainability.

Keywords: digitalization, digital transformation, digital economy, digital development, digitalization of public administration

For citation: Loginovskiy O.V., Lyaskovskaya E.A., Gabdulin R.R. Problems of digital transformation of the subjects of the Russian Federation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3):76–92. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230307

Введение

Беспрецедентные темпы развития цифровых технологий сделали категорию «цифровая трансформация» актуальным направлением исследований в области управления информационными технологиями и стратегического развития. Цифровые технологии, став ключевым фактором конкурентного успеха в современном мире, изменили сферы экономики, управления и гражданского общества, преобразили направления и инструменты развития. Согласно прогнозам ана-

литических агентств [1] в ближайшее время половина всех инвестиций в ИТ-решения будет связана с цифровой трансформацией, а половина мировой экономики будет основываться на цифровых технологиях, так как для обеспечения конкурентоспособности продукты, услуги, процессы и организации должны будут основываться на цифровых бизнес-моделях.

Воздействие цифровизации на все сферы общественной жизни, усиленное глобализацией и обострением конкурентной борьбы за цифровые ресурсы и технологии, являющимися основными определителями стратегической устойчивости и эффективности на внутреннем и внешних рынках, привело к появлению «новой формы территориальных социально-экономических систем» – цифровой экономики [2–10].

Нормативное определение цифровой экономики характеризует «деятельность по созданию, распространению и использованию цифровых технологий и связанных с ними продуктов и услуг; цифровые технологии – технологии сбора, хранения, обработки, поиска, передачи и представления данных в электронном виде» [9]. Основой цифровой экономики являются создание, передача, хранение и использование данных, внедрение цифровых технологий для создания, передачи и удержания ценности и внедрения новых бизнес-моделей [11–14].

Отталкиваясь от анализа динамики и линии трендов объёмов мировых данных, созданных, собранных, скопированных и потребленных во всем мире (рис. 1), а также темпов изменения корпоративных расходов на облако и центры обработки данных (рис. 2) [13], можно сделать вывод о востребованности исследований, посвящённых цифровизации и цифровой трансформации.

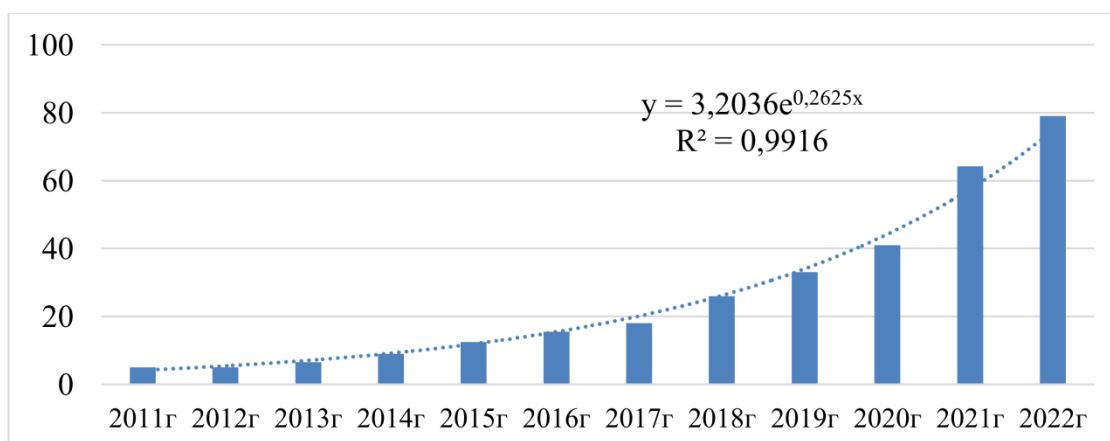


Рис. 1. Динамика и линия тренда объема данных / информации, созданных, собранных, скопированных и потребленных во всем мире, зеттабайт
Fig. 1. Dynamics and trend line of the amount of data / information created, collected, copied and consumed worldwide, zettabytes

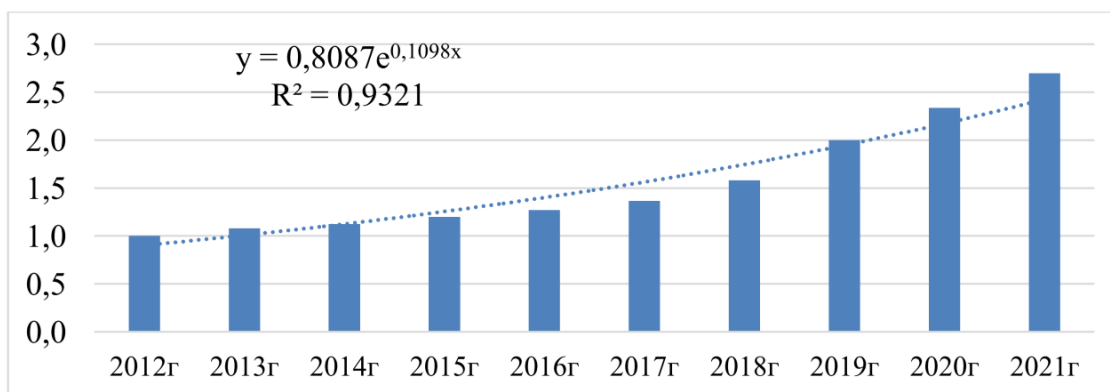


Рис. 2. Динамика и линия тренда темпов изменения корпоративных расходов на облако и центры обработки данных, млрд долл. США
Fig. 2. Dynamics and trend line of the rate of change in corporate spending on the cloud and data centers, billion US dollars

Цифровая трансформация РФ в системе национальных целей развития

Необходимость разработки информационно-аналитического и методического обеспечения управления цифровым развитием и цифровой трансформацией субъектов РФ определяется позициями страны в цифровых рейтингах. Так, в мировом рейтинге цифровой конкурентоспособности (World Digital Competitiveness Ranking), разрабатываемом IMD [14] путем обработки пятидесяти критериев по трем направлениям: знания (нематериальная инфраструктура, необходимая для изучения и открытия технологий), технологии (общая ситуация, обеспечивающая развитие цифровых технологий) и готовность к будущему (уровень и готовность экономики страны к цифровой трансформации), в 2021 году Россия занимала только сорок второе место (рис. 3–6). При этом по направлению «Знания» у России двадцать четвертая позиция, по направлению «Готовность к будущему» – сорок седьмая, а по направлению «Технологии» – только сорок восьмая позиция.

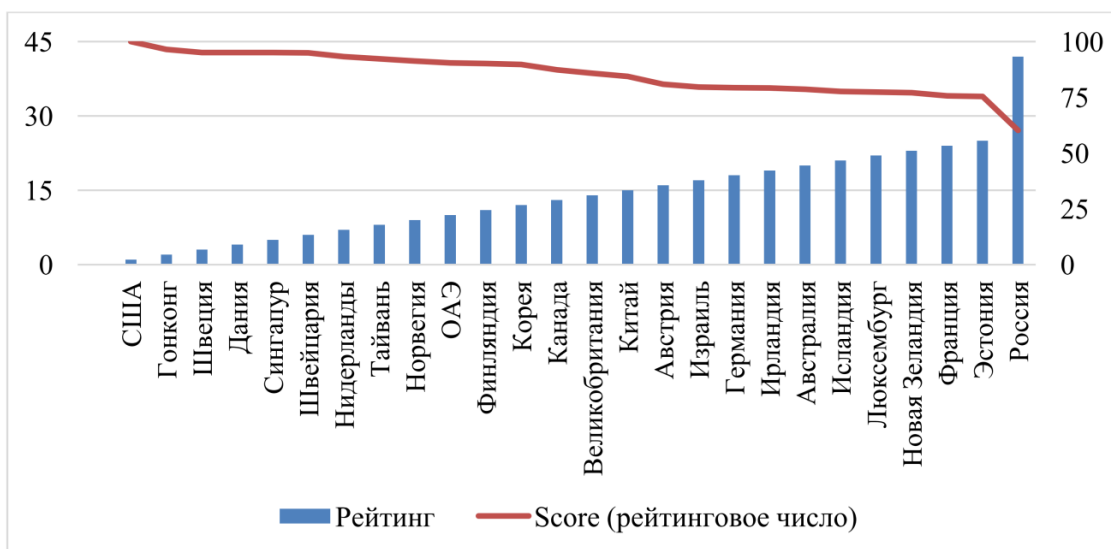


Рис. 3. Мировой рейтинг цифровой конкурентоспособности стран 2021 года (выборка стран)

Fig. 3. World Digital Competitiveness Ranking 2021 (sample of countries)

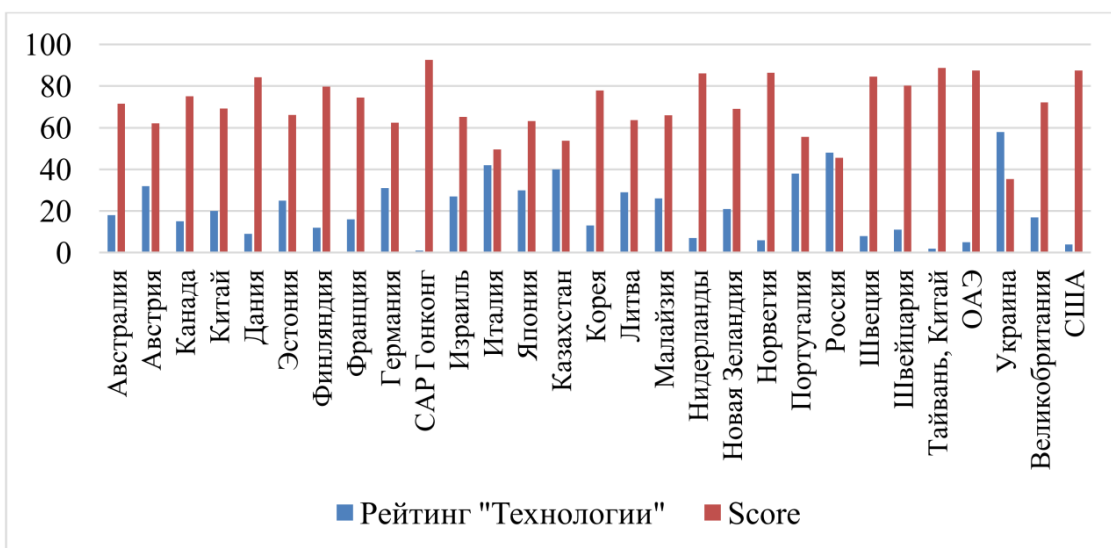


Рис. 4. Мировой рейтинг цифровой конкурентоспособности стран 2021 года по направлению «Технологии» (выборка стран)

Fig. 4. World Digital Competitiveness Ranking 2021 in Technology (sample of countries)

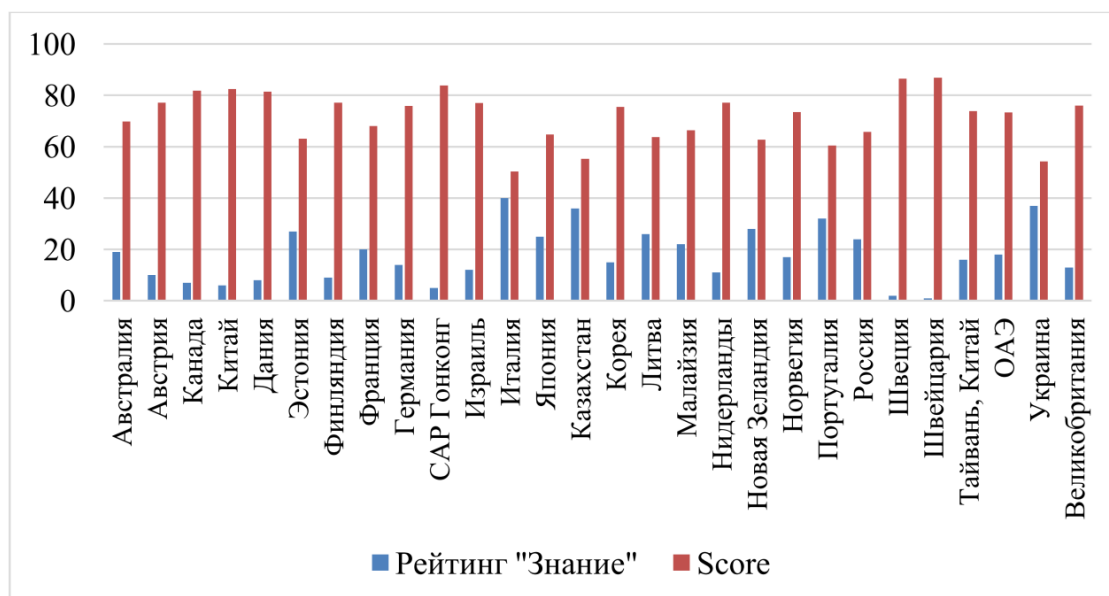


Рис. 5. Мировой рейтинг цифровой конкурентоспособности стран 2021 года по направлению «Знание» (выборка стран)
Fig. 5. World Digital Competitiveness Ranking 2021 in Knowledge (sample of countries)

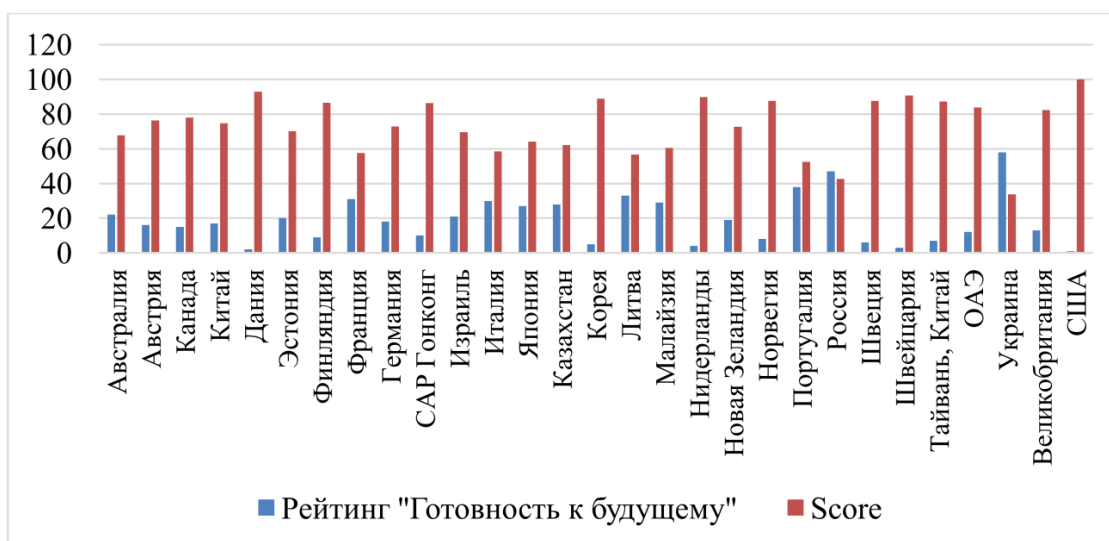


Рис. 6. Мировой рейтинг цифровой конкурентоспособности стран 2021 года по направлению «Готовность к будущему» (выборка стран)
Fig. 6. World Digital Competitiveness Ranking 2021 in Ready for the future (sample of countries)

В этой связи управление цифровым развитием и цифровой трансформацией социально-экономических систем (перевод «знаний» в «цифровое лидерство» посредством «технологий» для обеспечения «будущего» страны) становится своеобразным национальным «вызовом» или «мета-целью». От достижения этой цели также зависит национальная безопасность, а механизмы ее достижения связаны с обеспечением цифровой трансформации на уровне субъектов РФ, так как в силу федеративного устройства, социально-экономических, природно-географических, ресурсно-технологических и других особенностей регионы страны характеризуются значительной дифференциацией по уровням цифровой зрелости, по развитию цифровой экономики, состоянию цифрового потенциала и инфраструктуры.

Указом Президента Российской Федерации № 474 от 21.07.2020 вводится понятие цифровой трансформации как одной из национальных целей РФ и определяются целевые показатели, кото-

рые должны быть достигнуты к 2030 году [15]. Целевые показатели национальной цели развития «Цифровая трансформация» (рис. 7) затрагивают программные и операционные аспекты, согласуются с направлениями «инфраструктура», «управление», «регулирование», «бизнес» и «люди», затрагиваемыми в программных документах международных организаций [15–17].

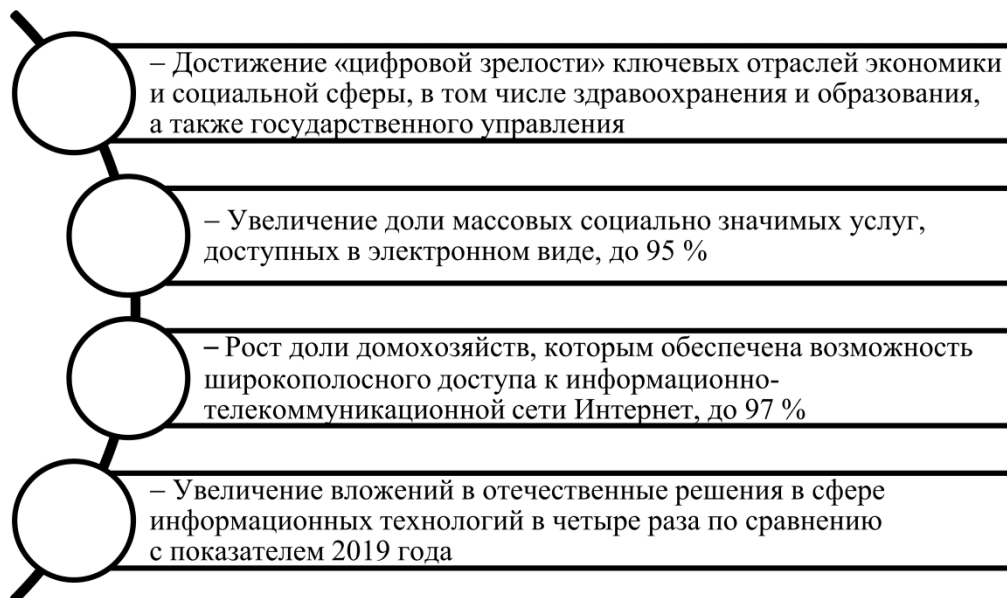


Рис. 7. Целевые показатели национальной цели развития «Цифровая трансформация»
Fig. 7. Target indicators of the national development goal “Digital Transformation”

Цифровая трансформация социально-экономических систем

Внедрение цифровых технологий в социально-экономические системы (СЭС) различных уровней проходит ряд этапов (рис. 8), при формулировке которых мы использовали определения, разработанные американской исследовательской и консалтинговой компанией Gartner, специализирующейся на ИТ-рынках и известной «введением» терминов «Цикл хайпа», «Модель зрелости цифрового правительства» и др. [18]. Подчеркнем, что в настоящее время отсутствуют однозначные, концептуально ясные определения терминов «цифровизация», «цифровая трансформация», «цифровое развитие». Наиболее часто как исследователи, так и практики используют термин «цифровизация», под которым также понимают и оцифровку, и цифровую трансформацию. В широком смысле цифровизация рассматривается как процесс внедрения цифровых технологий и бизнес-моделей во все социально-экономические сферы, включая управление [2–9].



Рис. 8. Этапы использования цифровых технологий
Fig. 8. Stages of using digital technologies

Согласившись с [12], отметим, что «нечеткая терминология, смешение концепции и ее воздействия среди прочих проблем препятствуют концептуальной ясности». Кроме того, невозможно разработать механизмы и системы управления цифровым развитием, не имея в основе однозначных определений. Направление решения ситуации, на наш взгляд, состоит в использовании обобщенной системной парадигмы Я. Корнаи [19]. Субъекты РФ являются открытыми динамическими социально-экономическими системами (СЭС), функционирующими в открытой нестабильной динамичной среде. Социально-экономическая система – это «относительно устойчивая во времени и пространстве часть окружающего мира, обладающая на данном уровне наблюдения свойствами внешнего единства, внутреннего многообразия и гносеологической целостности», которая участвует в процессах «производства и потребления, распределения и обмена экономическими благами», а ее главным элементом «являются люди, взаимодействия, отношения и связи между ними» [19, 20].

Цели цифровой трансформации СЭС разных уровней приведены в табл. 1 [1, 3–12, 15, 18, 21–24]. По результатам анализа понятийного аппарата можно сделать следующие выводы. Понятие цифровой трансформации в корпоративном, государственном и региональном управлении используется для описания *целей и процесса управления, его результатов, состояния управляющей и управляемой систем*. При этом главной целью цифровизации государственного, регионального и муниципального управления является *создание эффективных систем управления*, в основе которых лежат цифровые технологии и использование данных для обеспечения устойчивого развития объектов управления.

Цели цифровой трансформации на разных уровнях

Таблица 1

Goals of digital transformation at different levels

Table 1

№	Объект ЦТ	Цели цифровой трансформации
1	Государственное управление	Эффективное регулирование, контроль и управление, исполнение функций и предоставление государственных услуг
2	Отрасль	Создание цифровых экосистем и управление изменениями
3	Региональное управление	Обеспечение эффективности и цифровой зрелости, создание региональной цифровой экосистемы, обеспечивающей устойчивое развитие субъекта РФ.
4	Региональные органы исполнительной власти	Достижение показателей проекта «Цифровая трансформация» на региональном уровне
5	Организации	Повышение конкурентоспособности, устойчивости, эффективности и результативности бизнеса за счёт внедрения цифровых технологий в процессах создания, удержания и доставки ценности

Мета-целью цифровой трансформации СЭС выступает такое изменение параметров системы управления (эффективности, скорости, адаптивности) и характеристик объектов управления, которое является *трансформационным* – переводит СЭС на качественно новый уровень развития, ведет к радикальному изменению бизнес-модели, бизнес-процессов, выпускаемых продуктов и оказываемых услуг. Внешними (цифровыми) показателями этих процессов являются уровни цифровой зрелости организаций, бизнеса, отраслей экономики и социальной сферы; технико-экономическими показателями – результативность, эффективность, клиентоцентричность, экологичность, качество, надежность, временные параметры и т. д.

С учетом вышесказанного мы предлагаем следующее определение понятия. *Цифровая трансформация* – это характеристика социально-экономической системы, используемая для описания целей, процесса и результатов цифрового развития, приводящего к *трансформационному изменению* параметров управляющей и управляемой систем, переводу их на качественно новый уровень развития, проявляющийся в радикальном изменении бизнес-модели, бизнес-процессов, выпускаемых продуктов и оказываемых услуг.

Цифровая трансформация в государственном управлении

Для описания цифровой трансформации в государственном секторе также используется термин «трансформационное правительство» (T-government), который рассматривается как второй этап электронного правительства, где «трансформация, осуществляемая цифровыми технологиями, включает организационные и социально-технические аспекты и изменения структур, операций и культуры правительства в отличие от простого внедрения оцифрованных процедур». Также используется термин «цифровая трансформация правительства». Поскольку впервые термин «цифровая трансформация» – DGT (от англ. digital transformation) использовался в бизнесе, то DGT и t-government являются эволюцией «простого использования цифровых технологий», так как DGT «фокусируется на цифровых технологиях, приводящих к изменениям в организациях», «отражает сложность разрушительного воздействия цифровых технологий на людей, организации и общество» [2, 4, 11, 12, 24].

Движущей силой цифрового развития сегодня является *SMACIT концепция* (от англ. social, mobile, analytics and cloud), согласно которой главные основы цифровизации – это социальные, мобильные, аналитические, облачные технологии и технологии Интернета вещей, позволяющие перейти от электронного бизнеса и управления к цифровому [11, 25, 26]. Направления и инициативы цифровой трансформации на уровне государства достаточно разнообразны, к ним относят развитие электронного правительства и цифровой экономики, умных городов и цифрового общества, основанные на создании новых цифровых структур – цифровых экосистем, платформ порталов, систем, сервисов и суперсервисов. Все они направлены на обеспечение устойчивого развития, повышения качества и уровня жизни населения. Выделяют четыре этапа трансформация системы государственного управления (табл. 2) [4, 9, 11, 12, 28].

Таблица 2

Трансформация системы государственного управления

Table 2

Transformation of the public administration system

№	Период	Этап эволюции	Характеристика
1	1980–1990	Административная реформа	Использование прикладных и локальных компьютерных решений
2	1990–2000	E-Government (Электронное правительство)	Использование выделенных серверов и услуги в режиме онлайн
3	2000–2010	Open Government (Открытое правительство)	Облачные технологии, дата-центры, открытые данные
4	2010–2023	Smart Government (Умное правительство)	Самообучающиеся нейрокompьютерные системы, Big Data

Рассматривая термин «цифровое правительство», необходимо отметить, что оно используется в широком и узком планах. В широком плане оно используется как характеристика использования цифровых технологий для улучшения предоставления государственных услуг и повышения эффективности взаимодействия между гражданами и правительством, включающих онлайн-порталы для доступа к государственным услугам, цифровые каналы связи, использование аналитики больших данных для обоснования политических решений. В узком плане цифровое правительство используется как характеристика одного из этапов цифровой трансформации госуправления. Выделяют этапы цифровой трансформации (табл. 3) государственного управления, характеризующиеся моделью управления, показателями результативности и получаемыми эффектами. Государства и регионы, внедряющие технологии второго и третьего этапов цифровой трансформации, повышают показатели социального и экономического развития, качество социальных и экономических благ, снижают эксплуатационные затраты, уровень преступности и потерь продукции, а также бюджетные расходы. Инициативы цифрового правительства способствуют повышению эффективности, сокращению расходов, росту прозрачности, улучшению коммуникаций, оперативному получению обратной связи [2, 4, 9, 22, 25, 27, 28].

Этапы цифровой трансформации госуправления

Table 3

Stages of digital transformation of public administration

Этап	Характеристика	Индикаторы	Результаты
<i>Первый</i> Электронное правительство	Модель управления, характеризующаяся развитием электронных государственных услуг и эффективным использованием информации в системе управления	Удельный вес электронных государственных услуг. Удельный вес открытых данных в электронных ресурсах	Электронные коммуникации приводят к снижению издержек для граждан, бизнеса и органов государственной и региональной власти
<i>Второй</i> Государственное и региональное управление на основе данных в режиме реального времени	Модель управления, характеризующаяся совместным использованием данных через интегральные цифровые системы	Удельный вес данных, доступных для анализа в режиме реального времени. Удельный вес автоматически получаемых данных	Интегральные цифровые системы реального времени повышают оперативность, надежность и качество управленческих решений
<i>Третий</i> Цифровое государственное и региональное управление	Модель управления, характеризующаяся воздействием цифровой среды на реальный мир посредством цифровых систем и устройств	Удельный вес цифровых инфраструктурных процессов органов власти. Удельный вес данных, на которые можно воздействовать в режиме реального времени	Оптимизация бюджетных расходов, увеличение объективности управления на основе использования актуальных данных

Цифровая трансформация субъектов РФ

В 2021 году «Президентом РФ было поручено главам субъектов разработать и утвердить региональные стратегии цифровой трансформации (РСЦТ) «ключевых отраслей экономики, социальной сферы, государственного управления». Общие принципы разработки региональных стратегий предполагали учёт регионами федеральных индикаторов и приоритетов по следующим направлениям: «государственное управление», «образование и наука», «здравоохранение», «транспорт и логистика», «развитие городской среды», «социальная сфера». Опционально – «промышленность», «сельское хозяйство», «экология и природопользование», «строительство», «энергетическая инфраструктура», «финансовые услуги». Предполагалось, что «регион участвует в реализации проекта за счёт федерального бюджета, но интеграция решения регионального уровня с решением федерального уровня осуществляется за счёт собственных средств региона. Участие регионов в проектах с целью создания отсутствующих цифровых решений должно было проходить также за счет собственных средств. Самыми важными направлениями являлись цифровизация госуслуг и переход субъекта на надежную и современную ИТ-инфраструктуру». В 2022 году РСЦТ были актуализированы с учетом рекомендаций ФОИВ уделить большее внимание кадровым вопросам и проблемам безопасности [16, 24, 29–32].

Для выявления проблем цифровой трансформации субъектов РФ были проанализированы РСЦТ 84 субъектов РФ, разработанные в 2021 и 2022 годах.

Общее количество региональных направлений цифровой трансформации по всем субъектам РФ в 2021 году (за исключением 6 базовых/рекомендуемых) составило 318 направлений, в 2022 – 541 направление. Субъектом – лидером по числу направлений цифровой трансформации выступила Сахалинская область – 13 и 14 направлений в 2021 и 2022 годах соответственно (без учёта 6 обязательных направлений) (рис. 9).

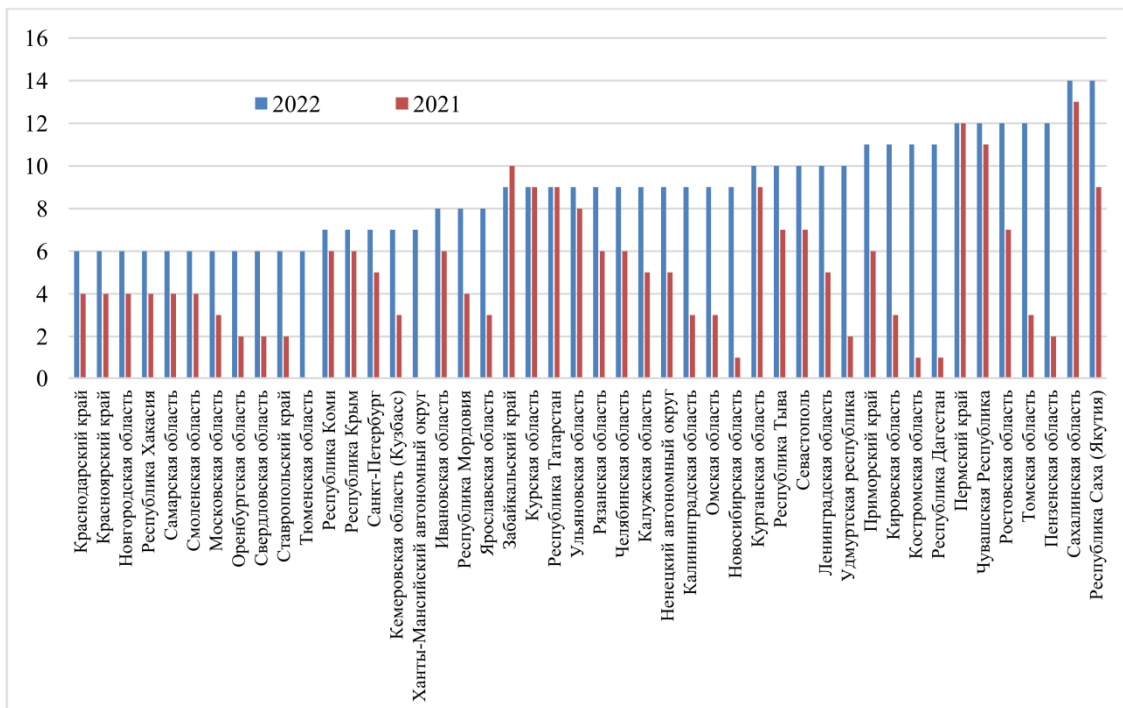


Рис. 9. Сравнительный анализ количества необязательных направлений цифровой трансформации субъектов РФ в 2021 и 2022 гг., ед.

Fig. 9. Comparative analysis of the number of optional areas of digital transformation of the constituent entities of the Russian Federation in 2021 and 2022, units

Анализ структуры направлений ЦТ в регионах показал, что самым значимым для субъектов РФ является производственное направление: промышленность – его включили 66 субъектов в 2021 году и 68 субъектов – в 2022 году, строительство (37 и 61), сельское хозяйство (42 и 47), а также экология и природопользование (52 и 66). Соответственно, наибольшими изменениями за год характеризуются непроизводственные направления – безопасность, строительство, культура и спорт (рис. 10).

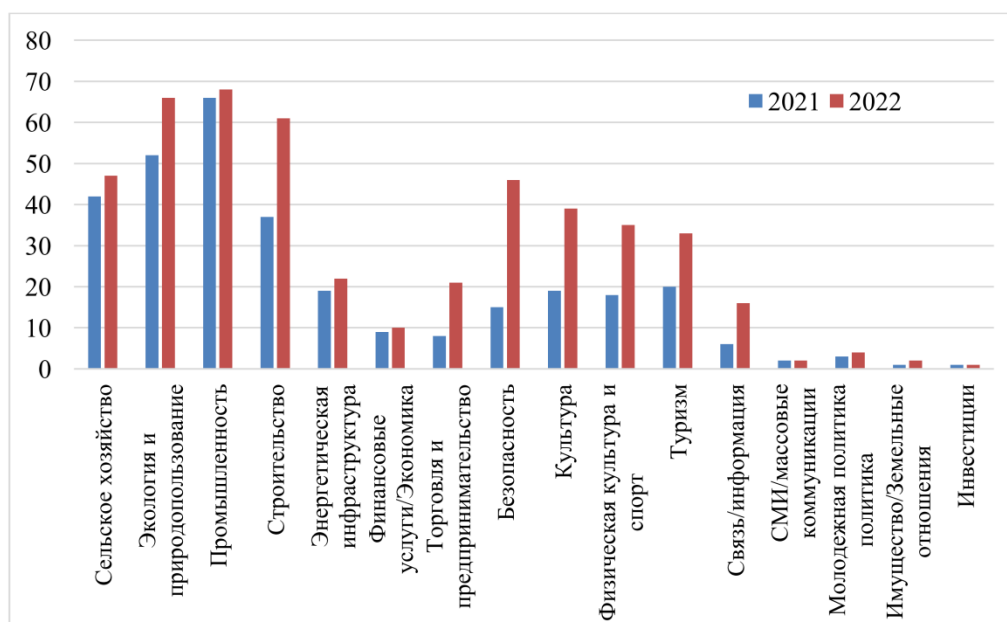


Рис. 10. Сравнительный анализ количества необязательных проектов цифровой трансформации субъектов РФ в 2021 и 2022 гг., ед.

Fig. 10. Comparative analysis of the number of optional projects of digital transformation of the constituent entities of the Russian Federation in 2021 and 2022, units

Значительная вариация количества проектов и направлений цифровой трансформации в региональных стратегиях свидетельствует о значительной региональной дифференциации субъектов РФ по уровням цифрового развития и цифровой зрелости.

Проблемы цифровой трансформации субъектов РФ

По результатам проведенного контент-анализа и результатов реализации РСЦТ, работ российских исследователей и отчетов аналитических агентств [2, 4–8, 15, 16, 25] определены проблемные поля цифровой трансформации субъектов РФ в контексте четырех составляющих – функционального, структурного, информационного и ресурсного описания СЭС (табл. 4). При выделении направлений использован подход Г.Б. Клейнера к системной организации экономики [20].

Таблица 4

Проблемы цифровой трансформации субъектов РФ как социально-экономических систем

Table 4

Problems of digital transformation of subjects of the Russian Federation as socio-economic systems

Составляющая	Содержание
Функциональное описание / характеристики	<i>Определение функций, которые СЭС выполняет в окружающем мире Определение функций отдельных подсистем СЭС</i>
1	Недостаточный учёт профилей регионов (производственный, аграрный, аграрно-производственный и т. д.) при выборе проектов цифровой трансформации
2	Неполное соответствие целевых индикаторов в РСЦТ показателям федерального статистического наблюдения
3	Недостаточная согласованность целей и задач цифровой трансформации с проблемами социально-экономического развития регионов
4	Недостаточный учёт региональных социально-экономических и природно-климатических особенностей при постановке цели и задачи цифрового развития
5	Неполное соответствие индикаторов, характеризующих эффективность проектов, показателям социально-экономического развития субъектов
6	Недостаточный учёт региональной специфики и состояния региональных цифровых экосистем
7	Недостаточный учёт уровня цифровой включенности организаций региона
8	Недостаточный учёт уровня цифровой грамотности, цифровых навыков и цифровой вовлеченности населения
9	Недостаточный учёт текущего уровня цифровой зрелости отдельных отраслей и цифровой зрелости массовых социально значимых услуг и госуправления
Структурное описание / характеристики	<i>Разделение СЭС подсистемы и элементы Установление взаимоотношений и взаимосвязей Качественный и количественный анализ связей</i>
1	Ориентация на разработку архитектур электронного правительства, недостаточное внимание инструментам и моделям умного, датацентричного правительств
2	Недостаточное внимание к роли и проектам внедрения корпоративных информационно-аналитических систем (КИАС: ERP, CRM, SED)
3	Недостаточное решение проблем ИТ-импортозамещения на региональном уровне
4	Недостаточное внимание проблемам кибербезопасности
5	Недостаточное внимание проблемам киберэкологичности бизнеса
6	Недостаточное внимание к проблемам развития цифровых экосистем региона
7	Недостаточное внимание развитию цифровой инфраструктуры
8	Недостаточное внимание к организации риск-менеджмента в стратегиях цифровой трансформации
9	Недостаточно стимулирование бизнеса к внедрению и использованию цифровых технологий

Окончание табл. 4
Table 4 (end)

Составляющая		Содержание
Ресурсное описание / характеристики		<i>Ресурсы пространства (S), ресурсы времени (T) Способности к эффективному использованию пространства (I) Способности к эффективному использованию времени (A) Характеристики ценности, редкости, неимитируемости и незаменимости ресурсов</i>
1	Недостаточное финансирование, снижение бюджетных расходов на финансирование проектов цифровой трансформации	
2	Недостаточное кадровое обеспечение задач цифровой трансформации	
3	Недостаточная сформированность региональных цифровых платформ	
4	Несогласованность проектов, входящих в РСЦТ, с возможностями регионов по их реализации	
5	Недостаточный учёт проблем неравномерности территориального развития внутри субъектов	
6	Недостаточное организационное обеспечение при разработке стратегий цифровой трансформации	
7	Недостаточное развитие цифровой инфраструктуры, обеспечивающей «трехстороннюю связь между гражданами, бизнесом и органами власти в цифровой среде»	
8	Недостаточное использование сквозных цифровых технологий и методов управления на основе данных в проектах развития систем межведомственного электронного взаимодействия	
9	Недостаточное использование цифровых технологий, методов и инструментов для обработки данных РОИВ и принятия на их основе решений	
Информационное описание / характеристики		<i>Получение информации от внешней среды и подсистем Накопление и хранение, обращение информации в СЭС Формирование и трансляция отчетной, оперативной, директивной информации Отображение функциональной и структурной характеристик СЭС в контексте выработки управленческих решений</i>
1	Неточное использование понятийного аппарата в области цифровизации и цифровых технологий	
2	Недостаточное владение теоретическим и методическим инструментарием в области цифровизации государственного управления	
3	Отсутствие системного подхода к анализу результатов (показателей цифровой зрелости), необходимых для корректировки стратегии ЦТ	
4	Неразвитость систем коммуникации, построенных на «единичных взаимодействиях»	
5	Недостаточная вовлечённость отраслевых органов власти в процесс цифровой трансформации региона	
6	Недостаточный уровень межведомственного взаимодействия в процессе разработки стратегии цифровой трансформации региона	
7	Недостаточная согласованность действий по разработке и реализации РСЦТ между РОИВ и ФОИВ	
8	Разрозненность используемых РОИВ информационных систем, не позволяющая использовать в управлении актуальную информацию	
9	Недостаточная стандартизация при внедрении государственных информационных систем	
10	Отсутствие системности в проектах создания цифровых экосистем	
11	Административные и правовые барьеры в активизации региональных процессов цифровой трансформации	
12	Фрагментарность, отсутствие системного подхода при выборе направлений цифровой трансформации	
13	Недостаточное внимание к мировым наилучшим доступным практикам цифровизации государственного управления	

По результатам исследования проблем цифровой трансформации субъектов РФ можно сделать вывод, что значимая их часть связана с информационно-аналитическим обеспечением управления цифровой трансформацией. Только совместные согласованные усилия и действия

федеральных и региональных органов власти, объединений организаций, бизнеса, граждан и научного сообщества могут обеспечить устойчивое цифровое развитие страны, устранить региональные диспропорции между субъектами РФ, а также обеспечить достижение национальных целей.

Выводы

Необходимо констатировать, что рассмотрение проблем цифровой трансформации не могло не базироваться на результатах многолетних исследований в области управления органами государственной власти, промышленными предприятиями, организациями и иными организационными структурами. В последние годы результаты этих исследований приобретают все более важное значение, особенно для целей повышения эффективности управления в федеральных и региональных органах государственной власти, крупных промышленных предприятий и корпораций, а также других объектов хозяйственной деятельности.

Среди множества работ, посвященных вопросам управления в организационных системах, следует отметить несколько важных трудов отечественных и зарубежных ученых, которые, в сущности, явились провозвестниками исследований в области цифровой трансформации [33–43].

На сегодняшний день цифровизация является ключевым фактором устойчивого развития стран, регионов и организаций, гарантом национальной безопасности в долгосрочной перспективе. Цифровая трансформация, на наш взгляд, является одной из ключевых характеристик современной социально-экономической системы, используемой для описания целей, процесса и результатов цифрового развития, которое приводит к изменению параметров управляющей и управляемой систем, переводу их на качественно новый уровень, проявляющийся в радикальном изменении бизнес-модели и бизнес-процессов, характеристик выпускаемых продуктов и оказываемых услуг.

Стратегии цифровой трансформации государственного, корпоративного и частного секторов являются универсальным инструментом обеспечения конкурентоспособности и эффективности. Цифровые технологии представляют одновременно и возможности развития социально-экономических систем всех уровней, и угрозы для их существования. Характер этого влияния является функцией от состояния системы управления цифровым развитием. Совершенствование методического и информационно-аналитического обеспечения управления цифровым развитием и цифровой трансформацией организационных систем представляет собой актуальную научно-практическую задачу, без решения которой невозможно представить дальнейшее развитие управленческих процессов.

Список литературы

1. European Services Market Forecast 2021–2026. 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=EUR147902122> (дата обращения: 30.03.2023).
2. Абрамов В. И., Андреев В. Д. Проблемы и перспективы цифровой трансформации государственного и муниципального управления в регионе (на примере Кемеровской области) // *Ars Administrandi* (Искусство управления). 2022. Т. 14, № 4. С. 667–700. DOI: 10.17072/2218-9173-2022-4-667-700
3. Цифровая трансформация в России – 2020 [Электронный ресурс]. URL: https://komanda-a.pro/projects/dtr_2020 (дата обращения: 30.03.2023).
4. Аналитическое исследование «Цифровая трансформация отраслей на основе использования ГИС, ДЗЗ и БАС». 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://nti-aeronet.ru/> (дата обращения: 30.03.2023).
5. Аренков И.А., Салихова Я.Ю., Сайфутдинов А.А. Цифровая трансформация направлений исследований и цифровые риски // *Креативная экономика*. 2021. Т. 15, № 7. С. 2757–2776. DOI: 10.18334/ce.15.7.112414
6. Легостаева Н.И. Цифровая трансформация системы государственного управления: классификация цифровых акторов государственных структур // *Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки*. 2021. № 4. С. 155–165.
7. Мирошниченко М.А. Цифровая трансформация: российские приоритеты формирования цифровой экономики: моногр. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2021. 224 с.

8. Новикова Ж.С., Стеняшина Н.Л., Назмутдинова А.Р. Векторы социально-экономического развития региона в условиях цифровой трансформации // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. 2021. Т. 6, № 2 (20). С. 238–247. DOI: 10.21603/2500-3372-2021-6-2-238-247
9. Усова Н. В., Логинов М.П. К оценке цифровой зрелости управления муниципалитетом // Муниципалитет: экономика и управление. 2022. № 2 (39). С. 41–52. DOI: 10.22394/2304-3385-2021-4-41-52
10. Приказ Росстата от 29.03.2019 № 182 «Об утверждении методик расчета показателей для мониторинга целевых показателей национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 30.03.2023).
11. Digital government transformation: A structural equation modelling analysis of driving and impeding factors / L. Tangi, M. Janssen, M. Benedetti, G. Noci // International Journal of Information Management. 2021. Vol. 60. P. 102356. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2021.1023
12. Vial G. Understanding digital transformation: A review and a research agenda // The Journal of Strategic Information Systems. 2019. Vol. 28 (2). P. 118–144. DOI: 10.1016/j.jsis.2019.01.003
13. Расширение прав и возможностей людей с помощью данных [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/> (дата обращения: 30.03.2023).
14. IMD World Digital Competitiveness Ranking. 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.imd.org/centers/wcc/world-competitiveness-center/rankings/world-digital-competitiveness-ranking/> (дата обращения: 30.03.2023).
15. Указ Президента РФ от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726> (дата обращения: 30.03.2023).
16. Правительство Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/> (дата обращения: 30.03.2023).
17. Цифровая трансформация в России: итоги 2022 года и планы на 2023 год [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/article/1605871> (дата обращения: 30.03.2023).
18. Gartner Glossary information technology [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/en/chat/information-technology/glossary> (дата обращения: 30.03.2023).
19. Корнаи Я. Системная парадигма // Вопросы экономики. 2002. № 4. С. 4–22.
20. Клейнер Г.Б. Ресурсная теория системной организации экономики // Российский журнал менеджмента. 2011. № 3. С. 3–28.
21. Gong C., Ribiere V. Developing a unified definition of digital transformation // Technovation. 2021. Vol. 102. P. 102217. DOI: 10.1016/j.technovation.2020.102217
22. Цели ООН в области устойчивого развития [Электронный ресурс]. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 30.03.2023).
23. Экономический словарь [Электронный ресурс]. URL: <https://vocabulary.ru/> (дата обращения: 30.03.2023).
24. Ежедневное онлайн-издание D-russia.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://d-russia.ru/> (дата обращения: 30.03.2023).
25. Абрамов В.И., Андреев В.Д. Анализ стратегий цифровой трансформации регионов России в контексте достижения национальных целей // Вопросы государственного и муниципального управления. 2023. № 1. С. 89–119. DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119
26. SMAC (social, mobile, analytics and cloud). Available at: <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/SMAC-social-mobile-analytics-and-cloud> (accessed 30.03.2023).
27. Урманцев Ю.А. Общая теория систем: состояние, приложения и перспективы развития // Система, симметрия, гармония. М.: Мысль, 1988. С. 38–124.
28. UNDP Strategic Plan 2022–2025. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.undp.org/> (дата обращения: 30.03.2023).
29. Регионы России. Социально-экономические показатели [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 30.03.2023).
30. Официальные статистические показатели Единой межведомственной информационно-статистической системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: 30.03.2023).

31. Портал выбора технологий и поставщиков TAdviser [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 30.03.2023).
32. Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 30.03.2023).
33. Бир С. Кибернетика и управление производством. М.: Физматгиз, 1963. 275 с.
34. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами. М.: Кн. Дом «Либроком», 2009. 264 с.
35. Джонсон Р., Каст Ф., Розенцвейг Д. Системы и руководство. М.: Советское радио, 1971. 648 с.
36. Кондратьев Н.Д. Проблемы экономической динамики. М.: Экономика, 1989. 502 с.
37. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
38. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с.
39. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2012. 604 с.
40. Поршнева А.Г., Румянцева З.П., Саломатин Н.А. Управление организацией. М.: Инфра-М, 2005. 716 с.
41. Стратегический ответ России на вызовы нового века / под общ. ред. Л.И. Абалкина. М.: Экзамен, 2004. 608 с.
42. Управление: теория и практика / под ред. О.В. Логиновского. М.: Машиностроение, 2006–2011. Т. 1–5.
43. Хелд Д. Глобальные трансформации: Политика, экономика, культура. М.: Практикс, 2004. 576 с.

References

1. *European Services Market Forecast 2021–2026*. 2022. Available at: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=EUR147902122> (accessed 30.03.2023).
2. Abramov V.I., Andreev V.D. Problems and prospects of digital transformation of state and municipal governance in a region (the case of the Kemerovo region). *Ars Administrandi*. 2022;14(4):667–700. (In Russ.) DOI: 10.17072/2218-9173-2022-4-667-700
3. *Tsifrovaya transformatsiya v Rossii – 2020* [Digital transformation in Russia – 2020]. (In Russ.) Available at: https://komanda-a.pro/projects/dtr_2020 (accessed 30.03.2023).
4. *Analiticheskoe issledovanie “Tsifrovaya transformatsiya otrasley na osnove ispol'zovaniya GIS, DZZ i BAS”* [Analytical study “Digital transformation of industries based on the use of GIS, DZZ and BAS”]. 2022. (In Russ.) Available at: <https://nti-aeronet.ru/> (accessed 30.03.2023).
5. Salikhova Ya.Yu., Sayfutdinov A.A. Digital transformation: research trends and digital risks. *Journal of creative economy*. 2021;15(7):2757–2776. (In Russ.). DOI: 10.18334/ce.15.7.112414
6. Legostaeva N.I. Digital transformation of the public administration system: classification of digital actors of state structures. *PNRPU sociology and economics bulletin*. 2021;4:155–165. (In Russ.)
7. Miroshnichenko M.A. *Tsifrovaya transformatsiya: rossiyskie priority formirovaniya tsifrovoy ekonomiki: monogr.* [Digital transformation: Russian priorities for the formation of the digital economy: monograph]. Krasnodar: Kuban State University; 2021. 224 p. (In Russ.)
8. Novikova Zh.S., Stenyashina N.L., Nazmutdinova A.R. Vectors of socio-economic development of the region in the context of digital transformation. *Bulletin of Kemerovo state university. Series: Political, sociological and economic sciences*. 2021;6(2(20)):238–247. (In Russ.) DOI: 10.21603/2500-3372-2021-6-2-238-247
9. Usova N.V., Loginov M.P. Assessing digital maturity of municipal management. *Municipality: Economics and Management*. 2022;2(39):41–52. (In Russ.) DOI: 10.22394/2304-3385-2021-4-41-52
10. *Prikaz Rosstata ot 29.03.2019 № 182 “Ob utverzhdenii metodik rascheta pokazateley dlya monitoringa tselevykh pokazateley natsional'noy programmy “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii”* [Rosstat Order No. 182 dated March 29, 2019 “On Approval of Methods for Calculating Indicators for Monitoring Target Indicators of the National Program ‘Digital Economy of the Russian Federation’”]. (In Russ.) Available at: <http://www.consultant.ru/document> (accessed: 30.03.2023).

11. Tangi L., Janssen M., Benedetti M., Noci G. Digital government transformation: A structural equation modelling analysis of driving and impeding factors. *International Journal of Information Management*. 2021;60:102356. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2021.1023
12. Vial G. Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2019;28(2):118–144. DOI: 10.1016/j.jsis.2019.01.003
13. *Rasshirenie prav i vozmozhnostey lyudey s pomoshch'yu dannykh* [Empowering people with data]. (In Russ.) Available at: <https://www.statista.com/> (accessed 30.03.2023).
14. *IMD World Digital Competitiveness Ranking*. 2022. Available at: <https://www.imd.org/centers/wcc/world-competitiveness-center/rankings/world-digital-competitiveness-ranking/> (accessed 30.03.2023).
15. *Ukaz Prezidenta RF ot 21.07.2020 № 474 “O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda”* [Decree of the President of the Russian Federation No. 474 dated 21.07.2020 “On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030”]. (In Russ.) Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726> (accessed: 30.03.2023).
16. *Pravitel'stvo Rossiyskoy Federatsii* [Government of the Russian Federation]. (In Russ.) Available at: <http://government.ru/> (accessed: 30.03.2023).
17. *Tsifrovaya transformatsiya v Rossii: itogi 2022 goda i plany na 2023 god* [Digital transformation in Russia: results of 2022 and plans for 2023]. (In Russ.) Available at: <https://www.garant.ru/article/1605871> (accessed: 30.03.2023).
18. *Gartner Glossary information technology*. Available at: <https://www.gartner.com/en/chat/information-technology/glossary> (accessed 30.03.2023).
19. Kornai J. Systemic paradigm. *Issues of Economics*. 2002;4:4–22. (In Russ.)
20. Kleiner G.B. Resource theory of systemic organization of the economy. *Russian Journal of Management*. 2011;3:3–28. (In Russ.)
21. Gong C., Ribiere V. Developing a unified definition of digital transformation. *Technovation*. 2021;102:102217. DOI: 10.1016/j.technovation.2020.102217
22. *Tseli OON v oblasti ustoychivogo razvitiya* [UN Sustainable Development Goals]. (In Russ.) Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (accessed 30.03.2023).
23. *Ekonomicheskii slovar'* [Economic dictionary]. (In Russ.) Available at: <https://vocable.ru/> (accessed 30.03.2023).
24. *Ezhednevnoe onlayn-izdanie D-russia.ru* [Daily online publication D-russia.ru]. (In Russ.) Available at: <https://d-russia.ru/> (accessed 30.03.2023).
25. Abramov V.I., Andreev V.D. Analysis of strategies for digital transformation of Russian regions in the context of achieving national goals. *Public Administration Issues*. 2023;1:89–119. (In Russ.) DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119
26. *SMAC (social, mobile, analytics and cloud)*. Available at: <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/SMAC-social-mobile-analytics-and-cloud> (accessed 30.03.2023).
27. Urmantsev Yu.A. General Systems Theory: Status, Applications and Development Prospects. In: *System, Symmetry, Harmony*. Moscow: Mysl'; 1988. P. 38–124. (In Russ.)
28. *UNDP Strategic Plan 2022–2025*. 2021. Available at: <https://www.undp.org/> (accessed 30.03.2023).
29. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli* [Regions of Russia. Socio-economic indicators]. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (accessed 30.03.2023).
30. *Ofitsial'nye statisticheskie pokazateli Edinoi mezhvedomstvennoy informatsionno-statisticheskoy sistemy* [Official statistical indicators of the Unified Interdepartmental Information and Statistical System]. (In Russ.) Available at: <https://www.fedstat.ru/> (accessed 30.03.2023).
31. *Portal vybora tekhnologiy i postavshchikov TAdviser* [Portal for selecting technologies and suppliers TAdviser]. (In Russ.) Available at: <https://www.tadviser.ru/index.php> (accessed 30.03.2023).
32. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* [Federal State Statistics Service]. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed: 30.03.2023).
33. Bir S. *Kibernetika i upravlenie proizvodstvom* [Management cybernetics]. Moscow: Fizmatgiz; 1963. 275 p. (In Russ.)
34. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A. *Vvedenie v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Introduction to the theory of management of organizational systems]. Moscow: Librokom; 2009. 264 p. (In Russ.)

35. Dzhonson R., Kast F., Rozentsveyg D. *Sistemy i rukovodstvo* [The Theory and Management of Systems]. Moscow: Sovetskoe radio; 1971. 648 p. (In Russ.)
36. Kondrat'ev N.D. *Problemy ekonomicheskoy dinamiki* [Problems of economic dynamics]. Moscow: Ekonomika; 1989. 502 p. (In Russ.)
37. Loginovsky O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)
38. Loginovsky O.V., Gollai A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective management of organizational and production structures]. Moscow: Infra-M; 2020. 450 p. (In Russ.)
39. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: Publishing House of Physical and Mathematical Literature; 2012. 604 p. (In Russ.)
40. Porshnev A.G., Rumyantseva Z.P., Salomatin N.A. *Upravlenie organizatsiy* [Organization management]. Moscow: Infra-M; 2005. 716 p. (In Russ.)
41. Abalkin L.I. (Ed.). *Strategicheskiy otvet Rossii na vyzovy novogo veka* [Russia's strategic response to the challenges of the new century]. Moscow: Ekzamen; 2004. 608 p. (In Russ.)
42. Loginovsky O.V. (Ed.). *Upravlenie: teoriya i praktika* [Management: theory and practice]. Moscow: Mashinostroenie; 2006–2011. Vol. 1–5. (In Russ.)
43. Held D. *Global'nye transformatsii: Politika, ekonomika, kul'tura* [Global Transformations: Politics, Economics and Culture]. Moscow: Praxis; 2004. 576 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Лясковская Елена Александровна, д-р. экон. наук, доц., профессор кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; liaskovskaiaea@susu.ru.

Габдулин Рамиль Ринатович, канд. экон. наук, начальник отдела маркетинга, ООО «Производственная компания «Челябинский тракторный завод», Челябинск, Россия; nadsistema@yandex.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Elena A. Lyaskovskaya, Dr. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Prof. of the Department Digital Economy and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; liaskovskaiaea@susu.ru.

Ramil R. Gabdulin, Cand. Sci. (Econ.), Head of Marketing Department, Production Company “Chelyabinsk Tractor Plant” LLC, Chelyabinsk, Russia; nadsistema@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.03.2023

The article was submitted 31.03.2023

ВЫБОР БАЗОВЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

С.А. Баркалов¹, bsa610@yandex.ru

В.Н. Бурков², vlab17@bk.ru

П.Н. Курочка¹, kpn55@rambler.ru

Е.А. Серебрякова¹, sea-parish@mail.ru

¹ Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Цель исследования. Процесс развития предприятия предполагает реализацию последовательности проектов, каждый из которых имеет свой жизненный цикл. Одной из главных задач менеджмента предприятия является обеспечение условий для того, чтобы каждый из проектов начал окупаться. Учитывая тот факт, что современные проекты, как правило, имеют достаточно длительный срок реализации, следует признать, что решение о реализации проекта в полном объеме будет, наверное, не самым оптимальным. Как правило, в этом случае предпочитают разбивать проект на стадии или, как это принято в промышленном строительстве, на очереди. **Материалы и методы.** Приведена формальная постановка задач, определяющих: минимальное число базовых представителей, минимизацию сроков подготовки производства новых видов техники и минимизацию времени производства базовых представителей новой техники. Для случаев небольшой размерности задачи предлагается точный алгоритм, основанный на полном переборе вариантов. Для случая задач большой размерности предлагается композиционный алгоритм, заключающийся в разбиении всего множества изделий на несколько подмножеств, к каждому из которых применяется точный алгоритм. **Результаты.** В основу рассмотренных алгоритмов положена пороговая схема решения оптимизационной задачи, когда вводится пороговое значение времени создания одного из изделий, которое будет совпадать с одной из компонент вектора, задающего нормативное время создания каждого из изделий. В этом случае также могут быть использованы переборный и декомпозиционный алгоритмы. Отдельно рассмотрен случай решения данной задачи как задачи о частичном покрытии двудольного графа. Приведен алгоритм получения нижней оценки задачи на основе метода сетевого программирования. **Заключение.** Проведен анализ и разработана процедура выбора базовых изделий нового поколения техники, позволяющая в зависимости от условий, устанавливаемых лицом, принимающим решение (ЛПР), определить базовое изделие направления техники, наиболее полно соответствующее функциональным, конструктивным и технологическим признакам поколения техники.

Ключевые слова: жизненный цикл проекта, базовые представители направлений техники, переборный алгоритм, декомпозиционный алгоритм, задача о частичном покрытии двудольного графа, пороговая схема, правила останковки вычислений

Для цитирования: Выбор базовых представителей направления техники нового поколения / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 93–104. DOI: 10.14529/ctcr230308

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230308

SELECTION OF BASIC REPRESENTATIVES OF NEW GENERATION TECHNOLOGY

S.A. Barkalov¹, bsa610@yandex.ru
V.N. Burkov², vlab17@bk.ru
P.N. Kurochka¹, kpn55@rambler.ru
E.A. Serebryakova¹, sea-parish@mail.ru

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study. The process of enterprise development involves the implementation of a sequence of projects, each of which has its own life cycle. One of the main tasks of the company's management is to provide conditions for each of the projects to start paying off. Given the fact that modern projects, as a rule, have a fairly long implementation period, it should be recognized that the decision to implement the project in full will probably not be the most optimal. As a rule, in this case, they prefer to divide the project into stages or, as is customary in industrial construction, into queues. **Materials and methods.** The formal statement of the tasks defining: the minimum number of basic representatives, minimization of terms of preparation of production of new types of equipment and minimization of time of production of basic representatives of new equipment is given. For cases of small dimension of the problem, an exact algorithm based on a complete search of options is proposed. For the case of large-dimensional problems, a compositional algorithm is proposed, which consists in dividing the entire set of products into several subsets, to each of which an exact algorithm is applied. **Results.** The algorithms considered are based on a threshold scheme for solving an optimization problem, when a threshold value of the creation time of one of the products is introduced, which will coincide with one of the components of the vector that sets the standard creation time of each of the products. In this case, iterative and decomposition algorithms can also be used. The case of solving this problem as a problem of partial covering of a bipartite graph is considered separately. An algorithm for obtaining a lower estimate of the problem based on the network programming method is given. **Conclusion.** The analysis was carried out and the procedure for selecting the basic products of a new generation of equipment was developed, which allows, depending on the conditions set by the decision-maker (LPR), to determine the basic product of the technology direction that most fully corresponds to the functional, constructive and technological features of the generation of equipment.

Keywords: project life cycle, basic representatives of technical areas, enumeration algorithm, decomposition algorithm, bipartite graph partial covering problem, threshold scheme, calculation stop rules

For citation: Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Selection of basic representatives of new generation technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(3): 93–104. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230308

Введение

Рассматривая деятельность предприятия в динамике, следует отметить, что это приводит к выводу о последовательности реализуемых проектов, что и составляет основную цель существования любого предприятия. Но каждый проект имеет свой жизненный цикл, а это означает, что потребляемые в ходе реализации проекта ресурсы используются неравномерно. То есть может возникнуть ситуация, когда пики потребления ресурсов по отдельным проектам могут совпасть и превысить возможности предприятия в данный момент. Таких ситуаций можно избежать за счет обоснованного расположения различных стадий проекта по времени, что позволяет «разнести» возникающие максимумы по временной оси и тем самым избежать возникающего дефицита ресурсов. То есть возникает проблема управления продолжительностью жизненных циклов выполняемых проектов.

С другой стороны, жизненный цикл проекта, как правило, достаточно продолжителен и ручка от проекта будет поступать нескоро, что, естественно, сказывается на его эффективности.

Именно поэтому для руководителя проекта является ключевой проблемой ускорение процесса получения дохода. То есть сделать так, чтобы проект как можно быстрее начал окупаться. А для этого прежде всего необходимо еще на стадии планирования выделить возможные этапы реализации проекта, каждый из которых может иметь свой самостоятельный коммерческий интерес. Как, например, это делается при строительстве промышленных предприятий [1–3]. Для этого используется понятие пускового комплекса, представляющего часть объекта, который может эксплуатироваться и давать продукцию нужной номенклатуры с требуемым качеством с соблюдением всех технических и экологических требований. А в это время происходит дальнейшая работа по строительству всего объекта.

Распространяя понятие пускового комплекса на все многообразие проектов, приходим к понятию базовых представителей направлений техники.

1. Математическая модель

Процесс реализации конкретного проекта будет заключаться в последовательности действий по реализации базовых представителей направлений техники. Каждое представление будет характеризоваться набором новых свойств, что делает возможным отнесение этого образца к новой технике. Последующее поколение будет дополнено какими-то новыми свойствами с сохранением уже приобретенных, но эти свойства будут не столько кардинальными, чтобы выделить конкретное поколение в новый проект. То есть происходит ступенчатая модернизация первоначального, базового, образца.

Таким образом, возникает задача разбиения проекта на стадии, которые можно выделить в качестве базовых представителей направления техники. Такое разделение проекта на стадии должно удовлетворять определенным требованиям.

1. Необходимо выбрать минимальное число базовых представителей: с одной стороны, это позволит обеспечить необходимую концентрацию ресурсов, а с другой – ускорит процесс окупаемости всего проекта за счет ускоренного выпуска новой продукции на рынок. Большое же количество базовых представителей может сильно затруднить подготовку производства к началу выпуска новой продукции.

2. На базовых представителях необходимо будет отработать процессы подготовки производства к выпуску последующих поколений инноваций.

3. Процесс подготовки производства базовых представителей должен быть минимальным и учитывать возможность последующей модернизации изделия, то есть выпуск нового базового представительства.

Приведем математическую формулировку поставленной задачи. Допустим, реализуемый проект состоит из N изделий, которые будем идентифицировать индексом j .

Для формального описания задачи введем двоичную переменную x_j . В том случае если j -е изделие включается в множество базовых представителей, то $x_j = 1$, а если нет – то $x_j = 0$.

Кроме того, каждое изделие характеризуется определенными свойствами, задающимися в виде M показателей, которые будем обозначать индексом i ($i = 1, 2, \dots, M$). В том случае, когда изделие обладает данным свойством, значение показателя равно 1, а если нет – то 0.

Описание задачи должно учитывать требования 1–3, выдвигаемые к базовым представителям. Наиболее просто учитываются требования 1 и 3. Первое требование предполагает нахождение экстремума функции $F_1(x)$:

$$F_1(x) = \sum_{j=1}^N x_j, \quad (1)$$

а третье требование предполагает решение следующей оптимизационной задачи

$$F_2(x) = \max_{j=1, N} \{t_j x_j\}, \quad (2)$$

где A – булева матрица размером $M \times N$, составленная из элементов a_{ij} ; $a_{ij} = 1$, если j -е изделие обладает i -м свойством, и $a_{ij} = 0$ – в противном случае; t_j – j -я компонента вектора T , определяющая время создания j -го изделия.

То есть получили многокритериальную задачу оптимизации, решение которой сводится к нахождению компромиссного решения в двух задачах минимизации [4, 5]. Но в такой постановке

задача будет иметь тривиальное решение, а мы еще не учли второе ограничение. Учет этого ограничения приводит к задаче условной оптимизации, которая уже будет иметь решение.

Для этой цели зададим минимальное число $m \leq M$ свойств, которыми должны обладать базовые представители направления техники. Формализовать ограничение данного вида можно путем введения булевой переменной y_i , которая будет равно 1 в том случае, когда требуется, чтобы базовый представитель обладал этим свойством, и 0 – в противном случае.

Это дает возможность дополнить задачу (1)–(2) ограничениями вида

$$\sum_{j=1}^N x_j a_{ij} \geq y_i, \quad i = 1, M; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M y_i = m. \quad (4)$$

Следовательно, поставленная задача сводится к решению двухкритериальной задачи условной оптимизации, целевые функции которой задаются соотношениями (1), (2), ограничения – выражениями (3) и (4).

Решение поставленной задачи может быть построено в виде последовательного решения двух задач оптимизации:

Задача 1. Минимизировать функцию $F_1(x)$ при ограничениях (3) и (4).

Задача 2. Минимизировать функцию $F_2(x)$ при ограничениях (3) и (4) и дополнительном ограничении

$$\sum_{j=1}^n x_j = f(x^0), \quad (5)$$

где x^0 – оптимальное решение первой задачи.

2. Алгоритмы решения первой задачи

Сложность решения сформулированных выше задач заключается в том, что они относятся к классу NP -полной [6, 7], а это означает, что построение точного алгоритма, имеющего полиномиальную трудоемкость, не представляется возможным. Доказательством этого факта может служить то, что в том случае если в первой задаче принять условие $m = M$, то мы переходим к известной задаче о покрытии множества [8, 9], для которой доказано утверждение о ее NP -полноте.

Для решения оптимизационной задачи (1), (3), (4) предлагается два алгоритма: первый алгоритм основан на процедуре прямого перебора, что, как известно, позволяет получить точное решение. Трудоемкость алгоритма, как и всех алгоритмов переборного типа [10–13], – степенная.

Второй алгоритм является декомпозиционным, использующим возможности первого алгоритма.

Рассмотрим особенности этих алгоритмов, при этом получаемое в результате применения алгоритма решение задачи обозначим, как выше уже указывалось, через x^0 .

Основная идея переборного алгоритма заключается в том, чтобы из имеющейся последовательности изделий, составляющих направление техники нового поколения, перебрать все возможные варианты, образующие подмножества из исходного множества изделий. Это может быть выполнено при помощи процедуры $P(l, L)$, осуществляющей формирование подмножеств мощностью l из множества мощностью L .

Результатом работы данной процедуры будет являться подмножество, элементы которого расположены по возрастанию и представлены в нормальной форме. Возникает закономерный вопрос о том, как определить, что i -е подмножество мощностью l будет меньше подмножества $(i+1)$. В этом случае используется следующая процедура: два подмножества $(i_1^l, i_2^l, \dots, i_l^l)$ и $(i_1^{l+1}, i_2^{l+1}, \dots, i_l^{l+1})$ находятся в отношении \geq в том случае, когда можно найти такое значение q_0 ($0 \leq q_0 \leq l$), для которого будет выполняться соотношение $i_{q_0+1}^l > i_{q_0+1}^{l+1}$.

Модуль $P(l, L)$ на каждой итерации осуществляет генерацию подмножеств, строя таким образом общее количество вариантов решения. Следовательно, данная процедура осуществляет построение очередного варианта сочетаний.

Таким образом, выстраивается следующий алгоритм формирования возможного варианта решения поставленной задачи.

Шаг 0. Находим количество индексов i , для которых выполняется условие

$$\sum_{j=1}^N a(i, j) \geq 1. \quad (6)$$

Если обозначить это число через m' , то возможны следующие варианты:

$m' < m$ – тогда процесс вычислений прекращается, так как в этом случае рассматриваемая задача не будет иметь решения;

$m' \geq m$ – в этом случае процесс решения продолжается.

Шаг 1. Принимаем новое значение для переменной n : $n = N + 1$.

Шаг 2. Устанавливаются новые параметры для модуля $P(m, M)$.

Шаг 3. Выполняется следующая итерация по созданию очередного варианта решения рассматриваемой задачи. В данном случае возможны два варианта:

– создается очередное подмножество возможного решения; в этом случае осуществляется переход к следующему шагу алгоритма;

– очередное подмножество не может быть создано, так как все комбинации уже рассмотрены; в этом случае осуществляется переход к шагу 8.

Шаг 4. Проверяем выполнение условия $n \geq 1$:

– если оно выполняется, то устанавливаем новое значение $n = n - 1$ и выполняем переход к следующему шагу;

– если условие $n \geq 1$ не выполняется, то происходит переход к шагу 8.

Шаг 5. Рассматривается следующий вариант генерации подмножеств, когда модуль выполняется со следующими параметрами $P(n, N)$.

Шаг 6. Выполнение модуля $P(n, N)$ при заданных параметрах. При этом возможны два варианта:

– создается очередное подмножество возможного решения; в этом случае осуществляется переход к следующему шагу алгоритма;

– очередное подмножество не может быть создано, так как все комбинации уже рассмотрены; в этом случае изменяем значение n на единицу, то есть $n = n + 1$ и переходим к шагу 3.

Шаг 7. Осуществляем проверку выполнения условий (следует напомнить, что таких условий будет l):

$$\sum_{l=1}^n a(i_k, j_l) \geq l, \quad n = 1, l. \quad (7)$$

В том случае, когда все l условий будут выполняться, происходит переход к шагу 4; если же хотя бы одно условие не выполняется, то переходим к шагу 6.

Шаг 8. Окончание работы алгоритма и формирование решения, определяющего количество базовых представителей поколения техники.

Трудоемкость рассматриваемого алгоритма при решении задачи 1 составит

$$V = 2^N \left(\frac{M}{m} \right) \quad (8)$$

операций. Именно поэтому рассматриваемый алгоритм применим в случае относительно невысокой размерности задачи, когда будет выполняться следующее условие N, m или разность $(M - m) \sim 10 \dots 30$.

В том случае, когда переборный алгоритм не позволяет получить решение за приемлемое время, предлагается использовать приближенный алгоритм, получивший название декомпозиционного.

3. Приближенный алгоритм

Основная идея декомпозиционного алгоритма заключается в том, чтобы свести решение исходной задачи большой размерности к решению последовательности задач более малой размерности, позволяющих применить переборный алгоритм.

Такие задачи малой размерности формируются из исходной по следующим правилам: задача малой размерности получается за счет формирования на базе исходных множеств $I_M = \{1, 2, \dots, M\}$ и $J_N = \{1, 2, \dots, N\}$, подмножеств I', Y' и $m' \leq m$. В этом случае требуется решить задачу меньшей размерности $D(I', J', m')$ с ограничениями:

$$\sum_{j \in Y'} x_j a_{ij} \geq y_i, \sum_{i \in I'} y_i = m; (J_1, J_2, \dots, J_k). \quad (9)$$

Данные ограничения используются вместо соотношений (3), (4) исходной задачи.

Так как декомпозиционный алгоритм предполагает итерационное решение задач меньшей размерности, то при его описании будем использовать понятие этапа решения, а каждый этап может быть разбит на шаги. Описываемый алгоритм насчитывает 6 этапов.

Этап 1. Выбор значений k и n_0 из множества целых чисел.

Этап 2. Формирование на базе множества M_N непустых подмножеств (J_1, J_2, \dots, J_k) . Таких подмножеств должно быть сформировано k , причем их мощность не должна превышать величины n_k .

Этап 3. Аналогично разбиваем и множество I_M , но в данном случае возможно появление и пустых подмножеств.

Этап 4. Находим целые числа m_e , которые удовлетворяют следующим условиям:

$$0 \leq m_e \leq |I_e|, e = 1, k; \quad (10)$$

$$\sum_{e=1}^k m_e = m. \quad (11)$$

Этап 5. Полученное множество задач меньшей размерности $D(I_e, J_e, m_e)$ решается при помощи точного алгоритма, основанного на процедуре полного перебора.

Этап 6. Формирование окончательного решения поставленной задачи на базе объединения полученных решений задач меньшей размерности. При этом полученное решение может быть скорректировано путем исключения из него некоторых элементов.

Приведем описание этих этапов.

Этап 1. Сгенерированные задачи меньшей размерности $D(I_k, J_k, m_k)$ для случаев, когда множество I_k не является пустым, решаются на этапе 5 при помощи алгоритма полного перебора. Поэтому будет целесообразно ввести ограничение на мощность множества J_k . Мощность данного множества подбирается, исходя из условий решаемой задачи. Обозначив эту величину через n_0 , следует признать, что целесообразной величиной n_0 будет являться величина $n_0 = 20 \dots 50$. Зная n_0 , можно найти и величину k из следующего соотношения

$$k = [N/n_0] + 1, \quad (12)$$

где $[x]$ – целая часть произвольного действительного числа x .

Этап 2. Заключается в формировании массива данных, характеризующих попарно элементы, определяющие, какие показатели должны быть реализованы при совместном производстве двух изделий. Эту величину обозначим через $b_{j_1 j_2}$ и назовем величиной связи каждой пары элементов. Данный критерий будет определяться следующим выражением

$$b_{j_1 j_2} = \sum_{i=1}^M a_{ij_1} \times a_{ij_2}. \quad (13)$$

Критерий $b_{j_1 j_2}$ в (13) будет равен числу показателей, которые должны быть обеспечены в ходе организации совместного производства при выпуске изделий j_1, j_2 .

Понятно, что в целях обеспечения минимума целевой функции при решении задачи вида $D(I_k, J_k, m_k)$ целесообразно включать в решение элементы с наибольшими значениями попарных связей $b_{j_1 j_2}$. Это уточняющее положение было реализовано в следующем блоке. Приведем описание начального и общего шага в этом случае.

Шаг 0. В множестве изделий J_N , подлежащих отбору в качестве базовых представителей, выбирается k элементов с максимальной величиной попарных связей и образуются k подмножеств, мощность которых будет равна единице.

Общий шаг. Изучается возможность включения элементов, сформированных на нулевом ша-

ге подмножеств, в формируемое решение. При этом включаются в решение только в том случае, если будет удовлетворяться условие $|J_l| \neq n_0$, то есть мощность подмножества будет не равна n_0 . Для каждого варианта вычисляется оценка по следующему соотношению

$$c_1(j, J_l) = \min[b(j, j_1)], \quad j_1 \in J_l. \quad (14)$$

На данном шаге осуществляется выбор таких элементов, для которых параметр (14) будет максимален из всех сравниваемых на данном шаге величин. Выбранный элемент включается в анализируемое подмножество.

Это является завершающей операцией данного шага. Этап завершается тогда, когда все элементы, выделенные для распределения, уже распределены.

Этап 3. В качестве входных данных для этого этапа используются величины $c_2(i, k_1)$, которые определяются из выражения

$$c_2(i, k_1) = \sum_{j \in J_k} a_{ij}, \quad i = 1, M. \quad (15)$$

После этого осуществляются операции, состоящие в следующей последовательности действий.

Шаг 0. Все подмножества I_l ($l = 1, k$) будем предполагать пустыми, то есть выполняется соотношение вида $|I_l| = \emptyset$.

Шаг 1. Рассматриваемый элемент включается в подмножество I_l только в том случае, когда величина $c_2(i, l_1)$ принимает максимальное значение. Это выполняется для всех $i = 1, 2, \dots, M$.

В итоге выполнения этого шага получаем подмножество I_l , которое будет удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} I_{l_1} \cap I_{l_2} &= \emptyset, \quad l_1, l_2 = 1, M; \\ 0 \leq |J_l| &\leq M, \quad l = 1, M; \\ \sum_{l=1}^M |I_l| &= M. \end{aligned} \quad (16)$$

Адекватность соотношений (16) может быть проверена непосредственно.

Этап 4. В том случае, когда величины m'_e будут удовлетворять условиям (10), (11), но не будут являться целыми числами, они находятся из следующего выражения

$$m'_e = |I_e| \times m / \left(\sum_{l=1}^M |I_l| \right). \quad (17)$$

В целях устранения этого недостатка можно воспользоваться процедурой округления.

Этап 5. Выполняется алгоритм полного перебора, описанный выше.

Как правило, выполнение этапа 6 затруднений не встречает, а потому и не рассматривается.

Таким образом, было дано описание двух алгоритмов решения задачи 1: точного и приближенного. Следует отметить, что на этапе подготовки к решению поставленной задачи ее размерность возможно понизить за счет учета некоторых условий.

4. Алгоритмы решения задачи второго типа

Решение задач второго типа предполагает использование алгоритмов, построенных на основе пороговой схемы [14, 15].

В данном случае вводится пороговое значение t_0 , которое будет совпадать с одной из известных величин t_j ($j = 1, N$). Таким образом, получаем задачу $D(t_0)$, которая будет совпадать с задачей $D[I_M, J(t_0), m]$. В этом случае подмножество $M(t_0)$ будет определяться из соотношения вида

$$J(t_0) = \{j | t_j \leq t_0\}. \quad (18)$$

Предлагаемый алгоритм будет состоять из двух этапов.

Этап 1. Располагаем величины t_j в порядке, обеспечивающем выполнение условия

$$t_{j_1} \leq t_{j_2} \leq \dots \leq t_{j_N}. \quad (19)$$

Этап 2. Осуществляется выполнение последовательности действий, которая может быть представлена в виде следующих шагов.

Шаг 0. Фиксируем начальное значение t_0 и находим решение задачи $D(t_0)$, то есть для задачи первого типа находим решение x^0 .

Общий шаг. Осуществляем сравнение полученных значений целевой функции, то есть $f_1(x^0)$ и $f_1[x(t_0)]$. В данном случае $x_0(t_0)$ является решением для задачи $D(t_0)$, позволяющим найти корректирующую поправку для величины t_0 . При этом при $t_0 = t_{jk}$ возможны два случая:

- если $f_1(x^0) > f_1[x(t_0)]$ устанавливаем значение $t_0 = t_{jk-l}$;
- если $f_1(x^0) \leq f_1[x(t_0)]$ или решаемая задача $D(t_0)$ является недопустимой, считаем $t_0 = t_{jk+l}$.

Осуществив корректировку значения t_0 , приступаем к решению задачи $D(t_0)$.

Процесс осуществления вычислений может быть завершён при помощи двух правил.

Правило 1. В том случае, когда при нулевом шаге значение переменной t_0 принимает значение $t_0 = t_1$, а на общем шаге $l = 1$. В этом случае общий шаг выполняется до тех пор, пока не будет выполнено условие $f_1(x^0) \leq f_1[x(t_0)]$.

Правило 2. Если на нулевом шаге переменная t_0 будет принимать значение $t_0 = t_{[N/2]}$, а на общем шаге r , $l = [N/2r]$. Прекращение вычислений происходит на шаге, для которого $l = 0$.

Следовательно, и при решении задачи второго типа могут быть использованы переборный и декомпозиционный алгоритмы, описанные ранее.

5. Задача о частичном покрытии двудольного графа

Рассмотрим поставленную задачу (1)–(4) как задачу о покрытии двудольного графа. В том случае, когда будет выполняться соотношение $m = M$, получаем известную задачу о покрытии, то есть частный случай решаемой задачи. Но наиболее интересным будет являться вариант, когда будет иметь место неравенство вида $m \leq M$. В этом случае получаем задачу о частичном покрытии [15–17]. Рассмотрим возможный подход к ее решению.

Рассмотрим двудольный граф $G(X, Y, U)$, где X – множество вершин первого уровня (доли), Y – множество вершин второго уровня, U – множество дуг, соединяющих вершины X с вершинами Y .

Вершины множества X соответствуют N изделиям, вершины множества Y соответствуют M показателям (характеристикам).

Обозначим $x_i = 1$, если изделие i выбрано в качестве базового, $x_i = 0$ в противном случае, $y_j = 1$, если j -й показатель должен быть реализован при реализации базовых изделий, $y_j = 0$ – в противном случае.

Постановка задачи. Определить $(x_i, i = 1, 2, \dots, N)$, $(y_j, j = 1, 2, \dots, M)$ минимизирующие

$$F_i(x) = \sum_{i=1}^N x_i C_i \quad (20)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M}; \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^M y_j = m, \quad (22)$$

где C_i – затраты на создание изделия; в том случае если положить $C_i = 1$, получаем случай, рассмотренный выше.

Задача является *NP*-трудной.

Рассмотрим способ получения нижней оценки на основе метода сетевого программирования. Для этого разделим каждое C_i произвольным образом на несколько частей S_{ij} по числу дуг, исходящих из вершин $i \in X$.

$$\sum_{j \in Q_i} S_{ij} = C_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (23)$$

где Q_i – множество вершин $j \in M$, таких что $(i, j) \in U$.

Обозначим

$$y_j = \min_{i \in P_j} S_{ij}, \quad (24)$$

где P_j – множество вершин $i \in M$, таких что $(i, j) \in U$.

Перенумеруем вершины множества Y в порядке возрастания y_j , т. е.

$$y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n. \quad (25)$$

Определим $\Phi(y) = \sum_i^m y_j$.

Из теории сетевого программирования следует, что (25) является нижней оценкой исходной задачи при любых (S_{ij}) .

Обобщенная двойственная задача

Определить $(S_{ij}), i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$, максимизирующее (25) при условиях (23).

Процедуру деления C_i на S_{ij} содержательно можно интерпретировать следующим образом. Представим себе, что изделие i состоит из нескольких подсистем (по числу исходящих из вершины $i \in X$) дуг, причем каждая подсистема отвечает за наличие (или создание) соответствующей характеристики. Значение S_{ij} соответствует затратам на создание подсистем. Очевидно, что для создания определенной характеристики нет необходимости создавать все изделия, достаточно создать соответствующую подсистему.

Пример. Рассмотрим двудольный граф (рис. 1).

Пусть $\bar{m} = 3$. Делим все C_i пополам. Оценка снизу $8 + 8 + 10 = 26$. Применим метод ветвей и границ. Возьмем для ветвления вершину 4.

Выбираем вариант с вершиной 4 (оценка 26). Далее берем вершину 2, минимальная оценка 36 достижима (рис. 2).

Оптимальное решение: вершины 4 и 2 из множества X . $E_1 = 36$.

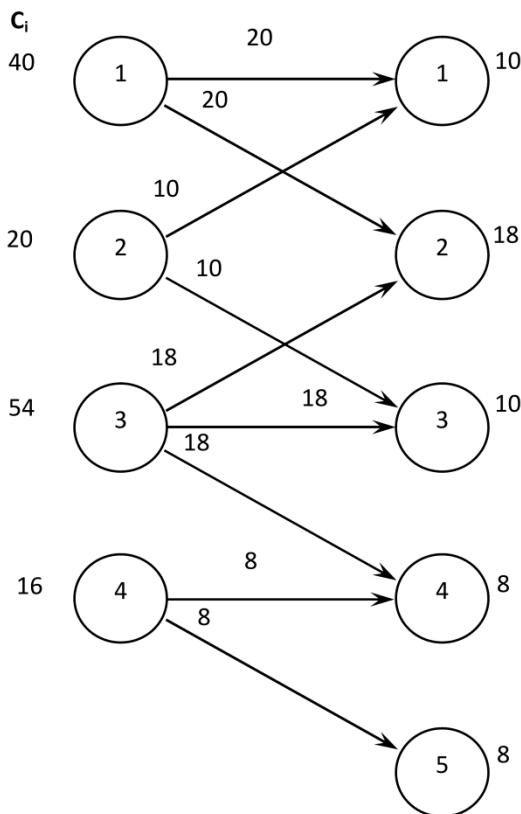


Рис. 1. Граф примера
Fig. 1. Graph of example

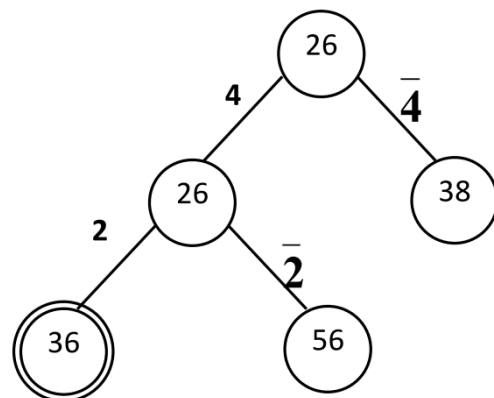


Рис. 2. Схема ветвления
Fig. 2. Branching scheme

Выводы

Дана формальная постановка задачи выбора базового представителя направления техники. Проведен анализ и разработана процедура выбора базовых изделий нового поколения техники, позволяющая в зависимости от условий, устанавливаемых лицом, принимающим решение (ЛПР),

определить базовое изделие направления техники, наиболее полно соответствующее функциональным, конструктивным и технологическим признакам поколения техники, с помощью предложенного точного переборного или предложенного декомпозиционного алгоритма.

Список литературы

1. Баркалов С.А., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Построение рейтинговой оценки на основе потоковой модели // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 31–41. DOI: 10.14529/ctcr230103
2. Бурков В.Н., Буркова И.В. Задачи дихотомической оптимизации. М.: Радио и связь, 2003. 156 с.
3. Курочка П.Н., Чередниченко Н.Д. Задачи ресурсного планирования в строительном проекте // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 4745–4753.
4. Баркалов С.А., Курочка П.Н. Построение интегральной оценки организационно-технологических решений на основе сингулярных разложений // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 2 (64). С. 39–46.
5. Белов М.В. Оптимальное управление жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 19–32. DOI: 10.25728/ru.2022.1.2
6. Курочка П.Н., Тельных В.Г. Оценка надежности организационных структур произвольного вида, задающихся планарным графом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 3 (23). С. 134–141.
7. Дранко О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. 2007. № 1. С. 37–40.
8. Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. М.: КомКнига, 2006. 332 с.
9. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Московский психолого-социальный институт, 2005. 584 с.
10. Типовые решения в управлении проектами / Д.К. Васильев, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков, А.В. Цветков. М.: ИПУ РАН, 2003. 74 с.
11. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
12. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability // Conference: Internationalization of Education in Applied Mathematics and Informatics for HighTech Applications (EMIT 2018). Leipzig, Germany, 2018. P. 1–12.
13. Селезнева И.Е., Клочков В.В., Егошин С.Ф. Математическая модель межотраслевой координации стратегий развития (на примере здравоохранения и авиастроения) // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2022. Вып. 99. С. 57–80.
14. Медведев С.Н. Жадные и адаптивный алгоритмы решения задачи маршрутизации транспортных средств с несколькими центрами с чередованием объектов // Автоматика и телемеханика. 2023. Вып. 3. С. 139–168. DOI: 10.31857/S0005231023030078
15. Асатурова Ю.М., Хватова Т.Ю. Повышение инновационной активности предприятий в условиях дефицита финансов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2019. Т. 12, № 1. С. 132–145. DOI: 10.18721/JE.12111
16. Жилиякова Л.Ю. Графовые динамические модели и их свойства // Автоматика и телемеханика. 2015. Вып. 8. С. 115–139.
17. Дранко О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. 2007. № 1. С. 37–40.

References

1. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Determining a rating score based on a streaming model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):31–41. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230103
2. Burkov V.N., Burkova I.V. *Zadachi dikhotomicheskoy optimizatsii* [Problems of dichotomous optimization]. Moscow: Radio i svyaz'; 2003. 156 p. (In Russ.)
3. Kurochka P.N., Cherednichenko N.D. [Tasks of resource planning in a construction project]. In: *XII vsrossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [XII All-Russian Conference on Management Problems VSPU-2014]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2014. P. 4745–4753. (In Russ.)
4. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Building integrated assessment organizational and technological solutions on the basis singular value decomposition. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2016;2(64):39–46. (In Russ.)
5. Belov M.V. Optimal control of the life cycle of complex systems. *Control Sciences*. 2022;1:19–32. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2022.1.2
6. Kurochka P.N., Telynykh V.G. Evaluation of reliability of the organizational structures defined by planar graph. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2011;3(23):134–141. (In Russ.)
7. Dranko O.I. [Model of financial forecasting and scenarios of internal investments]. *Control Sciences*. 2007(1):37–40. (In Russ.)
8. Novikov D.A., Ivashchenko A.A. *Modeli i metody organizatsionnogo upravleniya innovatsionnym razvitiem firmy* [Models and methods of organizational management of the innovative development of the firm]. Moscow: KomKniga; 2006. 332 p. (In Russ.)
9. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: Psychological and Social Institute; 2005. 584 p. (In Russ.)
10. Vasil'ev D.K., Zalozhnev A.Yu., Novikov D.A., Tsvetkov A.V. *Tipovye resheniya v upravlenii proektami* [Typical solutions in project management]. Moscow: ICS RAS; 2003. 74 p. (In Russ.)
11. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)
12. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability. In: *Conference: Internationalization of Education in Applied Mathematics and Informatics for HighTech Applications (EMIT 2018)*. Leipzig, Germany; 2018. P. 1–12.
13. Selezneva I.E., Klochkov V.V., Egoshin S.F. Mathematical model of intersectoral coordination of development strategies (on the example of healthcare and aircraft industry). In: *Large-Scale Systems Control*. Moscow: ICS RAS; 2022. Iss. 99. P. 57–80. (In Russ.)
14. Medvedev S.N. Greedy and adaptive algorithms for multi-depot vehicle routing with object alternation. *Avtomatika i telemekhanika*. 2023;3:139–168. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0005231023030078
15. Asaturova Yu.M., Khvatova T.Yu. Improving innovative activity of enterprises in conditions of financial deficit. *St. Petersburg state polytechnical university journal. Economics*. 2019;12(1):132–145. (In Russ.) DOI: 10.18721/JE.12111
16. Zhilyakova L.Yu. Dynamic graph models and their properties. *Automation and Remote Control*. 2015;76(8):1417–1435. DOI: 10.1134/S000511791508007X
17. Dranko O.I. [Model of financial forecasting and scenarios of internal investments]. *Control Sciences*. 2007;1:37–40. (In Russ.)

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@nm.ru.

Бурков Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; vlab17@bk.ru.

Курочка Павел Николаевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; kpn55@rambler.ru.

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Dean of the Faculty of Economics, Management and Information Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@nm.ru.

Vladimir N. Burkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; vlab17@bk.ru.

Pavel N. Kurochka, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; kpn55@rambler.ru.

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 03.04.2023

The article was submitted 03.04.2023

ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРОВ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ЖИЗНЬЮ В КОНТЕКСТЕ РЕШЕНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ВОПРОСОВ

Д.В. Гилёв¹, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>

О.В. Логиновский², loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

¹ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается ряд факторов, как внешних, так и внутренних, которые способствуют благополучию граждан. Изученный обзор показывает, что удовлетворенность жизнью каждым оценивается по-разному, но измеряется в зависимости, например, от жизненного опыта, экономического положения, места жительства, образования и других факторов. Удовлетворенность жизнью не является неким биологическим явлением и зависит от разных факторов, которые могут изменяться с течением времени. **Цель работы.** Целью данной работы является изучение факторов удовлетворенности жизнью. В качестве основной гипотезы выдвинуто предположение о том, что количество удовлетворенных своей жизнью домохозяйств напрямую зависит от места жительства. Также выдвинуто еще две гипотезы о том, что удовлетворенные жизнью домохозяйства имеют лучшие условия жизни, нежели неудовлетворенные, и не обязательно имеют высокий денежный доход. **Материалы и методы.** Данное исследование проводится с помощью таких методов, как описательная статистика и визуализация данных, построение и анализ логит и пробит моделей, кластерный анализ данных и алгоритм случайного леса. Все используемые методы показывают высокую результативность. Итоговая выборка данных после устранения выбросов составила 30177 наблюдений. В работе используются панельные данные на уровне домохозяйств RLMS-HSE, что позволяет учитывать неоднородность домохозяйств и значительно расширяет возможности для анализа. **Результаты исследования.** Результаты проведенного исследования полностью подтверждают основную гипотезу и частично подтверждают остальные выдвинутые гипотезы, а на их основе разработаны возможные рекомендации по повышению уровня удовлетворенности жизнью. **Обсуждение и заключение.** Полученные результаты данного исследования могут послужить практическим инструментом для органов власти для повышения качества жизни в том или ином регионе, а также решением вопросов в инвестиционной деятельности регионов, но самое главное, помогут предприятиям с социальной направленностью верно сформулировать цели своей деятельности и скорректировать оценку эффективности.

Ключевые слова: управление, логит-анализ, факторы благополучия, случайный лес, удовлетворенность жизнью

Для цитирования: Гилёв Д.В., Логиновский О.В. Выявление факторов удовлетворенности жизнью в контексте решения управленческих вопросов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 105–117. DOI: 10.14529/ctcr230309

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230309

IDENTIFICATION OF LIFE SATISFACTION FACTORS IN THE CONTEXT OF MANAGEMENT ISSUES

D.V. Gilev¹, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>

O.V. Loginovskiy², loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article examines the factors, both external and internal, that contribute to the well-being of citizens. The studied review shows that life satisfaction is assessed differently by everyone, but is measured depending, for example, on life experience, economic status, place of residence, education, and more. Life satisfaction is not a biological phenomenon and depends on various factors that may change over time. **The purpose of the work.** The purpose of this work is to study the factors of life satisfaction. As the main hypothesis, the assumption is put forward that the number of households satisfied with their lives directly depends on the place of residence. Two more hypotheses have also, been put forward that satisfied households have the best living conditions than those who are not satisfied and do not necessarily have a high monetary income. **Materials and methods.** This research is carried out using such methods as descriptive statistics and data visualization, construction and analysis of logit and probit models, cluster data analysis and random forest algorithm. All the methods used show high efficiency. The final sample of data after the elimination of outliers was 30177 observations. The work uses panel data at the household level of RLMS-HSE, which allows taking into account the heterogeneity of households and significantly expands the possibilities for analysis. **The results of the study.** The results of the study fully confirm the main hypothesis and partially confirm the rest of the hypotheses put forward, and on their basis, possible recommendations for increasing the level of life satisfaction have been developed. **Discussion and conclusion.** The obtained results of this study can serve as practical tools for authorities to improve the quality of life in a particular region, as well as solving issues in the investment activities of the regions, but most importantly, they will help enterprises with a social orientation to correctly formulate the goals of their activities and adjust the efficiency assessment.

Keywords: management, logit analysis, well-being factors, random forest, life satisfaction

For citation: Gilev D.V., Loginovskiy O.V. Identification of life satisfaction factors in the context of management issues. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3):105–117. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230309

Введение

Задачи управления учреждениями здравоохранения, а также организациями, имеющими социальную направленность в своей деятельности, значительно отличаются от задач управления других предприятий, направленных только на извлечение прибыли. В социально-ориентированных учреждениях первоочередной задачей стоит не коммерциализация деятельности, а достижение именно общественного блага [1]. Одной из основных бизнес-целей управления такими организациями является предоставление клиентам современных и удобных условий, а также гибких (виртуальных) рабочих мест, обеспечивающих оперативное и бесперебойное обслуживание. В случае с медицинскими учреждениями для достижения вышеуказанных целей необходимо использовать бизнес-подходы, чтобы управлять интегрированными неклиническими услугами с наибольшей выгодой. Эта бизнес-стратегия означает, что эффективное и непрерывное предоставление вспомогательных услуг в сфере здравоохранения в настоящее время является чрезвычайно важной бизнес-операцией. Наряду с этим в качестве цели управления нередко рассматривается пространственное развитие, которое является одним из важных направлений развития России. Пространственное развитие – это совершенствование системы расселения и территориальной организации экономики, в том числе за счет проведения эффективной государственной политики регионального развития. Для того чтобы иметь чёткую цель управления, организации

социальной направленности должны понимать, какие факторы удовлетворенностью жизнью актуальны на данный момент.

1. Обзор литературы

В последние несколько лет в условиях кризиса управленческие вопросы в деятельности предприятий социальной направленности возникают всё чаще. Целью пространственного развития Российской Федерации является обеспечение устойчивого и сбалансированного пространственного развития страны, направленного на сокращение межрегиональных различий в уровне и качестве жизни населения, ускорение темпов экономического роста и технологического развития, а также на обеспечение национальной безопасности страны.

Для достижения данной цели необходимо знать и учитывать, как население оценивает место, в котором проживает. Существует множество факторов, как внешних, так и внутренних, которые способствуют благополучию граждан. Удовлетворенность жизнью каждым оценивается по-разному, но измеряется в зависимости, например, от жизненного опыта, экономического положения, места жительства, образования и др. Удовлетворенность жизнью не является неким биологическим явлением и зависит от разных факторов, которые могут изменяться с течением времени. Все люди имеют определенное место жительства. Кто-то предпочитает большие города-миллионники, а кто-то и село. У всех разное жилье, разные удобства жизни, разные потребности и предпочтения. Всё это присутствует в нашей жизни ежедневно. Однако имеются межрегиональные различия в уровне и качестве жизни населения. Именно поэтому данное исследование может послужить важным практическим инструментом для органов власти, которое поможет определить проблемы жителей в том или ином регионе.

Объектом исследования является серия общенациональных репрезентативных опросов базы данных RLMS-HSE.

Удовлетворенность жизнью – это мера благополучия, оцениваемая с точки зрения разных факторов. Определение удовлетворенности жизнью впервые раскрыл в 80-е годы прошлого века Н. Брэдберн [2], а индекс удовлетворенности жизнью был создан Адрианом Уайтом, социальным психологом из университета Лестера [3]. Индекс показывает, насколько люди удовлетворены жизнью в разных странах. В данном индексе субъективное благополучие сильно коррелирует со здоровьем граждан, с их богатством и с доступом к базовому образованию [4].

Всероссийским центром изучения общественного мнения (ВЦИОМ) в 2020 году было опрошено 1,6 тыс. россиян в возрасте от 18 лет с помощью телефонного интервью¹. Мнение на счет удовлетворенности жизнью у населения России разделилась почти поровну. Были получены следующие результаты:

– к концу 2020 года россияне чаще удовлетворены или частично удовлетворены жизнью, которую они ведут – 47 %. Отчасти удовлетворены, а отчасти нет своей жизнью 25 % россиян. Не устраивает актуальная ситуация в их жизни 26 % опрошенных;

– в конце трудного пандемического года россияне оценивали сложившуюся в стране ситуацию двойственно: 47 % называли ее скорее хорошей, 48 % – скорее плохой;

– положительно экономическую ситуацию оценивают 15 % россиян, средние оценки дают 45 %, а отрицательные – 36 %.

Большинство статей и исследований проводится на основе опросов людей [5–7]. Так, например, рассматривалось влияние использования социальных сетей на удовлетворенность жизнью в 27 различных европейских странах с использованием опроса Eurobarometer 2016 года, проведенного Европейской комиссией [8]. Основные выводы заключались в том, что использование социальных сетей два раза в неделю или каждый день может иметь положительное влияние на удовлетворенность жизнью, также влияние социальных сетей варьируется в зависимости от страны, а это означает, что переменные влияют на взаимосвязь между использованием социальных сетей и благополучием [9].

Так, еще в одном из исследований рассматривалась связь между использованием смартфона и удовлетворенностью жизнью. Данное исследование проводилось с помощью анонимного анке-

¹ ВЦИОМ новости: [сайт]. URL: <https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/socialnye-nastroeniya-monitoring> (дата обращения: 04.03.2023).

тирования. Полученные данные анализировались с помощью моделирования структурными уравнениями. Таким образом, был сделан вывод о том, что на удовлетворенность жизнью негативно влияет зависимость от смартфонов [10].

Другими авторами анализировались духовность и религиозность как предикторы удовлетворенности жизнью граждан Перу во время пандемии COVID-19. Была проведена выборка из 734 граждан Перу, принявших участие в исследовании, из них 290 были мужчинами (39,5 %) и 444 женщинами (60,5 %) в возрасте от 17 до 75 лет. Исследование показало значительное влияние духовности и религиозности на удовлетворенность жизнью [11].

В другой статье отечественного автора [12] анализируются проблемы измерения уровня и качества жизни населения России с использованием официальных статистических данных и оценок населения. Предлагается методика измерения качества жизни на основе субъективных представлений с использованием индексного метода. В методику включены такие компоненты качества жизни, как уровень жизни, качество ближайшей социальной среды, качество экологии, социальное самочувствие. Разработан интегральный индекс качества жизни, включающий все компоненты и позволяющий сравнить качество жизни различных социальных групп и слоев населения, качество жизни в регионах на основании того, как сами жители оценивают различные стороны своего существования [13].

2. Материалы и методы

Как показал анализ литературы, большинство исследований опирается на взаимосвязь удовлетворенности жизнью и психологическим состоянием человека, его общим состоянием здоровья, религиозностью или политической обстановкой в стране и др. Однако мало изучается и анализируется удовлетворенность жизнью за счет именно места проживания и жилищных условий человека, которые влияют на межрегиональные различия в качестве жизни населения. Поэтому важное значение имеет формирование и улучшение стратегии пространственного развития Российской Федерации. Стратегия пространственного развития Российской Федерации – это документ стратегического планирования, определяющий приоритеты, цели и задачи регионального развития Российской Федерации и направленный на поддержание устойчивости системы расселения на территории Российской Федерации.

В связи с этим в качестве основной гипотезы исследования можно выдвинуть предположение о том, что количество удовлетворенных своей жизнью домохозяйств напрямую зависит от места жительства.

Также можно сформулировать еще несколько гипотез.

– Удовлетворенные жизнью домохозяйства имеют лучшие условия жизни, нежели неудовлетворенные.

– Удовлетворенные жизнью домохозяйства не обязательно имеют высокий денежный доход.

Данное исследование проводится с помощью таких методов, как:

- описательная статистика;
- визуализация данных с использованием графиков;
- анализ пробит и логит моделей;
- кластерный анализ данных;
- алгоритм случайного леса.

Описательная статистика и визуализация данных являются важными составляющими любого анализа данных. Их главной целью является сжатие большого количества данных в форму, лёгкую для восприятия и интерпретации.

Пробит- и логит-модель объясняют бинарную зависимую переменную. Данный метод воспроизводится с целью определения значимости переменных и вероятности наступления удовлетворенности жизнью у домохозяйств [14].

Преимущества логит-модели:

- возможность определить вероятность наступления события;
- достаточно высокая точность результатов;
- простота интерпретации результатов.

Преимущества пробит-модели:

- возможность определить вероятность наступления события.

Недостатки пробит-модели:

- сложность интерпретации результатов.

С помощью иерархической кластеризации данных исследуется взаимосвязь между удовлетворенностью жизнью и общим доходом домохозяйства за последние 30 дней, а также их конкретным местом проживания в 2019 и 2020 годах. Но из-за большого количества наблюдений в базе данных для анализа выборки используется метод k-средних.

Преимущества данного метода:

- простота реализации;
- масштабируемость до больших наборов данных;
- быстрая обучаемость метода на новых данных.

Недостатки:

- чувствительность к выбросам;
- трудоемкость выбора оптимального количества кластеров;
- уменьшение масштабируемости.

Метод случайного леса используется для моделирования прогнозов и анализа поведения с помощью деревьев решений [15]. В данном исследовании метод помогает определить количество удовлетворенных и не удовлетворенных жизнью домохозяйств в 2017–2018 годах и сделать прогноз на 2019–2020 годы.

Преимущества:

- способность эффективно обрабатывать данные с большим числом признаков и классов;
- нечувствительность к любым монотонным преобразованиям значений признаков;
- одинаково хорошо обрабатываются как непрерывные, так и дискретные признаки;
- существуют методы оценивания значимости отдельных признаков;
- внутренняя оценка способности модели к обобщению;
- случайные леса очень гибки и обладают очень высокой точностью.

Недостатки данного метода:

- большой размер получающихся моделей;
- построение леса сложнее и отнимает больше времени;
- сложность в интерпретации;
- чем больше объем, тем меньше интуитивное понимание.

3. Основной анализ и разработка факторов

Начиная с 1994 года в России каждый год проводится первый и единственный негосударственный мониторинг социально-экономического положения и состояния здоровья населения Российской Федерации (RLMS-HSE)². Мониторинг представляет собой серию общенациональных репрезентативных опросов, проводимых на базе вероятностной стратифицированной многоступенчатой территориальной выборки, разработанной при участии ведущих мировых экспертов в этой области. Отличительная черта RLMS-HSE состоит в том, что база данных содержит обширное количество социально-экономических показателей, например, информацию о структуре доходов и расходов, материальном благосостоянии, инвестиционном поведении, структуре занятости, миграционном поведении, состоянии здоровья и структуре питания, о планировании семьи и образовательном поведении, о системе ценностей россиян, восприятии ими проводимых в стране преобразований и др. Также уникальность заключается в том, что структура опросников как для домохозяйств, так и для индивидов имеет мировой стандарт, содержит показатели, которые отсутствуют в государственной статистике, является практически единственным в Российской Федерации репрезентативным микроэкономическим обследованием, включает в себя показатели, позволяющие получить информацию о развитии изменений объективных характеристик жизни домохозяйств субъективным оценкам происходящего в стране.

В работе используются панельные данные на уровне домохозяйств RLMS-HSE, что позволяет учитывать неоднородность домохозяйств и значительно расширяет возможности для анализа.

² Данные обследования РМЭЗ НИУ ВШЭ. Объединенная база данных 1994–2021. Индивиды [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hse.ru/rlms/spss> (дата обращения: 13.03.2023).

На основе изученных научных статей для проведения исследования были взяты данные из объединенной базы данных домохозяйств за последние 10 лет, в период с 2011 по 2020 год (20–29 волны). Рассматриваемая база данных содержит 2000 переменных, из которых была отбрана лишь 1/95 от всех переменных. Изначально было получено 73 057 наблюдений, но для получения репрезентативной информации были отфильтрованы и взяты только те, где семья опрошена по адресу репрезентативной выборки. Кроме того, 18 переменных, начиная с C1 и до J65, имеют еще три варианта кодировки: 99999997 – затрудняюсь ответить, 99999998 – отказ от ответа и 99999999 – нет ответа. Данные домохозяйства были исключены из выборки при построении модели, чтобы не исказить саму модель и ее результаты. Итого полученная новая база данных содержит 21 переменную и 30 177 наблюдений. Была проанализирована абсолютно вся база переменных. Многие переменные не имеют ответа полностью за весь взятый период анализа, а многие не подходят по данной теме. Поэтому взятые переменные отобраны не случайным образом. Каждая из них имеет определенное влияние на различные аспекты жизнедеятельности любого из домохозяйств, а в совокупности отражает уровень их благополучия.

В качестве зависимой переменной взята J65, которая и отражает удовлетворенность жизнью. Данная переменная была взята из объединенной базы данных индивидов за последние 10 лет, в период с 2011 по 2020 год (20–29 волны). С помощью вспомогательной переменной (номер семьи) были сопоставлены индивиды с домохозяйствами и тем самым взята данная переменная.

Построение всех моделей, графиков и так далее производится с помощью программы RStudio – свободной среды разработки программного обеспечения с открытым исходным кодом для языка программирования R, который предназначен для статистической обработки данных и работы с графикой.

Для первичного анализа данных построим и проанализируем описательную статистику переменных. Описательная статистика представляет собой обобщение и организацию данных для их более легкого восприятия. Для количественных переменных описательная статистика показывает минимальное и максимальное значения, среднее арифметическое, медиану, нижний и верхний квартили. Нижний квартиль – значение, которое в выборке не превышает 25 % значений, а верхний квартиль – значение, которое в выборке не превышает 75 % значений. Для качественных переменных (текстовые, факторные) отображает количество значений по каждой группе. Таким образом, полученный анализ свидетельствует о том, что всего рассмотрено 38 регионов России. Наименьшая численность населения составляет 30 человек (Куйбышевский район – Калужская область, Земетчинский район – Пензенская область, Уварово и Уваровский район – Тамбовская область, Руднянский район – Волгоградская область, Челябинск – Челябинская область), а наибольшая – 12 506 500 человек (г. Москва). Минимальное количество членов семьи – 1 человек, а максимальное – 16 человек. Большинство опрошенных домохозяйств в выборке имеют своё собственное жильё (при достижении 75 % наблюдений значение остается равным 1 – имеет своё жильё). Наименьшая общая полезная площадь жилья – 9 кв. м, средняя – 55,47 кв. м, наибольшая 300 кв. м. Примерно 75 % опрошенных имеют центральное отопление от ТЭЦ. А также примерно 75 % домохозяйств не имеют низкоскоростной выход в Интернет через обычную телефонную линию, через мобильный телефон, модем по технологии GPRS, спутниковую антенну и не держала в течение последних 12 месяцев какой-нибудь скот, птицу или пчел. Минимальная пенсия в месяц – 337 руб., максимальная – 1 380 000 руб. Минимальный денежный доход за последние 30 дней всей семьи составляет 500 руб., максимальный – 2 777 400 руб.

Далее была построена пробит-модель – статистическая модель бинарного выбора, используемая для предсказания вероятности возникновения интересующего события. Её отличие состоит в том, что вместо логистической функции для описания вероятности наступления события используется функция стандартного нормального распределения. Получившаяся пробит-модель показывает, что всего 11 переменных значимых на 1%-ном уровне значимости, и 2 переменных – на 10%-ном. Значимые переменные оказались следующими:

- регион;
- тип населенного пункта;
- численность населения;
- общая полезная площадь жилья;
- наличие или отсутствие централизованной канализации;

- наличие или отсутствие домашнего телефона;
- наличие или отсутствие низкоскоростного выхода в Интернет;
- наличие или отсутствие высокоскоростного выхода в Интернет;
- наличие или отсутствие спутниковой антенны;
- наличие или отсутствие у семьи в пользовании какой-либо земли;
- наличие или отсутствие в течение последних 12 месяцев какого-нибудь скота, птицы, пчел;
- пенсия в рублях за последние 30 дней;
- весь денежный доход семьи за последние 30 дней.

Логит-модель отличается от пробит-модели тем, что с ее помощью можно предсказать вероятность того, удовлетворено ли домохозяйство своей жизнью или нет.

В логит-модели значимые переменные те же самые, что и в пробит-модели, кроме переменной, отражающей пенсию в рублях за последние 30 дней.

Таким образом, при прочих равных условиях при увеличении переменной «тип населенного пункта» на единицу, то есть при изменении типа населённого пункта с областного центра на город, далее на ПГТ (поселок городского типа) и село, вероятность удовлетворенности жизнью увеличивается в $e^{0,04997} = 1,051$ раза.

При увеличении численности населения на 1 человека вероятность удовлетворенности жизнью уменьшается в 0,999 раза.

При увеличении общей полезной площади на 1 кв. м вероятность удовлетворенности жизнью увеличивается в 1,003 раза.

При наличии централизованной канализации вероятность удовлетворенности жизнью увеличивается в 0,779 раза.

При наличии стационарного телефона вероятность удовлетворенности жизнью у домохозяйств увеличивается в 0,884 раза.

При наличии низкоскоростного выхода в Интернет вероятность удовлетворенности жизнью увеличивается в 0,829 раза.

При наличии высокоскоростного выхода в Интернет вероятность удовлетворенности жизнью у домохозяйств увеличивается в 0,739 раза.

При наличии спутниковой антенны вероятность удовлетворенности жизнью увеличивается в 0,818 раза.

Если домохозяйство в последние 12 месяцев имело в пользовании какую-либо землю, то вероятность удовлетворенности их жизнью увеличивается в 0,887 раза.

Если домохозяйство в последние 12 месяцев имело какой-либо скот, птицу или пчел, то вероятность удовлетворенности их жизнью увеличивается в 0,746 раза.

При увеличении общего дохода семьи за последние 30 дней на 1 рубль вероятность удовлетворенности жизнью увеличивается в 1,0000154 раза.

Далее был проведен кластерный анализ. Целью кластерного анализа является разбиение всей выборки на группы по схожим признакам. Изначальная выборка составляет 30 177 наблюдений, все построения происходят с помощью программы RStudio, но данная программа не позволяет обработать такое количество данных. Поэтому кластерный анализ произведен на выборке за последние два года, а именно за 2019 и 2020 годы. В базе данных получилось 5875 наблюдений.

Для начала произведем иерархическую кластеризацию данных. Для данного метода создается матрица расстояний между элементами выборки. В качестве меры расстояния используем евклидово расстояние.

Используется 3 переменные (удовлетворены ли своей жизнью домохозяйства или нет, конкретное место проживания, общий денежный доход за последние 30 дней). Была построена дендрограмма, чтобы увидеть взаимосвязь между домохозяйствами из заданной выборки, их местом проживания и общим доходом за последние 30 дней. Было отобрано 9 наиболее выделяемых кластеров.

Далее был проведен анализ на содержание количества домохозяйств в каждом кластере, который представлен отдельно в табл. 1.

Общее количество домохозяйств в кластере (составлено авторами)

Table 1

Total number of households in the cluster (compiled by the authors)

Общее количество домохозяйств в кластере	Номер кластера								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1818	413	774	1083	408	982	315	80	2

Таким образом, наибольшее количество домохозяйств находится в кластере под номером 1, наименьшее – в кластере под номером 2.

В целом все кластеры значительно отличаются по общему денежному доходу домохозяйства за последние 30 дней.

Первый кластер лидирует по наибольшему количеству удовлетворенных своей жизнью домохозяйств, как и в целом по общему их количеству. Однако общий денежный доход по всем критериям самый низкий.

Во втором кластере – 236 домохозяйств, которые удовлетворены своей жизнью, что составляет более чем половину от их общего числа в кластере. Минимальный общий денежный доход домохозяйства за последние 30 дней почти в 12 раз больше, чем у домохозяйств из кластера под номером 1. Однако общее количество домохозяйств в 4,4 раза меньше относительно первого кластера.

Третий кластер, как и второй, содержит более половины удовлетворенных жизнью домохозяйств в количестве 457 из 774. Но общий денежный доход по всем характеристикам на порядок меньше, чем кластере под номером 2.

Четвёртый кластер относительно всех остальных находится на втором месте как по общему числу домохозяйств в нём, так и по числу удовлетворенных своей жизнью. Минимальный размер общего дохода составляет 26 385 руб., что близко к максимальному размеру общего дохода в первом кластере – 26 304 руб.

Пятый кластер по общему количеству домохозяйств всего лишь на 5 меньше второго кластера, но имеет на 6 удовлетворенных своей жизнью домохозяйств больше. Однако средний общий доход практически на 1/4 больше, чем во втором кластере.

Шестой кластер схож с четвертым кластером. Общее количество домохозяйств меньше на 101, а удовлетворенных жизнью – на 27. Но минимальный, средний и максимальный общий доход практически в 1,5 раза больше.

В седьмом кластере всего 315 домохозяйств, что составляет практически 1/19 от всей анализируемой выборки. Минимальный общий доход домохозяйств составляет 117 500 руб., средний – 143 176 руб. и максимальный – 188 000 руб.

Восьмой кластер содержит 80 домохозяйств, половина из которых удовлетворены своей жизнью. Максимальное значение общего дохода значительно отличается относительно седьмого кластера, которое в 3,7 раза больше и составляет 700 062 руб.

Девятый кластер полностью отличается по всем анализируемым параметрам в сравнении с остальными восьмью кластерами. Кластер содержит 2 домохозяйства-миллионера, где только одно из них удовлетворено своей жизнью. Минимальный общий доход составляет 1 943 500 руб., средний – 2 196 450 руб. и максимальный – 2 449 400 руб. Таким образом, проанализировав все девять кластеров, можно сделать следующий вывод. За 2019–2020 годы большинство опрошенных домохозяйств имеют общий доход от 6095 до 26 304 руб.. И лишь 1/15 от всех домохозяйств имеет минимальный общий доход более 100 000 руб. Всего в данной выборке 5875 домохозяйств, 3102 из них удовлетворены своей жизнью, что составляет больше половины рассматриваемой выборки.

Первый кластер содержит наибольшее количество домохозяйств из Алтайского края, Саратовской области и Москвы. Наименьшее количество – Липецкой области, Ростовской области, Оренбургской области и Республики Кабардино-Балкария.

Во втором кластере лидирующую позицию по наибольшему количеству домохозяйств снова занимает Москва и Московская область, а также Республика Коми. Меньше всего домохозяйств из Пензенской области, Волгоградской области, Тамбовской области, Республик Удмуртия и Чувашия.

Третий кластер. Больше всего домохозяйств из Краснодарского Края, Московской области и Москвы. Меньше всех из Пензенской области, Тамбовской области и Республики Чувашия.

Четвертый кластер состоит больше всего из домохозяйств Красноярского края, Алтайского края и Челябинской области. Домохозяйств Тульской, Томской, Нижегородской и Смоленской областей меньше всего.

В пятом кластере преобладают домохозяйства снова Москвы и Московской области, Краснодарского края. Меньшинство же из Оренбургской, Тверской, Тамбовской, Курганской областей и Республики Удмуртия. Пензенская область в данном кластере отсутствуют.

Челябинская область и Алтайский край, а также Москва и Московская область имеют больше всего домохозяйств в шестом кластере. Пензенская область, Республика Чувашия, Приморский край – меньше всего.

В седьмом кластере отсутствуют Тверская область и Ставропольский край. Наибольшее количество домохозяйств из Приморского края, Краснодарского края, Московской области и Москвы.

Восьмой кластер состоит в большинстве из домохозяйств из Республики Коми, Краснодарского края и Москвы.

Девятый кластер содержит всего лишь два домохозяйства из Москвы и Республики Коми.

Таким образом, наибольшее число домохозяйств – из Москвы (540), наименьшее – из Оренбургской области (97).

Далее был проведен алгоритм случайного леса, который предназначен для прогнозирования, однако не объясняет, как устроена зависимость. Так как программа RStudio в случае алгоритма случайного леса не позволяет обработать полностью всю изначальную базу данных из-за слишком большого количества наблюдений, возьмём 2017 и 2018 годы для обучающей выборки и посмотрим, насколько эффективно модель предсказывает удовлетворенность жизнью домохозяйств, и обратимся к табл. 2.

Обучающая выборка за 2017–2018 годы (составлено авторами)

Таблица 2

Training sample for 2017–2018 (compiled by the authors)

Table 2

Удовлетворены ли домохозяйства своей жизнью в настоящее время	Нет		Да	
Нет	1369	66,42 %	692	33,58 %
Да	992	27,03 %	2678	72,97 %

Таким образом, 66,42 % домохозяйств не удовлетворены своей жизнью в настоящее время, и модель определяет это верно, 72,97 % домохозяйств удовлетворены своей жизнью. 27,03 % домохозяйств на самом деле не удовлетворены жизнью, но модель считает наоборот – удовлетворены. И 33,58 % – удовлетворены, но модель считает, что не удовлетворены.

Выводы и результаты

Удовлетворенность жизнью за счет влияния различных факторов изучается в постоянном режиме как отечественными, так и зарубежными авторами. Ни одно исследование не может определить конкретный список факторов, которые тем или иным образом влияют на всех людей одинаково. Однако, проанализировав научную литературу, можно сделать вывод, что в большинстве исследований делается упор на такие факторы, как:

- психологическое и эмоциональное состояние;
- политическая обстановка и экономическое положение в стране;
- религиозность;
- возраст;
- здоровье.

Проводимое исследование отличается тем, что оно направлено на анализ следующих факторов:

- географический фактор – регион и тип населенного пункта;
- социально-демографический фактор – численность населения и количество членов семьи;

– жилищно-коммунальный фактор – тип жилья, общая полезная площадь, наличие/отсутствие центрального отопления, централизованного водоснабжения и канализации, горячего водоснабжения, магистрального газа;

– информационный фактор – наличие/отсутствие стационарного телефона, низкоскоростного/высокоскоростного выхода в Интернет, спутниковой антенны и кабельного телевидения;

– финансово-экономический фактор – наличие/отсутствие за последние 12 месяцев какого-либо скота, птицы или пчел, земли в пользовании, а также денежная сумма пенсии и общего дохода в рублях за последние 30 дней.

С помощью метода построения пробит-модели было выявлено 13 значимых переменных:

– регион;

– тип населенного пункта;

– численность населения;

– общая полезная площадь жилья;

– наличие или отсутствие централизованной канализации;

– наличие или отсутствие домашнего телефона;

– наличие или отсутствие низкоскоростного выхода в Интернет;

– наличие или отсутствие высокоскоростного выхода в Интернет;

– наличие или отсутствие спутниковой антенны;

– наличие или отсутствие у семьи в пользовании какой-либо земли;

– наличие или отсутствие в течение последних 12 месяцев какого-нибудь скота, птицы, пчел;

– пенсия в рублях за последние 30 дней;

– весь денежный доход семьи за последние 30 дней.

Логит-модель показала все те же значимые переменные, за исключением денежной суммы пенсии за последние 30 дней.

После выявления наиболее значимых переменных был произведен кластерный анализ на данных за 2019 и 2020 года, который показал следующие результаты:

– большинство опрошенных домохозяйств имеют общий доход от 6095 до 26 304 руб. И лишь 1/15 от всех домохозяйств имеет минимальный общий доход более 100 000 руб. Всего в данной выборке 5875 домохозяйств, 3102 из них удовлетворены своей жизнью, что составляет больше половины рассматриваемой выборки;

– большинство опрошенных домохозяйств, которые имеют центральную канализацию, высокоскоростной выход в Интернет, землю в пользовании и какой-либо скот, а также не имеют стационарный телефон и спутниковой антенны, удовлетворены своей жизнью в настоящее время;

– наибольший процент удовлетворенных своей жизнью домохозяйств в настоящее время находится в Республике Кабардино-Балкария (71,1 %), Ленинградской области (63,4 %) и Пензенской области (58,2 %). Наименьшее же количество удовлетворенных своей жизнью домохозяйств в настоящее время находится в Ростовской области (54,3 %), Республике Удмуртия (53,8 %) и Республике Чувашия (53 %). Однако по результатам рейтинга информационного агентства РИА Новости в 2021 году лидирующие позиции по удовлетворенности жизнью заняли Москва, Санкт-Петербург и Московская область.

Результаты данного исследования могут послужить практическим инструментом для органов власти для улучшения жизни домохозяйств, а также решить управленческие вопросы по привлечению инвестиций в регионы, но самое главное, помогут предприятиям с социальной направленностью верно сформулировать цели своей деятельности и скорректировать оценку эффективности.

В контексте решения управленческих задач в научной литературе имеется весьма значимая библиография, часть из которой представлена рядом статей отечественных и зарубежных авторов, в том числе и работами авторов данной статьи [1, 2, 4, 6–8, 12, 16–20].

Список литературы

1. Современные подходы к решению задач управления медицинских организаций / С. Б. Чолоян, А. К. Екимов, Е. Н. Байгазина и др. // Менеджер здравоохранения. 2021. № 10. С. 4–13. DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13
2. Diener E. The Satisfaction with Life Scale // Journal of Personality Assessment. 1985. Vol. 49 (1). P. 71–75. DOI: 10.1207/s15327752jpa4901_13
3. Strengths of character, orientation to happiness, and life satisfaction / C. Peterson, W. Ruch, U. Beermann et al. // Journal of Positive Psychology. 2007. Vol. 2, no. 3. P. 149–156. DOI: 10.1080/17439760701228938
4. Seligman M. *Authentic happiness: using the new positive psychology to realize your potential for lasting fulfillment*. New York: Free Press; 2002. 321 p.
5. Тихонова Н.Е. Удовлетворенность россиян жизнью: динамика и факторы // Общественные науки и современность. 2015. № 3. С. 19–33.
6. Акмаров П.Б., Войтович В.Ю., Князева О.П. Инвестиционное развитие региона как основа эффективного государственного управления // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. 2019. Т. 29, № 3. С. 259–269.
7. Glatzer W. Quality of life in advanced industrialized countries: the case of West Germany // Subjective Well-being: An Interdisciplinary Perspective / F. Strack, M. Argyle, N. Schwarz (Eds.). Pergamon, Oxford, 1991. P. 261–279.
8. Айвазян С.А. Анализ качества и образа жизни населения. М.: Наука, 2012. 432 с.
9. Belovol E.V., Boyko Z.V., Shurupova E.Yu. Cognitive Factors of Life Satisfaction among the Russian Elderly // RUDN Journal of Psychology and Pedagogics. 2020. Vol. 17, no. 4. P. 671–684. DOI: 10.22363/2313-1683-2020-17-4-671-684
10. Фролова Е.А., Маланина В.А. Анализ факторов формирования ожиданий относительно будущего и удовлетворенности жизнью пожилых людей в России // Вестник Томского государственного университета. 2019. № 447. С. 105–115. DOI: 10.17223/15617793/447/13
11. Немировская А. В., Соболева Н. Э. Детерминанты субъективного благополучия в России: региональная перспектива // Вестник Института социологии. 2020. Т. 11, no. 2. С. 54–81. DOI: 10.19181/vis.2020.11
12. Волкова М.И. Выявление факторов удовлетворенности жизнью в России и Европе // Социальная политика и социология. 2017. Т. 16, № 5 (124). С. 6–15. DOI: 10.17922/2071-3665-2017-16-5-6-15
13. Андреенкова Н.В. Сравнительный анализ удовлетворенности жизнью и определяющих ее факторов // Мониторинг общественного мнения. 2010. № 5 (99). С. 189–215.
14. Воищева О.С. Эконометрические модели качественных переменных в прогнозных задачах маркетинга // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2006. № 2. С. 261–268.
15. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. Chapter 15. Random Forests // The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer, New York, NY. P. 587–604. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7_15
16. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с. ISBN 978-5-16-013606-6.
17. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. ISBN 978-5-16-016217-1.
18. Методы и модели управления промышленными предприятиями и корпорациями / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, К.А. Коренная [и др.]. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2022. 221 с. ISBN 978-5-696-05241-0.
19. Гилёв Д.В., Логиновский О.В. Модель интегральной оценки эффективности управления медицинской организацией на основе математического подхода // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 4. С. 108–122. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.4.06
20. Логиновский О.В., Гилёв Д.В. Совершенствование алгоритма управления оказанием медицинских услуг на основе комитетных методов // Прикладная математика и вопросы управления. 2020. № 4. С. 105–120. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07

References

1. Choloyan S.B., Ekimov A.K., Baigazina E.N., Molodtsov N.S., Kalinina E.A., Posnov A.A. Modern approaches to solving the tasks of management of medical organizations. *Manager of Health-care*. 2021;10:4–13. (In Russ.) DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13
2. Diener E., Emmons R.A., Larsen R.J., Griffin Sh. The Satisfaction with Life Scale. *Journal of Personality Assessment*. 1985;49(1):71–75. DOI: 10.1207/s15327752jpa4901_13
3. Peterson C., Ruch W., Beermann U., Park N., Seligman M. Strengths of character, orientation to happiness, and life satisfaction. *Journal of Positive Psychology*. 2007;2(3):149–156. DOI: 10.1080/17439760701228938
4. Seligman M. *Authentic happiness: using the new positive psychology to realize your potential for lasting fulfillment*. New York: Free Press; 2002. 321 p.
5. Tikhonova N.E. [Satisfaction with Russian life: dynamics and factors]. *Obshchestvennye nauki i sovremennost'*. 2015;3:19–33. (In Russ.)
6. Akmarov P.B., Voytovich V.Yu., Knyazeva O.P. Investment development of a region as a basis of effective government. *Bulletin of Udmurt university. Series Economics and law*. 2019;29(3):259–269. (In Russ.)
7. Glatzer W. Quality of Life in Advanced Industrialized Countries: The Case of West Germany. In: *Strack F., Argyle M., Schwarz N. (Eds.): Subjective Well-being: An Interdisciplinary Perspective*. Pergamon, Oxford; 1991. P. 261–279.
8. Ayvazyan S.A. *Analiz kachestva i obraza zhizni naseleniya* [Analysis of the quality and lifestyle of the population]. Moscow: Nauka; 2012. 432 p. (In Russ.)
9. Belovol E.V., Boyko Z.V., Shurupova E.Yu. Cognitive Factors of Life Satisfaction among the Russian Elderly. *RUDN Journal of Psychology and Pedagogics*. 2020;17(4):671–684. DOI: 10.22363/2313-1683-2020-17-4-671-684
10. Frolova E.A., Malanina V.A. An Analysis of Factors Affecting Future Perspectives and Life Satisfaction of Older Adults in Russia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019;447:105–115. (In Russ.) DOI: 10.17223/15617793/447/13
11. Nemirovskaya A.V., Soboleva N.E. Subjective well-being determinants in Russia: a regional perspective. *Vestnik instituta sotziologii*. 2020;11(2):54–81. (In Russ.) DOI: 10.19181/vis.2020.11.2.641
12. Volkova M.I. [Identification of life satisfaction factors in Russia and Europe]. *Sotsial'naya politika i sotsiologiya*. 2017;16(5(124)):6–15. (In Russ.) DOI: 10.17922/2071-3665-2017-16-5-6-15
13. Andreenkova N.V. [Comparative analysis of life satisfaction and its determining factors]. *Monitoring obshchestvennogo mneniya*. 2010;5(99):189–215. (In Russ.)
14. Voishcheva O.S. Econometric models of qualitative variables in forecasting tasks of marketing. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and management*. 2006;2:261–268. (In Russ.)
15. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. Chapter 15. Random Forests. In: *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. Springer, New York, NY. P. 587–604. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7_15
16. Loginovsky O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.) ISBN 978-5-16-013606-6.
17. Loginovsky O.V., Gollai A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective management of organizational and production structures]. Moscow: Infra-M; 2020. 450 p. (In Russ.) ISBN 978-5-16-016217-1.
18. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Korennaya K.A. et al. *Metody i modeli upravleniya promyshlennymi predpriyatiyami i korporatsiyami* [Methods and models of management of industrial enterprises and corporations]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2022. 221 p. (In Russ.) ISBN 978-5-696-05241-0.
19. Gilev D.V., Loginovskiy O.V. Integrated assessment model of medical organization management efficiency based on mathematical approach. *Applied mathematics and control sciences*. 2022;4:108–122. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2022.4.06
20. Loginovskiy O.V., Gilev D.V. Improving the algorithm for managing the provision of medical services based on committee methods. *Applied mathematics and control sciences*. 2020;4:105–120. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07

Информация об авторах

Гилёв Денис Викторович, канд. техн. наук, доц. кафедры экономики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; denis.gilev@urfu.ru.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Information about the authors

Denis V. Gilev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Economics, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia; denis.gilev@urfu.ru.

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.03.2023

The article was submitted 14.03.2023

МИГРАЦИЯ ДАННЫХ В КОНТЕКСТЕ ERP-СИСТЕМ

А.А. Максимов¹, <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

О.Л. Голубева², golubeva.ol@mail.ru

Г.И. Волович³, g_volovich@mail.ru

С.Г. Некрасов², nekrasovsg@susu.ru

¹ Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

Аннотация. В основе каждой ERP-системы лежит единая база данных, которая позволяет сотрудникам организации полагаться на один и тот же согласованный набор информации. Миграция данных является важной составляющей проектов обновления, внедрения и интеграции ERP. При этом сценарий миграции может быть сложным и длительным, требовать большого количества ресурсов и высокой компетенции руководящего персонала. Недооценка необходимых времени и усилий может привести к существенному увеличению расходов и затягиванию сроков ввода ERP в эксплуатацию. Точность и полнота передаваемых данных также имеют большое значение, поскольку многие аспекты бизнеса – удовлетворение потребностей клиентов, принятие решений, цепочка поставок и отношения с партнерами – будут зависеть от качества данных. Несмотря на это, сложность сценариев миграции данных традиционно недооценивается. В большинстве существующих исследований миграция данных рассматривается преимущественно с технической стороны. Аспекты, связанные с концептуальным содержанием миграции данных, ее взаимосвязью с бизнес-процессами и управлением компанией, а также специфической ролью миграции данных в проектах обновления, внедрения и интеграции ERP-систем, остаются недостаточно проработанными. **Цель исследования.** Целью данной работы является дополнение теоретических представлений о содержании, разнообразии, проблемах и стратегиях миграции данных в контексте ERP-систем. **Материалы и методы.** В статье приведены обобщение и систематизация видов, этапов, ключевых стратегий и наиболее значимых проблем миграции данных. В целях данного исследования был рассмотрен, переработан и дополнен материал из 23 источников на близкую тематику. **Результаты.** В работе описаны классификации видов миграции данных, приведены примеры, относящиеся к ERP. Детально описаны и дополнены этапы проекта миграции данных. Приведено сравнение двух ключевых стратегий миграции данных, выделены их преимущества и недостатки, сформированы рекомендации для применения той или иной стратегии. Рассмотрены основные проблемы миграции данных в контексте ERP-систем, последствия данных проблем для всего проекта миграции. **Заключение.** Полученные результаты позволяют утверждать, что миграция данных является сложным и трудоемким процессом, требующим серьезных компетенций от руководства и исполнителей. Стратегия миграции должна быть разработана эффективным образом с учетом всего многообразия влияющих факторов.

Ключевые слова: миграция данных, ERP-системы, внедрение ERP, качество данных

Для цитирования: Миграция данных в контексте ERP-систем / А.А. Максимов, О.Л. Голубева, Г.И. Волович, С.Г. Некрасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 118–129. DOI: 10.14529/ctcr230310

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230310

DATA MIGRATION IN THE CONTEXT OF ERP

A.A. Maksimov¹, <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

O.L. Golubeva², golubeva.ol@mail.ru

G.I. Volovich³, g_volovich@mail.ru

S.G. Nekrasov², nekrasovsg@susu.ru

¹ State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³ LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

Abstract. At the heart of every ERP is a single database that allows employees of the organization to rely on the same consistent set of information. Data migration is an important component of ERPs upgrade, implementation and integration projects. At the same time, the migration scenario can be complex and lengthy, require a large amount of resources and high competencies of the management staff. Underestimating the required time and effort can lead to a significant increase in costs and delay in the commissioning of the ERP. The accuracy and completeness of the transmitted data is also of great importance, since many aspects of the business – customer satisfaction, decision-making, supply chain and relationships with partners – will depend on the quality of the data. Despite this, the complexity of data migration scenarios is traditionally underestimated. In most existing studies, data migration is considered mainly from the technical side. Aspects related to the conceptual content of data migration, its relationship with business processes and company management, as well as the specific role of data migration in projects of updating, implementing and integrating ERPs, remain insufficiently developed. **The aim of the study.** The aim of this study is to supplement theoretical ideas about the content, diversity, problems and strategies of data migration in the context of ERPs. **Materials and methods.** The article summarizes and systematizes the types, stages of the project, key strategies and the most significant problems of data migration. For the purposes of this study, the material from 23 sources on a similar topic was reviewed, revised and supplemented. **Results.** The paper describes classifications of types of data migration, provides examples related to ERP. The stages of the data migration project are described in detail and supplemented. The comparison of two key data migration strategies is given, their advantages and disadvantages are highlighted, recommendations for the application of a particular strategy are formed. The main problems of data migration in the context of ERPs, the consequences of these problems for the entire migration project are considered. **Conclusion.** The results obtained suggest that data migration is a complex and time-consuming process that requires serious competencies from management and performers. The migration strategy should be developed in an effective way and take into account all the variety of influencing factors.

Keywords: data migration, ERP systems, ERP implementation, data quality

For citation: Maksimov A.A., Golubeva O.L., Volovich G.I., Nekrasov S.G. Data migration in the context of ERP. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3): 118–129. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230310

Введение

Как известно, миграция данных – это процесс перемещения данных между различными структурами, форматами, хранилищами данных или приложениями.

ERP-системы, которые являются на сегодняшний день базовой интеграционной платформой для данных и бизнес-процессов организации, часто выполняют роль источников или целевой системы для миграции, а также имеют встроенные инструменты автоматизации процессов миграции.

Вопросам развития ERP-систем посвящено очень большое количество публикаций, в том числе и авторов данной статьи [1–4].

Целый ряд публикаций посвящен миграции данных, наиболее разработанными темами являются алгоритмы миграции данных [5–9] и подходы к разработке программных инструментов миграции [10, 11], а также значительное внимание уделяется вопросам переноса данных между раз-

личными технологиями хранения или моделями данных [12–17]. Большинство из этих источников предполагают не только физическую миграцию данных между различными хранилищами данных, но и процедуру перепроектирования схемы данных.

Гораздо меньше публикаций посвящено концептуальному содержанию миграции данных, ключевым этапам, стратегиям и значению миграции в общем контексте использования информационных систем. Здесь можно отметить фундаментальную работу [18], в которой детально описываются этапы и стратегии миграции, сценарии тестирования, возникающие проблемы и скрытые затраты. Другой важной основой для такого исследования послужила работа [13], которая изучает содержание понятия миграции данных, значение данной концепции, ключевые проблемы и причины неудач сценариев миграции.

Миграция данных в контексте ERP на сегодняшний день не получила должного внимания. Стоит отметить работу [19], посвященную взаимосвязи миграции и бизнес-процессов организации, и [20, 21], связанные с проектами переноса данных между устаревшей и новой ERP.

Необходимо также отметить, что за рубежом данной теме уделяется гораздо большее внимание, а публикации на русском языке практически отсутствуют. Достаточно долгое время миграция данных недооценивалась, не обеспечивалась достаточными ресурсами и не рассматривалась с учетом ее важности [13].

В данной статье поставлена цель дополнить теоретические представления о содержании, разнообразии, проблемах и стратегиях миграции данных в контексте ERP-систем.

Содержание сценария миграции данных

Содержание сценария миграции заключается в переносе и размещении данных из одного или нескольких источников в систему-приемник, либо в переносе и размещении данных из источника в одну или несколько систем-приемников (целевых систем).

Необходимо отметить, что миграция подразумевает не только перенос данных (выгрузку и загрузку), но и их размещение в системе-приемнике, то есть встраивание в уже существующие данные и процессы.

ERP в сценариях миграции может быть как одним из источников данных, так и целевой или одной из целевых систем.

При этом миграция данных подразумевает изменение технологии хранения (например, MS SQL на MongoDB), программного приложения (например, SAP ERP на 1C:ERP), структуры или формата данных (например, при обновлении ERP изменяются добавляются новые таблицы, изменяется количество и содержание полей таблиц и т. п.).

Виды миграции данных

Существует большое разнообразие видов миграции в контексте ERP, которые необходимо рассмотреть, прежде чем принимать решение о стратегии миграции.

По целевому назначению мы предлагаем рассматривать миграцию следующих видов (см. рисунок).

1. Миграция обновлений: является частью процесса обновления и перехода на новую версию [22]. Информационная система в данном случае сама является как источником, так и приемником данных. При этом в ходе обновления должны изменяться формат или структура данных.

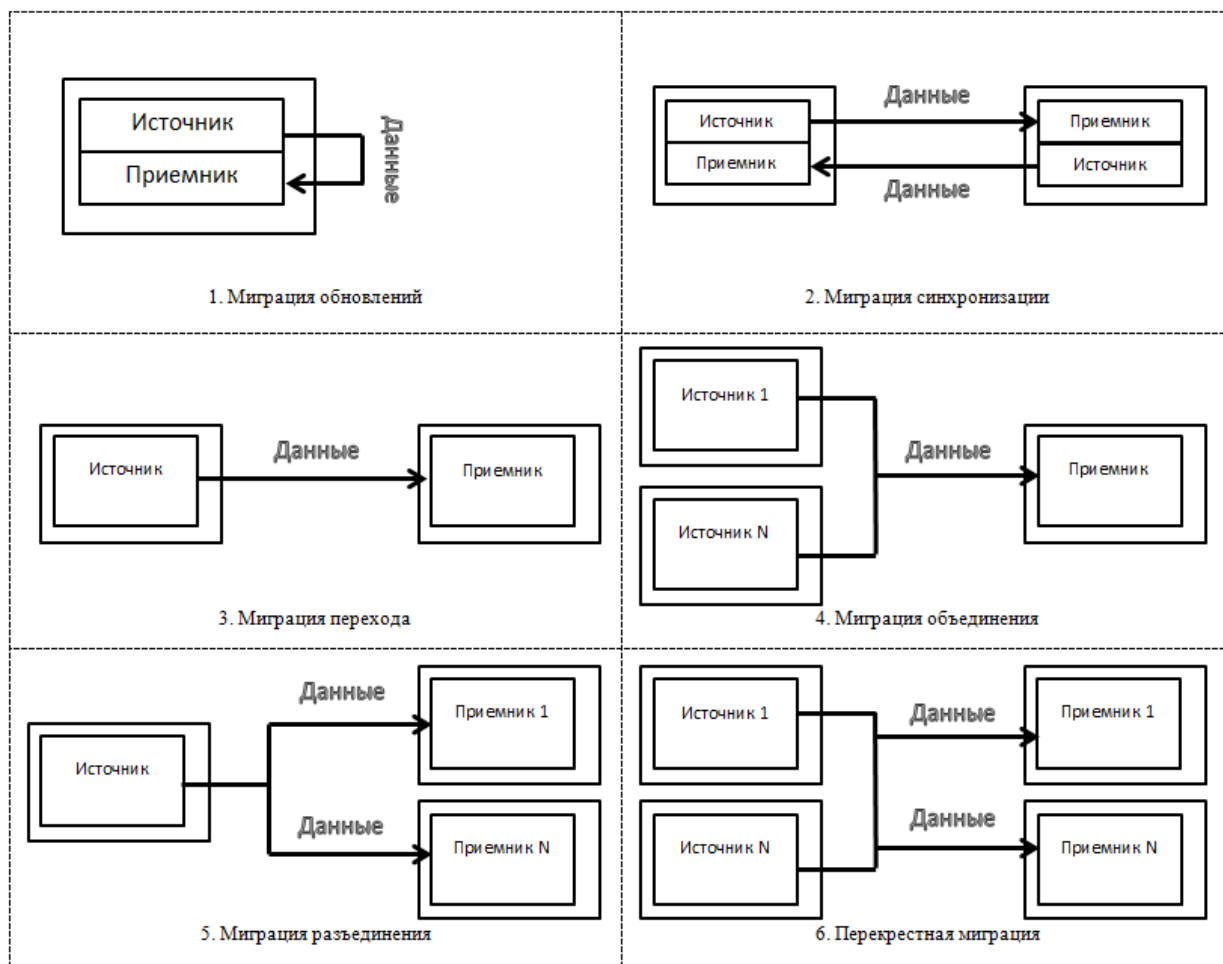
2. Миграция синхронизации: представляет собой двусторонний обмен данными между различными системами для их согласования. При этом обе системы могут быть как источником, так и приемником данных. Обе системы продолжают функционирование после обмена данными. Данный вид миграции обычно связан с необходимостью регулярного обмена данными с внешними информационными системами, хранилищами данных и сервисами (приложениями для бизнес-аналитики, базой данных интернет-магазина и т. п.).

3. Миграция перехода: данные переносятся из устаревшей в новую информационную систему. После завершения миграции старая система перестает функционировать. Потребность в такой миграции может возникать при внедрении ERP или, наоборот, переходе с ERP на другие виды информационных систем (CRM, FRM, HRM и т. д.). Эта процедура может быть как добровольной (если организация отказывается от устаревшего программного обеспечения и т. п.), так и вынужденной (если разработчик существующей системы отказался от поддержки и т. д.).

4. Миграция объединения (интеграции): несколько исходных систем интегрируются в одну целевую систему [22].

5. Миграция разъединения: данные из исходных систем переносятся в несколько целевых систем.

6. Перекрестная (кросс) миграция: данные из нескольких исходных систем переносятся в несколько целевых систем.



Виды миграции данных по целевому назначению
Types of data migration for the intended purpose

По отношению к границам информационной системы миграция может быть:

– внутренней: если данные не пересекают границы системы, к данному виду относится миграция обновления;

– внешней: если данные выгружаются во внешние системы.

По отношению к объему исходных данных миграция может быть:

– полной: все данные исходной системы переносятся в целевую;

– частичной: переносятся только отдельные массивы данных.

По направлению данных мы можем различать миграцию:

– одностороннюю: каждая система является только приемником или только источником;

– двустороннюю: каждая система является и приемником, и источником данных.

По количеству участвующих систем можно выделить миграцию:

– одноканальную: в сценарии миграции участвует одна система, которая является и источником, и приемником;

– двухканальную: в сценарии миграции участвует две системы;

– многоканальную: в сценарии миграции участвует более двух систем.

По отношению ко времени протекания миграция может быть:

- единовременная: все данные выгружаются и загружаются единовременно;
- регулярная: данные выгружаются и загружаются периодически;
- многоэтапная: данные выгружаются и загружаются постепенно, в несколько итераций.

По отношению к используемой технологии хранения [23] миграция может быть:

- однородная: исходная и целевая система используют одну и ту же технологию хранения данных (MySQL, Oracle, PostgreSQL и т. п.) и/или одинаковую структуру;
- неоднородная: миграция, при которой исходная и целевая базы данных принадлежат разным технологиям баз данных, например, миграция с базы данных MS SQL на MongoDB. Разнородная миграция базы данных может осуществляться между идентичными моделями данных (например, с реляционной на реляционную) или между различными моделями данных (например, с реляционной на нереляционную).

По отношению к уровню автоматизации процессов можно выделить виды миграции:

- ручная: данные переносятся без использования автоматизированных алгоритмов и цифровых инструментов;
- автоматическая: данные переносятся с использованием автоматизированных алгоритмов и цифровых инструментов;
- полуавтоматическая: часть данных переносится с использованием автоматизированных алгоритмов и цифровых инструментов, другая часть вводится вручную.

Этапы сценария миграции данных

В зависимости от предполагаемого вида миграции этапы сценария могут существенно различаться, но на основе собственно опыта разработки и внедрения ERP, а также исследований [18] авторы предлагают следующую усредненную последовательность этапов миграции данных в контексте ERP.

1. Предъявление требований. Это начальная фаза сценария миграции, на которой определяются [22]:

- цели и планируемые результаты миграции (в том числе критерии принятия миграции);
- заинтересованные стороны (стейкхолдеры) миграции;
- количество и общие характеристики систем, которые будет участвовать в обмене данными;
- направление и порядок миграции;
- объем миграции (полная или частичная);
- перечень данных, предъявляемых к миграции.

2. Определение структуры данных в источнике.

Этап предполагает выбор данных, подлежащих миграции в системах-источниках, определение структуры данных, анализ взаимосвязей данных и бизнес-процессов.

3. Сопоставление структуры данных с целевой системой.

На данном этапе структуры данных из источника и целевой системы сопоставляются и адаптируются друг к другу при необходимости [22], происходит:

- сопоставление таблиц;
- сопоставление полей (в том числе типы полей, размеры, ограничения и т.п.);
- сопоставление взаимосвязей;
- адаптация структур данных или изменение требований.

4. Оценка качества и подготовка данных.

Этап предполагает проведение глубокого анализа данных и преобразование их в случае необходимости:

- оценка качества и очистка данных (исправление неверных, дублирующихся, непоследовательных, противоречивых, неправильно отформатированных или нерелевантных данных) [22];
- форматирование слабоструктурированных и неструктурированных данных.

5. Проектирование инструментов миграции.

На данном этапе формируются основные принципы и подходы к проектированию инструментов миграции:

- сценарии согласования данных [16];

– правила конвертации (преобразования) данных;
– принципы и подходы к выявлению и обработке ошибок, исключений и предупреждений (например, принципы работы с отсутствующими и несогласованными данными и т. п.).

6. Разработка программных инструментов миграции.

После завершения этапа проектирования начинается работа над созданием программных инструментов миграции, организация промежуточного хранилища данных, а также настройка инструментов миграции для выбранных систем.

7. Тестирование программных инструментов миграции.

На данном этапе происходит отладка программных инструментов миграции на тестовых наборах данных:

- разработка модульных тестов;
- тестовое извлечение и загрузка данных;
- проверка и сопоставление объема и качества загруженных данных;
- оценка производительности программных инструментов;
- анализ и исправление алгоритмических ошибок (потери данных, нарушение целостности и т. п.).

8. Извлечение и преобразование данных.

На данном этапе нужные данные из системы-источника извлекаются и помещаются в файл или промежуточную среду. В процессе извлечения данные преобразуются в соответствии с установленными правилами.

9. Загрузка и проверка данных.

Этап предполагает массовую загрузку извлеченных данных в целевую систему с использованием программных инструментов миграции, а также выполнение процедур автоматической проверки полученных данных, происходит фиксация и оценка критичности ошибок.

10. Размещение данных.

Этап размещения данных предполагает:

- встраивание загруженных данных в уже существующие в системе данные и бизнес-процессы;
- ручное или программное исправление ошибок;
- проверка качества данных пользователями системы.

11. Оценка результатов миграции.

На данном этапе происходит оценка результатов и принятие решения о будущем сценария миграции:

- завершении: если результаты миграции принимаются;
- продолжении: если результаты миграции требуют дополнительных манипуляций с данными;
- откате: если результаты миграции неудовлетворительны.

12. Завершение миграции.

В случае если на предыдущем этапе принято решение о завершении миграции, сценарий закрывается. При необходимости готовится документация и отключаются устаревшие системы.

Необходимо отметить, что этапы сценария могут следовать как последовательно (каскадная модель), так и иметь глобальные или локальные циклические структуры (V-образная модель, инкрементная модель). Ввиду наличия сложных взаимосвязей между данными и бизнес-процессами миграцию данных вряд ли можно реализовать, используя гибкие методологии проектирования.

Стратегии миграции данных

Следует выделить две принципиальные стратегии миграции: единовременную и инкрементную, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки.

1. Стратегия единовременного перехода.

При использовании стратегии единовременного перехода компания готовит масштабный сценарий миграции, который реализуется от начала и до конца по заранее определенному сценарию. Весь массив данных выгружается за один раз в течение короткого периода времени.

Стратегия единовременного перехода может быть основана на каскадной или V-образной модели, которая также подразумевает последовательное выполнение, но при этом предполагает тестирование и проверку различных этапов миграции, начиная с первых стадий разработки.

2. Инкрементная стратегия.

При инкрементной миграции данные из старой системы переносятся и размещаются в несколько итераций [22]. Здесь возможны два варианта.

– Новая система предлагает полную функциональность, но доступна только ограниченной группе пользователей. Группа пользователей расширяется с каждой итерацией сценария миграции.

– Предоставление частичных функций, но для всех пользователей. Пользователи работают параллельно на новых и старых системах. С каждым шагом функциональность новой системы расширяется до тех пор, пока старая система не будет полностью заменена [18]

Каждая из стратегий имеет свои преимущества и недостатки, представленные в таблице. Данная информация основана на сравнении, приведенном в [24], но существенно доработана и дополнена.

Сравнение стратегий миграции данных
Comparison of data migration strategies

Стратегия единовременного перехода	Инкрементная стратегия
Стоимость и сроки проекта определены заранее	Стоимость и сроки проекта сложно спрогнозировать, проект может растянуться на неопределенное время
Управленческие усилия направлены преимущественно на планирование сценария перехода	Управленческие усилия направлены преимущественно на координацию и контроль
Для положительного результата необходимо наличие четко структурированных и согласованных требований	Требования могут быть не определены заранее, либо меняться в процессе
Пользователи работают только в новой системе, старая система отключается	Новые и старые системы работают параллельно, происходит регулярное согласование данных между ними
Эксплуатационные затраты касаются только новой системы	Требуются существенные затраты как на эксплуатацию новой системы, так и на поддержание старой системы
Пользователей необходимо комплексно подготовить к новым способам работы с данными	Пользователи могут постепенно привыкать к новым способам работы с данными
В случае обнаружения ошибок или появления проблем с размещением данных возможны существенные простои в работе	Пользователи могут временно использовать старую систему как основную в случае возникающих проблем
Единичный простой при масштабном переносе данных	Многочисленные простои (при проведении каждой следующей итерации переноса данных)
Высокие риски миграции из-за большого объема единовременно перемещаемых данных	Сведение к минимуму рисков миграции за счет перемещения меньшего объема данных
Стратегии отката могут быть сложными, особенно если проблемы обнаруживаются через некоторое время после события миграции	Стратегии отката легко реализуемы

Таким образом, стратегия единовременного перехода может быть рекомендована организациям в случае:

- небольшого объема данных;
- наличия четких требований и понятных соответствий между данными;
- одинаковой структуры данных и принципов работы между новой и старой системами;
- наличия типовых инструментов миграции (например, при обмене данными между типовыми конфигурациями 1С);

- готовности компании к существенным единовременным затратам;
 - отсутствия требований к высокой надежности и бесперебойной работе системы.
- Инкрементная стратегия, наоборот, может быть рекомендована в случаях:
- большого объема данных и наличия сложных взаимосвязей между ними;
 - отсутствия четких требований или сложности их формирования ввиду серьезных отличий в организации данных между старой и новой системой;
 - наличия существенных различий между новой и старой системой;
 - отсутствия типовых инструментов миграции;
 - неготовности компании к существенным единовременным затратам;
 - бизнес-процессы компании требуют высокой надежности систем.

Проблемы миграции данных

Миграция данных как сложный и многоплановый процесс сталкивается с большим числом разнообразных проблем, ключевыми из которых можно считать следующие.

1. Качество исходных данных

Системы-источники могут содержать неточные, неполные, дублирующие или противоречивые данные [24].

Существует много причин низкого качества данных [22].

– Сбор данных. Причинами низкого качества данных может быть неверный выбор пользователями полей для ввода (например, путаница в полях имени и фамилии), опечатки, игнорирование масок ввода (например, для номера телефона), отсутствие проверки ввода дублирующих данных и т. д. Большинство этих ошибок возникают из-за плохого дизайна интерфейса или низкого качества программного кода самой ERP-системы. Источником проблем может стать также импорт некачественных данных из внешних систем (например, реквизиты клиента, введенные им в личном кабинете на веб-сайте).

– Процессы. Процессы становятся причиной низкого качества данных, если они неверны или неполны (например, неправильная обработка данных или отсутствие процедур проверки). Источником проблемы здесь могут быть как программные ошибки, так и неверная формализация бизнес-процессов на этапе подготовки технического задания.

– Истечение срока действия данных. Этот фактор возникает, поскольку определенные данные могут утратить актуальность по истечении определенного периода (цены, контактные данные, скидки и т. п.).

Поскольку массивы данных используются ERP-системой автоматически, противоречивая, неправильная или неполная информация часто распознается очень поздно и приводит к повторяющимся ошибкам. После ввода в систему несколько отделов и общекорпоративных приложений получают доступ к информации и используют ее повторно. Таким образом, даже небольшая ошибка в данных может затронуть всю компанию, вызывая последующие ошибки и провоцируя неправильные решения. В данном случае интеграционная функция ERP имеет негативные последствия.

Плохое качество данных в исходной системе может приводить к неверной работе алгоритмов миграции, сбоям в обработке, потере данных, ошибкам в целевой системе.

В качестве решения данной проблемы на сегодняшний день доступны мощные методы и инструменты обеспечения качества данных. Приложив разумные усилия, руководство и технические специалисты могут выявить проблемы с качеством данных и сосредоточиться на их устранении до начала выгрузки данных.

2. Сопоставление данных

Структура данных в исходной и целевой системе может существенно различаться. Данные из исходной системы могут не отображаться непосредственно в целевую систему из-за ее структуры, и несколько баз данных-источников могут иметь разные модели данных [24]. Кроме того, данные в исходных системах могут иметь разное форматирование или быть представлены не так, как в целевой системе.

Поэтому часто требуется преобразование данных, что может привести к несоответствиям и, следовательно, к низкому качеству данных в целевой системе [18]. Помимо преобразования дан-

ных может потребоваться также изменение структуры целевой системы, особенно если исходная и целевая системы имеют разные модели [23].

Решение данной проблемы потребует значительных усилий по предварительному анализу и сопоставлению данных. Здесь могут помочь автоматизированные программные алгоритмы, но они пока не способны дать решение в случае принципиальных расхождений в структуре данных.

3. Размещение данных

С окончанием загрузки данных в целевую систему сценарий миграции не заканчивается. Данные необходимо разместить и встроить в существующие бизнес-процессы. Бизнес-правила, логика и стандарты исходной и целевой системы могут существенно различаться, что приводит к дополнительным сложностям.

На текущий момент все процедуры размещения выполняются преимущественно вручную и слабо автоматизированы. Причем за большую часть из них отвечают рядовые пользователи, ответственные за определенные бизнес-процессы, а не технические специалисты.

4. Управление сценарием миграции

Миграция данных является сложным процессом, который требует высокого уровня управленческих компетенций. Большинство сценариев по миграции данных будет иметь стратегическое значение для организации в связи с переходом на новую ERP-систему. Это потребует самоотверженности и хорошо спланированной координации, чтобы уложиться в график переноса данных, поскольку сбои на любом этапе повлияют на проект в целом.

В инкрементных стратегиях многие задачи миграции данных, такие как оценка качества данных, проверка, очистка и т. д., должны выполняться итеративно [24], и по результатам данной проверки могут происходить изменения алгоритмов и настроек программных инструментов миграции.

К проблемам может приводить также отсутствие должного внимания к миграции данных [13]. Во многих компаниях сценарии миграции данных терпят неудачу из-за того, что их важность и сложность не воспринимались достаточно серьезно [22].

Чтобы предотвратить проблемы вследствие неэффективного управления, организациям нужна надежная и последовательная методология, позволяющая планировать, проектировать, координировать и проверять правильность миграции. Организации нужны надежные цифровые инструменты, чтобы держать под контролем все моменты проектирования, оценки и выполнения сценария миграции. К сожалению, на данный момент специальных программных инструментов для управления и координации сценариев миграции не разработано.

Заключение

Миграция данных происходит повсеместно, поскольку компании переходят от устаревших систем к более актуальным решениям, от локальных инфраструктур и приложений к облачным хранилищам и облачным приложениям для оптимизации или преобразования своего бизнеса. Всякий раз, когда компании внедряют и обновляют ERP-системы, им приходится переносить и размещать существующие данные.

В процессе миграции необходимо учитывать множество факторов, в том числе: объем и качество данных, различия в структуре данных и функциональных возможностях, эффективность алгоритмов, наличие автоматизированных инструментов и т. д. [13]. Поэтому разработка стратегии и сценария миграции является важной исследовательской задачей и серьезным бизнес-кейсом по менеджменту внутренних процессов организации, предполагающим разработку этапов, подготовку инструментов, системы контроля и оценки эффективности миграции [25, 26].

Организации должны относиться к сценариям миграции с должным вниманием, так как миграция данных является одной из наиболее сложных и требовательных составляющих проектов обновления, внедрения и интеграции ERP-систем.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются изучение подходов и принципов управления инкрементными стратегиями миграции данных, разработка алгоритмов и программных инструментов координации и контроля для данного типа стратегий. В контексте ERP-систем важной задачей является также автоматизация размещения данных и разработка средств проверки эффективности размещения в соответствии с критичностью различных бизнес-процессов.

Список литературы

1. Логиновский О.В., Максимов А.А. Корпоративное управление: науч. изд. М.: Машиностроение, 2007. 624 с.
2. Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление группой предприятий. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2008. 480 с.
3. Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление промышленным предприятием: науч. изд. М.: Машиностроение, 2006. 576 с.
4. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. [под ред. О.В. Логиновского]. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
5. Algorithms for Data Migration / E. Anderson, J. Hall, J. Hartline et al. // *Algorithmica*. 2010. Vol. 57. P. 349–380. DOI: 10.1007/s00453-008-9214-y
6. An experimental study of data migration algorithms / E. Anderson, J. Hall, J. Hartline et al. // *Proceedings of the Workshop on Algorithm Engineering (WAE)*. 2001. P. 145–158. DOI: 10.1007/3-540-44688-5_12
7. On algorithms for efficient data migration / J. Hall, J. Hartline, A. Karlin et al. // *Proceedings of the ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*. 2001. P. 620–629.
8. Khuller S., Kim Y., Wan Y. Algorithms for data migration with cloning // *SIAM J. Comput.* 2004. Vol. 33 (2). P. 448–461. DOI: 10.1137/S009753970342585X
9. Khuller S., Kim Y., Malekian A. Improved algorithms for data migration // *Proceedings of the International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization Problems (APPROX)*. 2006. P. 164–175.
10. Грушицын А.С. Создание трассы при миграции базы данных // *Системные технологии*. 2016. № 21. С. 51–55.
11. Нефедова И.В. Тестирование кода при переносе базы данных // *Системные технологии*. 2016. № 20. С. 96–100.
12. Alotaibi O., Pardede E. Transformation of Schema from Relational Database (RDB) to NoSQL Databases // *Data*. MDPI. 2019. Vol. 4 (4). P. 148–159. DOI: 10.3390/data4040148
13. Goyal V., Jain A., Gupta V.K. Data Migration & its Issues. URL: https://www.researchgate.net/publication/256502376_Data_Migration_its_Issues (дата обращения: 25.04.2023).
14. Hanine M., Bendarag A., Boutkhoum O. Data Migration Methodology from Relational to NoSQL Databases // *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information, Engineering*. 2015. Vol. 9 (12). P. 2566–2570. DOI: 10.5281/zenodo.1339211
15. Model Transformation and Data Migration from Relational Database to MongoDB / T. Jia et al. // *Conference: 2016 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*. 2016. P. 60–67. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2016.16
16. Mason R.T. NoSQL databases and data modeling techniques for a document-oriented NoSQL database // *Conference: Proceedings of Informing Science & IT Education Conference (InSITE) 2015*. 2015. P. 259–268. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2016.16
17. Королева Ю.А., Маслова В.О., Козлов В.К. Разработка концепции миграции данных между реляционными и нереляционными системами БД // *Программные продукты и системы*. 2019. № 1. С. 63–67. DOI: 10.15827/0236-235X.125.063-067
18. Sarmah S.S. Data Migration // *Science and Technology*. 2018. Vol. 8 (1). P. 1–10. DOI: 10.5923/j.scit.20180801.01
19. Ratings migration and the business cycle, with application to credit portfolio stress testing / A. Bangia, F.X. Diebold, A. Kronimus et al. // *Journal of banking & finance*. 2002. Vol. 26(2-3). P. 445–474. DOI: 10.2139/ssrn.231152
20. An overview of legacy information system migration / J. Bisbal, D. Lawless, B. Wu et al. // *Software Engineering Conference and International Computer Science Conference*. 1997. P. 529–530. DOI: 10.1109/APSEC.1997.640219
21. Legacy system migration: A legacy data migration engine / B. Wu, D. Lawless, J. Bisbal et al. // *Proceedings of the 17th International Database Conference (DATASEM'97)*. 1997. P. 129–138. DOI: 10.1109/APSEC.1997.640188

22. Azeroual O., Jha M. Without Data Quality, There Is No Data Migration // *Big Data and Cognitive Computing*. 2021. Vol. 5 (24). P. 1–12. DOI: 10.1007/978-981-19-5209-8_2
23. Peretiatko M., Shirokopetleva M., Lesna N. Research of methods to support data migration between relational and document data storage models // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2022. Vol. 2 (20). P. 64–74. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.064
24. Thalheim B., Wang Q. Towards a Theory of Refinement for Data Migration // *Part of the Lecture Notes in Computer Science book series (LNISA, volume 6998)*. 2011. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.datak.2012.12.003
25. Ceresnak R., Dudas A., Matiasko K. Mapping rules for schema transformation: SQL to NoSQL and back // *International Conference on Information and Digital Technologies*. 2021. P. 52–58. DOI: 10.1109/IDT52577.2021.9497629
26. Matthes F., Schulz C., Haller K. Testing & quality assurance in data migration projects // *2011 27th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM)*. 2011. P. 438–447. DOI: 10.1109/ICSM.2011.6080811

References

1. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Korporativnoe upravlenie: nauch. izd.* [Corporate governance: scientific edition]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2007. 624 p. (In Russ.)
2. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie gruppy predpriyatiy* [Management of a group of enterprises]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2008. 480 p. (In Russ.)
3. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie promyshlennym predpriyatiem: nauch. izd.* [Industrial enterprise management: scientific edition]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2006. 576 p. (In Russ.)
4. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems: monograph]. Moscow: Infra-M Publ.; 2018. 410 p. (In Russ.)
5. Anderson E., Hall J., Hartline J. et al. Algorithms for Data Migration. *Algorithmica*. 2010;57:349–380. DOI: 10.1007/s00453-008-9214-y
6. Anderson E., Hall J., Hartline J. et al. An experimental study of data migration algorithms. In: *Proceedings of the Workshop on Algorithm Engineering (WAE)*. 2001. P. 145–158. DOI: 10.1007/3-540-44688-5_12
7. Hall J., Hartline J., Karlin A., Saia J., Wilkes J. On algorithms for efficient data migration. In: *Proceedings of the ACM-SLAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*. 2001. P. 620–629.
8. Khuller S., Kim Y., Wan Y. Algorithms for data migration with cloning. *SIAM J. Comput.* 2004;33(2):448–461. DOI: 10.1137/S009753970342585X
9. Khuller S., Kim Y., Malekian A. Improved algorithms for data migration. In: *Proceedings of the International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization Problems (APPROX)*. 2006. P. 164–175.
10. Grushitsyn A.S. [Creating a route during database migration]. *System technologies*. 2016;21:51–55. (In Russ.)
11. Nefedova I.V. [Code testing during database migration]. *System technologies*. 2016;20:96–100. (In Russ.)
12. Alotaibi O., Pardede E. Transformation of Schema from Relational Database (RDB) to NoSQL Databases. *Data. MDPI*. 2019;4(4):148–159. DOI: 10.3390/data4040148
13. Goyal V., Jain A., Gupta V.K. *Data Migration & its Issues*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/256502376_Data_Migration_its_Issues (accessed 25.03.2023).
14. Hanine M., Bendarag A., Boutkhoum O. Data Migration Methodology from Relational to NoSQL Databases. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information, Engineering*. 2015;9(12):2566–2570. DOI: 10.5281/zenodo.1339211
15. Jia T. et al. Model Transformation and Data Migration from Relational Database to MongoDB. In: *Conference: 2016 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*. 2016. P. 60–67. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2016.16
16. Mason R.T. NoSQL databases and data modeling techniques for a document-oriented NoSQL database. In: *Conference: Proceedings of Informing Science & IT Education Conference (InSITE) 2015*. 2015. P. 259–268. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2016.16

17. Koroleva Yu. A., Maslov V. O., Kozlov V. K. Development of the concept of data migration between relational and non-relational database systems. *Software & Systems*. 2019;1:63–67. (In Russ.) DOI: 10.15827/0236-235X.125.063-067
18. Sarmah S.S. Data Migration. *Science and Technology*. 2018;8(1):1–10. DOI: 10.5923/j.scit.20180801.01
19. Bangia A., Diebold F.X., Kronimus A., Schagen C., Schuermann T. Ratings migration and the business cycle, with application to credit portfolio stress testing. *Journal of banking & finance*. 2002;26(2-3):445–474. DOI: 10.2139/ssrn.231152
20. Bisbal J., Lawless D., Wu B. et al. An overview of legacy information system migration. In: *Software Engineering Conference and International Computer Science Conference*. 1997. P. 529–530. DOI: 10.1109/APSEC.1997.640219
21. Wu B., Lawless D., Bisbal J. et al. Legacy system migration: A legacy data migration engine. In: *Proceedings of the 17th International Database Conference (DATASEM'97)*. 1997. P. 129–138. DOI: 10.1109/APSEC.1997.640188
22. Azeroual O., Jha M. Without Data Quality, There Is No Data Migration. *Big Data and Cognitive Computing*. 2021;5(24):1–12. DOI: 10.1007/978-981-19-5209-8_2
23. Peretiatko M., Shirokopetleva M., Lesna N. Research of methods to support data migration between relational and document data storage models. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2022;2(20):64–74. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.064
24. Thalheim B., Wang Q. Towards a Theory of Refinement for Data Migration. *Part of the Lecture Notes in Computer Science book series (LNISA, volume 6998)*. 2011. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.datak.2012.12.003
25. Ceresnak R., Dudas A., Matiasko K. Mapping rules for schema transformation: SQL to NoSQL and back. In: *International Conference on Information and Digital Technologies*. 2021. P. 52–58. DOI: 10.1109/IDT52577.2021.9497629
26. Matthes F., Schulz C., Haller K. Testing & quality assurance in data migration projects. In: *2011 27th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM)*. 2011. P. 438–447. DOI: 10.1109/ICSM.2011.6080811

Информация об авторах

Максимов Александр Александрович, д-р техн. наук, депутат, Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия.

Голубева Ольга Леонидовна, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; golubeva.ol@mail.ru.

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; g_volovich@mail.ru.

Некрасов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru.

Information about the authors

Alexander A. Maksimov, Dr. Sci. (Eng.), Deputy, State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia.

Olga L. Golubeva, Postgraduate Student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; golubeva.ol@mail.ru.

Georgiy I. Volovich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; g_volovich@mail.ru.

Sergey G. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 29.04.2023

The article was submitted 29.04.2023

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
 - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
 - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
 - электронный адрес автора (e-mail);
 - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);
- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки); 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
2023. Том 23, № 3

16+

Редакторы: *С.И. Уварова, В.И. Ибраева*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.07.2023. Дата выхода в свет 09.08.2023. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 15,34. Тираж 500 экз. Заказ 203/234. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.