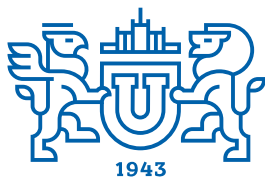


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2025
Т.25, № 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);
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);
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

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

2025

Vol. 25, no. 3

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;

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;

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. Krasovsky 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;

Shiryaev 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

ВАХИТОВ М.Г., ПОРТНОВ А.В., НИКОЛАЕВ А.Н. Применение нейросетевых алгоритмов обработки информации в автономных системах видеомониторинга	5
КОПОТЕВА А.В., ЗАТОНСКИЙ А.В., МАМАЕВ Д.А. Применение математического пакета для разработки и визуализации решения задачи аналитической геометрии с параметром	16
БЕЛЯКОВА В.А., ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ШИНКАРЕВ А.А. Онтологический инжиниринг в управлении ресурсом оборудования наукоемкого производства	26
СЕРОВА В.С., ГОЛЛАЙ А.В., БУНОВА Е.В. Гибридный метод классификации текстовых данных с узкоспециализированной терминологией	42

Управление в социально-экономических системах

АЛЕКСЕЕВА И.Е., МЕЗИН Е.А., АЛЕКСЕЕВ А.О. Декомпозиция ценообразующих факторов на основе статистического анализа экспертных оценок их значимости	53
ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ГОЛУБЕВА О.Л. Модель инкрементной миграции данных в проектах внедрения ERP-систем	64
БАРКАЛОВ С.А., БЕЛОУСОВ А.В., ПУЖАНОВА Е.О. Алгоритмы управления рисками в ИТ-проектах	77
КОЗЛОВ А.А., ШЕВЦОВ М.В., ДЕНИСОВ А.Н. Синтез центров компетенций МЧС России в области обеспечения пожарной безопасности	87

Краткие сообщения

КИБАЛОВ Е.Б., ГЕЛЬРУД Я.Д. Мост «материк – Сахалин»: проблемы сооружения на современном этапе	99
МАКСИМОВА В.Н., МАКАРОВСКИХ Т.А. Технология определения оптимального использования проблемных объектов природопользования на основе управления геоинформацией в целях пространственного развития территории	108

Персоналии

Памяти Владимира Николаевича Буркова	116
--	-----

CONTENTS

Informatics and computer engineering

VAKHITOV M.G., PORTNOV A.V., NIKOLAEV A.N. Application of neural network algorithms information processing in autonomous video monitoring systems	5
KOPOTEVA A.V., ZATONSKIY A.V., MAMAEV D.A. Mathematical software application for an analytical geometry problem with a parameter solving and visualization	16
BELIAKOVA V.A., LOGINOVSKIY O.V., SHINKAREV A.A. Ontology-based equipment resource control in knowledge-intensive manufacturing	26
SEROVA V.S., HOLLAY A.V., BUNOVA E.V. Hybrid method of classification of text data with specialized terminology	42

Control in social and economic systems

ALEKSEEVA I.E., MEZIN E.A., ALEKSEEV A.O. Decomposition of price-forming factors based on statistical analysis of expert assessments of their significance	53
LOGINOVSKIY O.V., GOLUBEVA O.L. Model of incremental data migration in ERP implementation projects	64
BARKALOV S.A., BELOUSOV A.V., PUZHANOVA E.O. Control algorithms risks in IT projects	77
KOZLOV A.A., SHEVTSOV M.V., DENISOV A.N. Synthesis of competence centers of the Russian Federation EMERCOM in the field of fire safety	87

Brief reports

KIBALOV E.B., GELRUD Ya.D. Bridge “mainland – Sakhalin”: Problems of construction at the present stage	99
MAKSIMOVA V.N., MAKAROVSKIYKH T.A. Technology for determining the optimal use of problematic natural resource management objects based on geoinformation management for the purpose of spatial development of the territory	108

Personalia

In memory of Vladimir Nikolaevich Burkov	116
--	-----

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.93'12

DOI: 10.14529/ctcr250301

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ВИДЕОМОНИТОРИНГА

М.Г. Вахитов^{1,2}, vakhitovmg@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1286-3888>

А.В. Портнов², portnovav@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2649-219X>

А.Н. Николаев², nikolaevan@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9466-8847>

¹ АО «Челябинский радиозавод «Полет», Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена проблеме обработки видеoinформации с использованием нейросетей в автономных системах в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. **Цель исследования.** Целью статьи является исследование алгоритмов обработки видеoinформации в автономных системах с ограниченными вычислительными ресурсами на основе двухэтапной обработки данных. На первом этапе проводится определение контуров наблюдаемых объектов с помощью традиционных методов выделения ключевых признаков. Второй этап включает обработку с использованием нейросетевых алгоритмов, нацеленных на классификацию и распознавание объектов. Благодаря первичной обработке видеопотока существенно снижается объем информации, обрабатываемой нейронной сетью. **Материалы и методы.** В статье предложен вариант алгоритма первичной обработки видеoinформации, основанный на методах определения контуров объектов. Методы выделения границ, основанные на пространственной фильтрации, могут применяться как к стационарным, так и к подвижным объектам. Вторичная обработка основана на применении сверточной нейронной сети, коэффициенты которой подвергались квантованию для снижения вычислительной нагрузки. Для обучения нейронной сети были сгенерированы два набора данных (датасеты) для обучения, валидации и тестирования. Первый датасет состоял из исходных изображений с каким-либо объектом, второй содержал идеальный контур объектов (маски). Проведено сравнение двух нейронных сетей, обученных на исходных изображениях и на контурных масках изображений. Рассмотрены особенности реализации нейронных сетей на ПЛИС и предложена структурная схема проведения вычислений. Показана возможность итерационных вычислений с повторным использованием вычислительных ресурсов на каждой итерации (слое нейронной сети). **Результаты.** Приведены результаты предварительных исследований по обучению нейронной сети и квантованию ее коэффициентов, рассмотрены особенности аппаратной реализации нейронных сетей на базе программируемых логических интегральных схем. **Заключение.** Двухэтапный подход к обработке видеoinформации демонстрирует высокую эффективность в автономных системах, где существуют ограничения по энергопотреблению и вычислительным ресурсам. Статья может быть полезна разработчикам автономных систем видеомониторинга, обнаружения и сопровождения объектов наземного и воздушного базирования.

Ключевые слова: системы видеомониторинга, ПЛИС, нейронные сети, классификация изображений, обработка видеoinформации, первичная обработка видеoinформации

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20236, <https://rscf.ru/project/25-29-20236/>.

Для цитирования: Вахитов М.Г., Портнов А.В., Николаев А.Н. Применение нейросетевых алгоритмов обработки информации в автономных системах видеомониторинга // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr250301

APPLICATION OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS INFORMATION PROCESSING IN AUTONOMOUS VIDEO MONITORING SYSTEMS

M.G. Vakhitov^{1,2}, vakhitovmg@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1286-3888>

A.V. Portnov², portnovav@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2649-219X>

A.N. Nikolaev², nikolaevan@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9466-8847>

¹ JSC "Chelyabinsk Radio Plant "Polyot", Chelyabinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the problem of processing video information using neural networks in autonomous systems with limited computing resources. **The purpose of the study.** The purpose of the article is to study algorithms for processing video information in autonomous systems with limited computing resources based on two-stage data processing. At the first stage, the contours of the observed objects are determined using traditional methods of identifying key features. The second stage involves processing using neural network algorithms aimed at classifying and recognizing objects. Due to the primary processing of the video stream, the amount of information processed by the neural network is significantly reduced. **Materials and methods.** The article offers a variant of the algorithm for primary processing of video information based on methods for determining the contours of objects. Boundary allocation methods based on spatial filtering can be applied to both stationary and mobile objects. Secondary processing is based on the use of a convolutional neural network, the coefficients of which were quantized to reduce the computational load. To train the neural network, two datasets were generated for training, navigation, and testing. The first dataset consisted of initial images with an object, the second contained an ideal contour of objects (masks). A comparison of two neural networks trained on the source images and on contour masks of the images is carried out. The features of the implementation of neural networks on FPGAs are considered and a block diagram of the calculations is proposed. The possibility of iterative calculations with repeated use of computing resources at each iteration (neural network layer) is shown. **Results.** The results of preliminary studies on neural network training and quantization of its coefficients are presented, and the specifics of hardware implementation of neural networks based on programmable logic integrated circuits are considered. **Conclusion.** The two-stage approach to video information processing demonstrates high efficiency in autonomous systems where there are limitations on energy consumption and computing resources. The article may be useful to developers of autonomous video monitoring systems, detection and tracking of ground-based and air-based facilities.

Keywords: video monitoring systems, FPGA, neural networks, image classification, video information processing, primary processing of video information

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-20236, <https://rscf.ru/project/25-29-20236/>.

For citation: Vakhitov M.G., Portnov A.V., Nikolaev A.N. Application of neural network algorithms information processing in autonomous video monitoring systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250301

Введение

В настоящее время все более стремительно происходит развитие автономных систем обработки видеoinформации. Такие системы могут применяться в беспилотных транспортных средствах, беспилотных летательных аппаратах, умных системах видеонаблюдения и др. Во всех случаях обработка видеoinформации должна производиться в режиме реального времени. В отличие от стационарных высокопроизводительных решений, автономные устройства не обладают большими вычислительными ресурсами, так как в основном работают на относительно маломощных процессорах, микроконтроллерах или программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Это формирует особые требования к алгоритмам обработки видеoinформации. Они должны быть нацелены на обеспечение высокой скорости и эффективности анализа видеопотока.

Современные методы обработки видеoinформации, основанные на применении нейронных сетей, демонстрируют хорошие результаты в обнаружении, классификации, распознавании объектов и т. д. Но их применение в автономных системах часто невозможно из-за отсутствия необходимого количества ресурсов. В качестве решения данной проблемы может послужить разделение обработки информации на этапы – первичную (классические методы обработки) и вторичную обработку (обработка с помощью нейронных сетей). Данный принцип проектирования систем позволит значительно упростить структуру используемой нейронной сети ввиду предварительной обработки входных данных.

Первичная обработка основана на традиционных методах выделения ключевых признаков объекта в кадре (границ, факта перемещения, направления движения, формы и т. д.). Для этого могут применяться алгоритмы пространственной фильтрации, которые не требуют больших вычислительных ресурсов. На данном этапе входные данные упрощаются, а их объем уменьшается. Вторичная обработка нацелена на интерпретацию результата первичной обработки с помощью более сложных алгоритмов – нейронных сетей.

Важным является выбор методов обработки для каждого этапа. Первичная обработка может быть основана на применении градиентных методов выделения границ. Несмотря на свою простоту и схожесть, все методы имеют свои преимущества и недостатки [1, 2]. Вторичная обработка предполагает использование более простых нейронных сетей, что позволит реализовать их на вычислительных платформах с ограниченными вычислительными ресурсами, в том числе на базе ПЛИС.

В настоящей статье рассмотрены алгоритмы первичной обработки видеoinформации с целью выделения контуров объектов, обсуждаются особенности аппаратной реализации нейронной сети на ПЛИС, приводятся сравнительные результаты обучения для предлагаемой двухэтапной обработки видеoinформации и традиционного подхода с непосредственным обучением нейронной сети на наборах видеоданных.

1. Алгоритмы первичной обработки видеoinформации

Выделение контуров является одним из главных этапов в системах видеомониторинга. Для неподвижных объектов чаще всего используются классические методы, основанные на пространственной фильтрации. Наиболее часто используются градиентные методы, такие как операторы Робертса, Прюитта, Собеля, Кирша, детектор границ Кэнни и др. [3–7]. Данные методы могут применяться и для подвижных объектов, классическим методом анализа которых является вычитание соседних кадров. При этом большее количество ложных границ, определенных каким-либо оператором, исчезнут. Также анализ последовательности кадров позволяет вычислять векторы перемещения объектов между кадрами, что необходимо для определения траекторий и оценки скорости движения объектов.

В общем случае использование градиентных методов нацелено на определение изменений интенсивности пикселей изображения. Процесс пространственной фильтрации можно представить в виде [3]

$$g(x, y) = \sum_{s=-\frac{m-1}{2}}^{\frac{m-1}{2}} \sum_{t=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} w(s, t) f(x + s, y + t),$$

где m и n – размеры маски фильтра; $w(s, t)$ – коэффициенты маски; $f(x, y)$ – значения пикселей в окрестности выбранной точки.

Выбор типа оператора зависит от задачи, которая решается с помощью данного алгоритма. Главными отличиями являются различное качество детектирования границ и нагрузка на вычислительную систему, что особенно актуально для автономных систем. С одной стороны, методы с простыми коэффициентами (например, оператор Прюитта) обеспечивают минимальную вычислительную нагрузку, но обладают меньшей точностью. С другой – методы с коэффициентами, кратными степени двойки (оператор Собеля), обладают компромиссом между скоростью вычислений и качеством.

Сложностью при использовании градиентных методов является определение порогового значения, необходимого для отнесения конкретного пикселя к фону или объекту. На величину порога (область оптимальных значений) влияет как само изображение, так и тип исполь-

зуемой маски фильтра [8]. Для его определения могут применяться различные автоматизированные методы – метод Оцу, итеративного среднего, адаптивный порог [3] и др. Часто применяется и экспериментальный метод, который предполагает ручной подбор порогового значения.

Современные подходы часто объединяют традиционные методы с глубоким обучением (сверточные, рекуррентные нейронные сети и др.). Такой подход улучшает точность работы систем в сложных условиях, но требует значительных вычислительных ресурсов, вследствие чего увеличивается время обработки. В автономных системах реального времени необходимо соблюдать баланс между производительностью и объемом затрачиваемых ресурсов.

2. Особенности реализации нейронных сетей на ПЛИС

На сегодняшний день существует большое количество программных решений для реализации нейронных сетей в вычислительных системах на базе микропроцессоров и микроконтроллеров [9–11]. Однако в большинстве случаев такие решения не могут обеспечить требуемую производительность нейросети для обработки потока видеоинформации в реальном режиме времени, так как все вычисления в микропроцессорах выполняются последовательно.

Вместе с этим предлагаются аппаратные решения по реализации нейронных сетей с использованием ПЛИС [11, 12]. Такой подход позволяет существенно повысить производительность вычислений за счет возможности параллельной обработки информации, однако в силу специфики разработки программного обеспечения ПЛИС широкого распространения он не получил.

Для реализации нейронной сети на ПЛИС необходимо, в первую очередь, провести оценку вычислительных ресурсов. В качестве базового вычислительного узла можно принять один нейрон сети. Структура нейрона практически полностью совпадает со структурой цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) за исключением наличия на выходе нелинейной (в большинстве случаев) функции активации [13]. Современные ПЛИС имеют в своем составе аппаратные DSP-блоки, позволяющие эффективно реализовывать КИХ-фильтры. В качестве примера в табл. 1 приведена информация по DSP-блокам в доступных на рынке ПЛИС семейства CycloneV фирмы Intel [14].

Аппаратные DSP-блоки ПЛИС семейства CycloneV

Таблица 1

Hardware DSP blocks of the CycloneV FPGA family

Table 1

Обозначение семейства ПЛИС	Код	Количество умножителей при различной организации разрядности		
		9 × 9	18 × 18	27 × 27
Cyclone V E	A2	75	50	25
	A4	198	132	66
	A5	450	300	150
	A7	468	312	156
	A9	1026	684	342

Учитывая то, что ПЛИС может работать на тактовых частотах, превышающих 100 МГц, один DSP-блок позволяет проводить вычисления для одного нейрона в режиме реального времени. Число весовых коэффициентов в нейроне может достигать нескольких десятков и будет зависеть от темпа поступления видеоинформации (количества кадров в секунду) и тактовой частоты ПЛИС.

Вычисление функции активации нейрона может быть реализовано табличным способом с использованием встроенных блоков памяти ПЛИС. Кроме этого, встроенная память ПЛИС используется для хранения весовых коэффициентов обученной нейронной сети. В табл. 2 приведен пример доступных ресурсов памяти для ПЛИС семейства CycloneV фирмы Intel.

Таблица 2

Объем памяти ПЛИС семейства CycloneV

Table 2

Memory capacity of the CycloneV FPGA family

Обозначение семейства ПЛИС	Код	Объем памяти, Кбит		
		Блоки M10K	Блоки MLAB	Итого
Cyclone V E	A2	1760	196	1956
	A4	3080	303	3383
	A5	4460	424	4884
	A7	6860	836	7696
	A9	12200	1717	13917

Ограничение аппаратных ресурсов ПЛИС обуславливает особенности реализации нейросети для конкретной задачи. Во-первых, использование аппаратных умножителей накладывает ограничение на разрядность весовых коэффициентов нейронной сети. Это необходимо учитывать при квантовании коэффициентов в процессе проектирования и обучения сети. Во-вторых, ограничение количества аппаратных умножителей и объема встроенной памяти ПЛИС определяет вид аппаратной реализации нейросети. При небольшом количестве слоев и нейронов может быть реализована полностью параллельная архитектура сети. В иных случаях возможно итерационное послойное вычисление с повторным использованием вычислительных ресурсов на каждой итерации. Количество итераций будет зависеть от количества слоев нейронной сети. Недостаток встроенной памяти может быть компенсирован подключением внешних модулей памяти к ПЛИС. Предлагаемая структурная схема проведения вычислений в ПЛИС приведена на рис. 1.

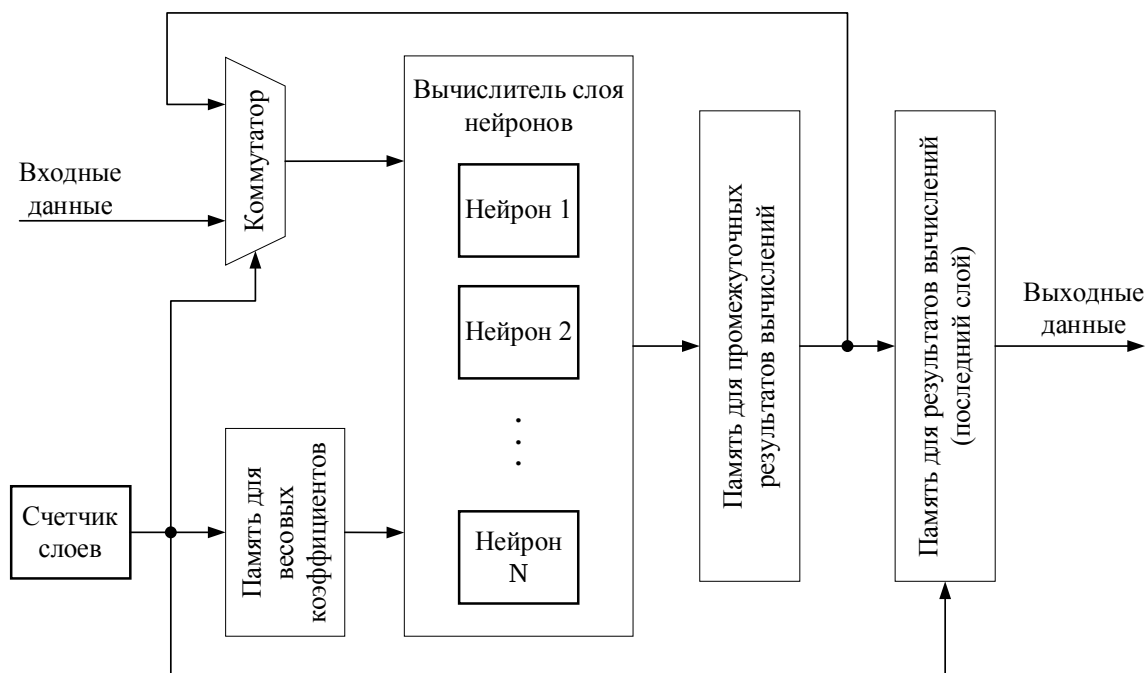


Рис. 1. Структурная схема проведения вычислений в ПЛИС
Fig. 1. Block diagram of computing in FPGA

3. Сравнение результатов обучения нейронной сети

Для обучения нейронной сети необходим набор данных для обучения (датасет). Набор данных предлагается получить путем генерации синтетических изображений, содержащих различные геометрические фигуры. Для этого был определен базовый набор фигур, включающий пять классов: стрелка, круг, квадрат, прямоугольник и треугольник (по 3000 изображений в каждом классе).

Сформированный объект накладывался на предварительно подготовленное фоновое изображение (размером 40 × 40 пикселей). Для каждой фигуры случайным образом определялись мас-

штаб, угол поворота и цвет. Позиционирование фигур на изображении выполнялось с отступом от краев изображения для сохранения их целостности. Некоторые объекты (15 % от общего количества) подвергались размытию с помощью фильтра Гаусса (степень размытия определялась случайным образом).

Для каждой фигуры были созданы два изображения – исходное изображение с объектом и контурная маска, представляющая собой идеальные границы объекта.

Для решения задачи классификации изображений в среде MATLAB была разработана сверточная нейронная сеть (CNN). Всего в эксперименте участвовало пять классов. Все изображения предварительно преобразовывались в градации серого с сохранением исходных размеров, что позволило сократить вычислительные затраты.

Архитектура нейронной сети для классификации включает последовательность из трех блоков, каждый из которых состоит из сверточного слоя (Convolutional Layer), слоя нормализации (Batch Normalization), функции активации (Rectified Linear Unit – ReLU) и слоя подвыборки (Max-Pooling). Сверточные слои необходимы для выделения и извлечения конкретных локальных признаков. Первый сверточный слой выделяет простые границы, второй слой – комбинации границ (например, углы, дуги и др.), третий слой – целые объекты. На рис. 2 представлена структурная схема нейронной сети.

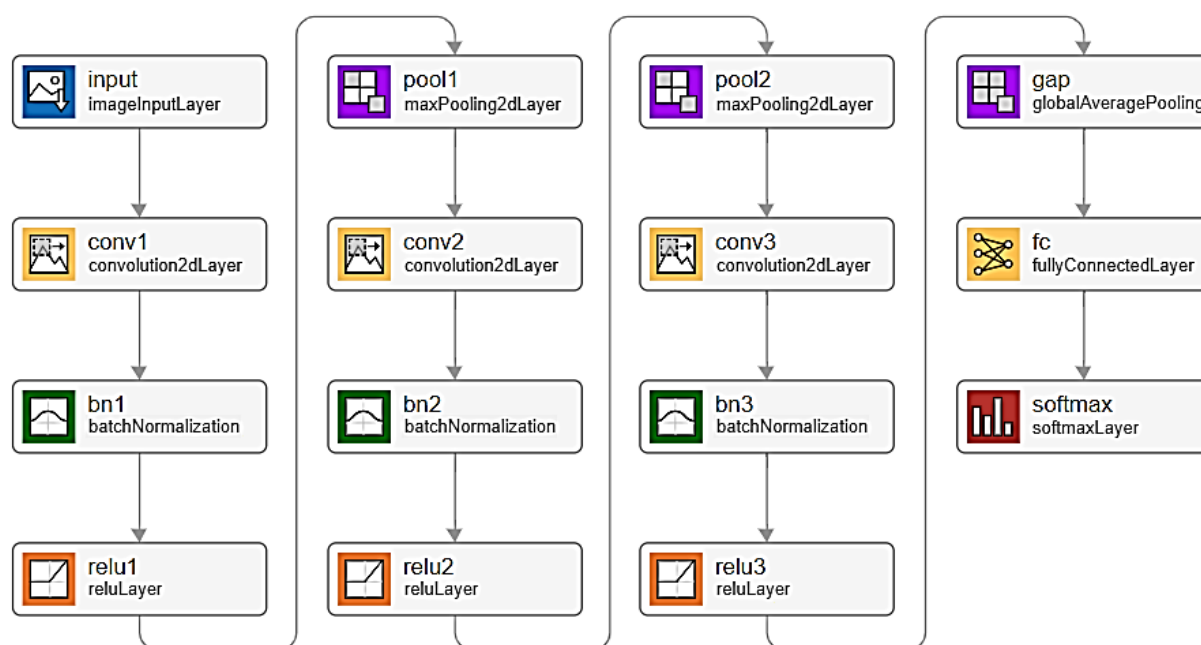


Рис. 2. Структура нейронной сети
Fig. 2. The structure of the neural network

Первый сверточный слой содержал 16 фильтров размером 3×3 , второй – 32 фильтра, а третий – 64 фильтра. Увеличение числа фильтров на глубоких слоях позволяет сети извлекать как простые локальные признаки (границы и текстуры) на начальных этапах, так и сложные формы объектов на последующих уровнях. Слой Max-Pooling позволяет уменьшить размерность входных данных для следующего слоя, что сокращает вычислительную нагрузку на последующих слоях и снижает риск переобучения. Финальный полносвязный слой содержит пять нейронов (по количеству классов) и выполняет основную работу по принятию решения к отнесению тестовых данных к какому-либо классу.

Для сравнения были обучены две нейронные сети: первая обучалась на исходных изображениях (рис. 3а), вторая – на масках изображений, содержащих идеальный контур объекта (рис. 3б). Исходные наборы данных были разделены случайным образом на три выборки: тренировочную (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %). Обучение проводилось с использованием градиентного спуска в течение 200 эпох (на одну эпоху приходится 164 итерации). Для контроля обучения каждые 100 итераций выполнялась валидация на соответствующей выборке.

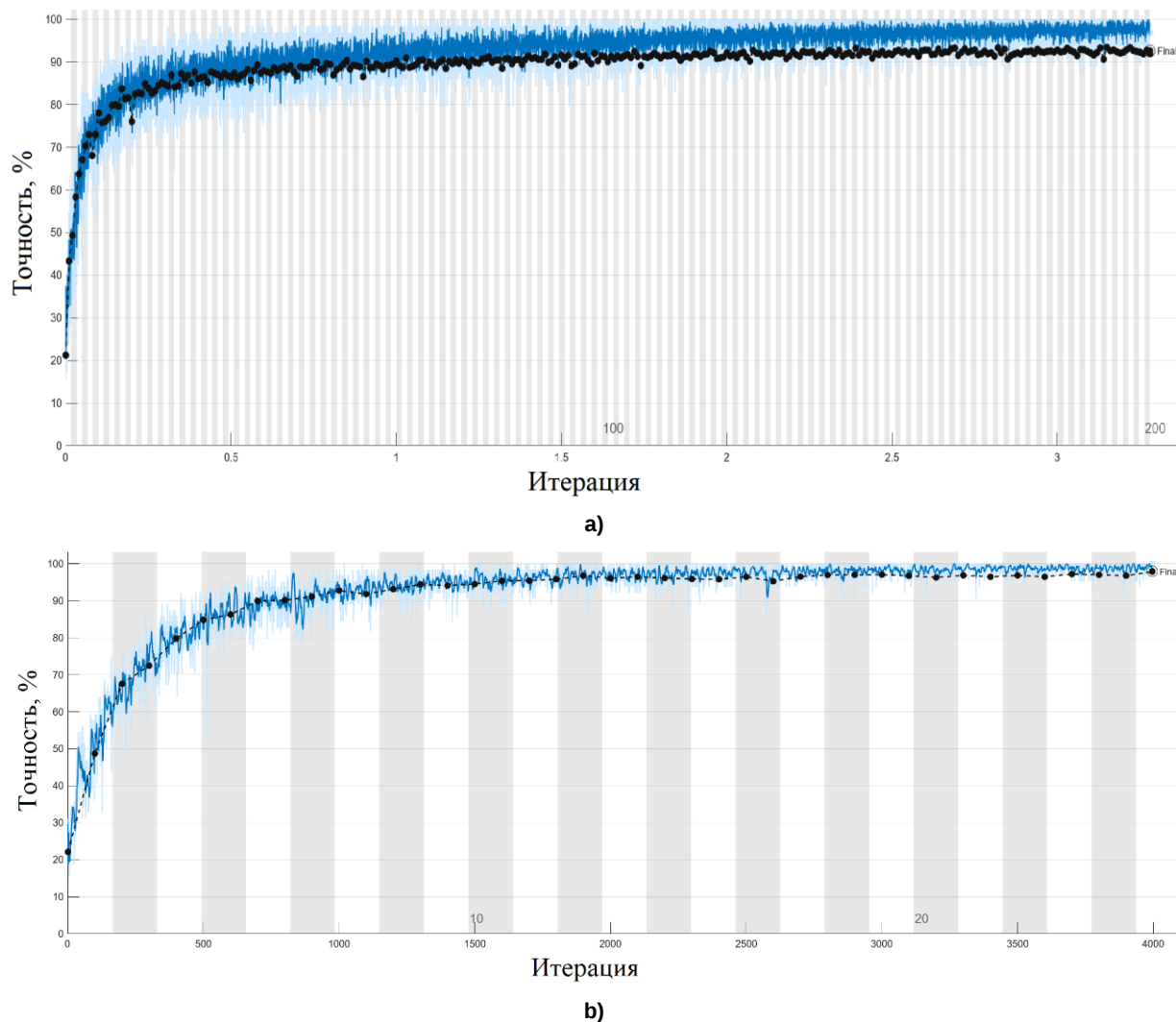


Рис. 3. Графики обучения: а – график обучения на исходных изображениях;
b – график обучения на изображениях, содержащих идеальные контуры объектов
Fig. 3. Learning schedules: a – learning schedule based on the initial images;
b – learning schedule based on images containing ideal contours of objects

После обучения нейронных сетей были получены параметры модели. В табл. 3 представлен пример весовых коэффициентов и их общее количество.

Весовые коэффициенты обученной нейронной сети

Таблица 3

Weights of a trained neural network

Table 3

Слой	Количество весовых коэффициентов	Размерность	Пример исходных весовых коэффициентов	Пример квантованных весовых коэффициентов
Convolution Layer 1	144	[3, 3, 1, 16]	[−0,3755; 0,3160; ...]	[−0,3750; 0,3125; ...]
Convolution Layer 2	4608	[3, 3, 16, 32]	[0,0762; 0,0290; ...]	[0,0781; 0,0273; ...]
Convolution Layer 3	18432	[3, 3, 32, 64]	[−0,0854; 0,0131; ...]	[−0,0859; 0,0137; ...]
Fully Connected Layer	320	[5, 64]	[0,0181; 0,2830; ...]	[0,0156; 0,2812; ...]

Тестирование обученных нейронных сетей производилось на тестовой выборке путем обработки случайных изображений (табл. 4, 5). Основное количество обработанных тестовых изображений было отнесено к истинному классу (выделены в табл. 4, 5), остальные классифицировались с ошибкой.

Таблица 4

Ошибки нейронной сети, обученной на исходных изображениях

Table 4

Errors of a neural network trained on source images

Истинный класс	Arrow	398	1	42	–	9
	Circle	1	441	2	4	2
	Rectangle	25	–	421	–	4
	Square	4	12	3	418	13
	Triangle	11	1	8	4	426
		Arrow	Circle	Rectangle	Square	Triangle
Предсказанный класс						

Таблица 5

Ошибки нейронной сети, обученной на идеальных контурах

Table 5

Errors of a neural network trained on perfect contours

Истинный класс	Arrow	438	–	9	–	3
	Circle	–	449	–	1	–
	Rectangle	9	–	441	–	–
	Square	–	17	–	443	–
	Triangle	–	1	–	9	440
		Arrow	Circle	Rectangle	Square	Triangle
Предсказанный класс						

Точность классификации сети, обученной на исходных изображениях, и сети, обученной на идеальных контурах, составила 94 и 98 % соответственно.

Нейронные сети используют память для хранения параметров (весовых коэффициентов) и активаций для каждого слоя. Большинство нейронных сетей используют типы данных с плавающей точкой и требуют значительного объема памяти и ресурсов для выполнения арифметических операций. Эти ограничения могут препятствовать применению нейронных сетей на устройствах с низкой вычислительной мощностью и малым объемом памяти. Для уменьшения объема памяти применяется квантование весовых коэффициентов в N-битные масштабированные целочисленные типы данных. Квантование представляет собой процесс преобразования параметров модели из типа данных с плавающей точкой в целочисленный формат (например, в int8). Этот процесс является ключевым для оптимизации работы нейронных сетей на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Квантование позволяет снизить требуемый для хранения параметров модели объем памяти и ускорить вычисления.

Основная идея квантования заключается в избыточности точности представления параметров. Например, весовые коэффициенты могут быть представлены с использованием меньшего количества бит без ущерба точности работы сети. Это достигается за счет масштабирования исходных значений в диапазон, который может быть представлен целочисленным типом данных, и последующего их округления.

Для каждого набора параметров вычисляется модуль максимального значения, которое используется для определения масштабирующего коэффициента. Он позволяет перенести исходные значения параметров в допустимый для целочисленного типа данных диапазон. После масштабирования значения округляются до ближайшего целого числа, что приводит к потере точности, но позволяет эффективно хранить и обрабатывать данные.

После квантования возникает задача восстановления параметров, что достигается путем умножения квантованных значений на соответствующие масштабирующие коэффициенты (см. табл. 3).

Например, квантованные весовые коэффициенты слоя «ConvolutionLayer 1» до восстановления (умножения на коэффициент 0,0078125) можно представить в виде $[-48; 40]$. Восстановленные коэффициенты являются приближенными, что может привести к снижению точности модели (рис. 4, 5).

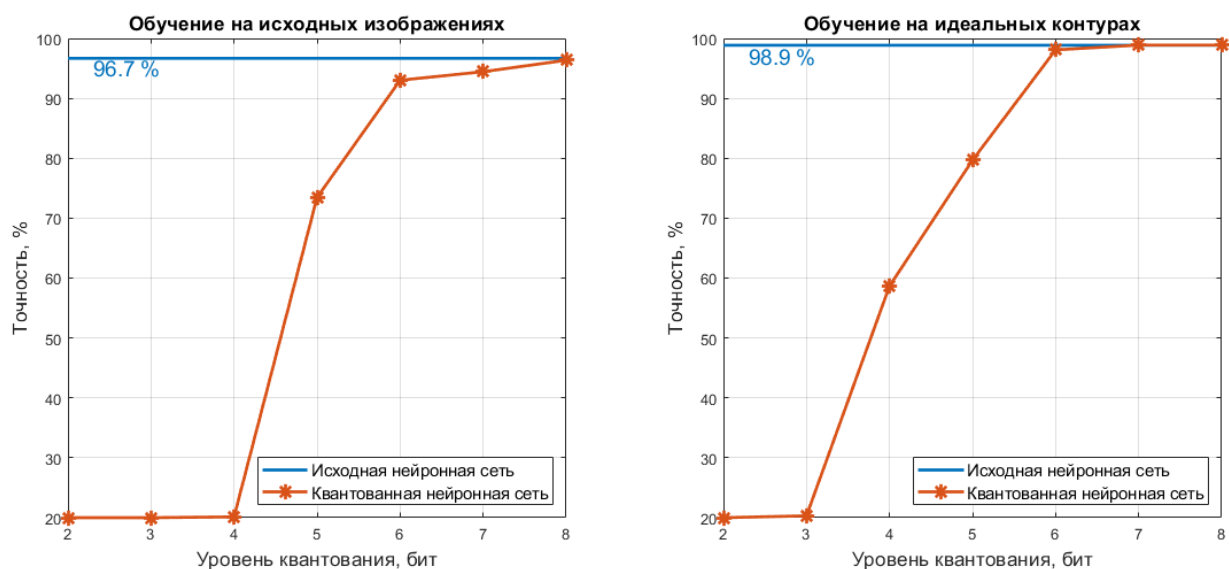


Рис. 4. Точность исходной и квантованной нейронных сетей
Fig. 4. Accuracy of the initial and quantized neural networks

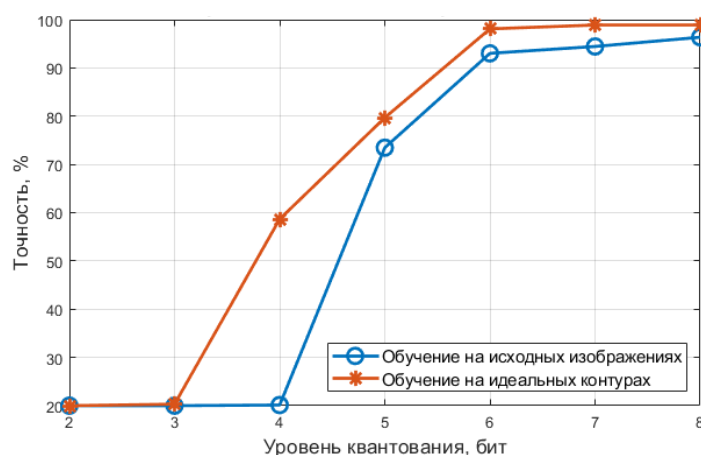


Рис. 5. Сравнение точности нейронных сетей, обученных на исходных изображениях и на контурах объектов
Fig. 5. Comparison of the accuracy of neural networks trained on the source images and on the contours of objects

Точности классификации после квантования нейронных сетей, обученных на разных типах изображений (исходных и содержащих идеальные контура объектов), отличаются. Например, при уровне квантования 4 бита нейронная сеть, обученная на контурах, показывает точность 59 %. Сеть, обученная на исходных изображениях, при этом же уровне квантования показывает точность 20 %, что соответствует случайному распределению между классами. Это подтверждает необходимость предварительной обработки данных [8, 15].

Закключение

Двухэтапный подход, сочетающий традиционные методы первичной обработки (выделение границ объектов) и нейросетевые алгоритмы вторичной обработки, позволяет найти компромисс между производительностью и вычислительной эффективностью. Это особенно важно для автономных систем с ограниченными ресурсами, которые работают в режиме реального времени. Про-

веденные исследования показали, что предварительная обработка данных существенно снижает время на обучение нейронной сети. Благодаря первичной обработке также становится возможным более грубое квантование весовых коэффициентов обученной сети. При 4-битном квантовании нейронная сеть, обученная на идеальных контурах объектов, достигает точности классификации 59 %. При этом сеть, обученная на исходных изображениях, достигает точности 20 %. Квантование весовых коэффициентов нейронной сети позволяет снизить требования к объему памяти, но в условиях ограниченных ресурсов необходимо проводить оптимизацию архитектуры нейронной сети.

Список литературы

1. Методы компьютерной обработки изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глумов, Н.Ю. Ильясова и др.; под. ред. В.А. Сойфера. Изд. 2-е, испр. М.: Физматлит, 2003. 784 с. ISBN 5-9221-0270-2.
2. Ханова А.А., Озерова М.И. Обзор методов выделения контуров на изображениях // Информационные технологии в науке и производстве: материалы VII Всерос. молодежной науч.-техн. конф. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2020. С. 89–92.
3. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1103 с.
4. Umbaugh S.E. Computer Imaging: Digital Image Analysis and Processing. CRC Press, 2005. 688 p.
5. Pratt W.K. Digital image processing. University of North Carolina, New York, USA: NY Wiley, 1978.
6. Kirsch R. Computer determination of the constituent structure of biological images // Computers and Biomedical Research. 1971. Vol. 4. P. 315–328. DOI: 10.1016/0010-4809(71)90034-6
7. Canny J. A Computational Approach for Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. PAMI-8, no. 6. P. 679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
8. Особенности применения алгоритма определения границ объектов на изображениях при использовании градиентных методов / А.В. Портнов, С.Н. Даровских, А.Н. Николаев, А.Р. Николаева // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2024. Т. 4, № 54. С. 5–14. DOI: 10.14529/secur240401
9. TF-Net: Deploying Sub-Byte Deep Neural Networks on Microcontrollers / J. Yu, A. Lukefahr, R. Das, S. Mahlke // ACM Transactions on Embedded Computing Systems. 2019. Vol.18, iss. 5s. P. 1–21. DOI: 10.1145/3358189
10. Quantization and Deployment of Deep Neural Networks on Microcontrollers / P.-E. Novac, G. Boukli Hacene, A. Pegatoquet et al. // Sensors. 2021. Vol. 21 (9). P. 2984. DOI: 10.3390/s21092984
11. Warden P., Situnayake D. TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers. O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, 2019. 484 p.
12. Omondi A.R., Rajapakse J.C. FPGA Implementations of Neural Networks. Springer, The Netherlands, 2006. 372 p.
13. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с. ISBN 5-8459-0890-6.
14. Cyclone V Device Handbook. Volume 1: Device Interfaces and Integration. URL: <https://www.allelcoelec.ru/datasheets.fb/5CGXFC7D6F27I7N.pdf>.
15. Портнов А.В., Николаев А.Н., Николаева А.Р. Устройство и алгоритмы первичной обработки видеoinформации для системы машинного зрения на основе искусственных фасеточных глаз // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2023. Т. 4, № 50. С. 5–12. DOI: 10.14529/secur230401

References

1. Gashnikov M.V., Glumov N.I., Ilyasova N.Y. et al. *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy* [Methods of computer image processing]. 2nd ed., revised. Moscow: Fizmatlit, 2003. 784 p. (In Russ.) ISBN 5-9221-0270-2.
2. Khanova A.A., Ozerova M.I. [Overview of methods for selecting contours in images]. In: *Information technologies in science and production: Proceedings of the VII All-Russian youth scientific and technical conference*. Omsk: Omsk State Technical University, 2020. P. 89–92. (In Russ.)
3. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. Transl. from Engl. 3rd ed., corrected and supplemented. Moscow: Tekhnosfera, 2012. 1103 p. (In Russ.)
4. Umbaugh S.E. *Computer Imaging: Digital Image Analysis and Processing*. CRC Press, 2005. 688 p.

5. Pratt W.K. *Digital image processing*. University of North Carolina, New York, USA: NY Wiley, 1978.
6. Kirsch R. Computer determination of the constituent structure of biological images. *Computers and Biomedical Research*. 1971;4:315–328. DOI: 10.1016/0010-4809(71)90034-6
7. Canny J. A Computational Approach for Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986;PAMI-8(6):679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
8. Portnov A.V., Darovskikh S.N., Nikolaev A.N., Nikolaeva A.R. Features of the application of the algorithm for determining the boundaries of objects in images using gradient methods. *Journal of the Ural Federal District. Information security*. 2024;4(54):5–14. (In Russ.) DOI: 10.14529/secur240401
9. Yu J., Lukefahr A., Das R., Mahlke S. TF-Net: Deploying Sub-Byte Deep Neural Networks on Microcontrollers. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*. 2019;18(5s):1–21. DOI: 10.1145/3358189
10. Novac P.-E., Hacene G.B., Pegatoquet A., Miramond B., Gripon V. Quantization and Deployment of Deep Neural Networks on Microcontrollers. *Sensors*. 2021;21(9):2984. DOI: 10.3390/s21092984
11. Warden P., Situnayake D. *TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers*. O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, 2019. 484 p.
12. Omondi A.R., Rajapakse J.C. *FPGA Implementations of Neural Networks*. Springer, The Netherlands, 2006. 372 p.
13. Haykin S. *Neural Networks: a complete course*. Transl. from Engl. 2nd ed. Moscow: Williams, 2006. 1104 p. (In Russ.) ISBN 5-8459-0890-6.
14. Cyclone V Device Handbook. Volume 1: Device Interfaces and Integration. Available at: <https://www.allelcoelec.ru/datasheets.fb/5CGXFC7D6F2-7I7N.pdf>.
15. Portnov A.V., Nikolaev A.N., Nikolaeva A.R. Device and algorithms for primary processing of video information for a machine vision system based on artificial faceted eyes. *Journal of the Ural Federal District. Information security*. 2023;4(50):5–12. (In Russ.) DOI: 10.14529/secur230401

Информация об авторах

Вахитов Максим Григорьевич, канд. техн. наук, начальник отдела непрофильных разработок, АО «Челябинский радиозавод «Полет», Челябинск, Россия; доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vakhitovmg@susu.ru.

Портнов Андрей Владимирович, аспирант кафедры радиоэлектроники и систем связи, инженер лаборатории «Цифровые системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; portnovav@susu.ru.

Николаев Андрей Николаевич, доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи, начальник лаборатории «Цифровые системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nikolaevan@susu.ru.

Information about the authors

Maxim G. Vakhitov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Non-Core Development Department, JSC “Chelyabinsk Radio Plant “Polyot”, Chelyabinsk, Russia; Ass. Prof. of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vakhitovmg@susu.ru.

Andrey V. Portnov, Postgraduate student of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, Engineer of the Digital Systems Laboratory, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; portnovav@susu.ru.

Andrey N. Nikolaev, Ass. Prof. of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, Head of the Digital Systems Laboratory, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nikolaevan@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 11.03.2025

The article was submitted 11.03.2025

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ С ПАРАМЕТРОМ

А.В. Копотева, kopoteva_av@mail.ru

А.В. Затонский, zhenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

Д.А. Мамаев, dmitrijmamaev0@yandex.ru

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

Аннотация. Данная работа посвящена изучению вопроса возможности применения математического пакета Mathcad 15.0 для решения задач аналитической геометрии с параметрами. Обзор отечественных и зарубежных источников показал, что при всем разнообразии применения различных математических пакетов для решения задач с параметрами их почти не используют. **Цель исследования:** изучение возможности применения математического пакета для решения задач аналитической геометрии с параметрами, что позволит не только избежать арифметических и прочих ошибок, свойственных человеку, но и получить инструмент генерации различных вариантов одной и той же задачи и шаблон для проверки соответствующих работ учащихся. **Материалы и методы.** Исследование выполнено в среде Mathcad 15.0 на примере решения задачи взаимного расположения прямой и эллипса с переменной ординатой центра симметрии. Были рассмотрены два различных способа аналитических решений задачи и выполнена реализация одного из них в среде Mathcad. Аналитическое решение задачи взаимного расположения прямой и кривой второго порядка с параметром возможно либо путем анализа числа их общих точек на основании выраженных через параметр координат, либо путем нахождения координат точки касания на основании равенства угловых коэффициентов прямой и касательной к кривой в точке касания. **Результаты.** В рамках данного исследования установлено, что Mathcad позволяет как реализовать оба аналитических метода решения задачи, так и непосредственно найти выражения для координат точки касания в зависимости от параметра путем решения системы нелинейных уравнений и затем исследовать их на принадлежность множеству действительных чисел. **Заключение.** Проведенное нами исследование позволяет утверждать, что Mathcad позволяет реализовать различные варианты решения задачи аналитической геометрии с параметром и сделать соответствующую графическую интерпретацию результата. Полученное решение может быть использовано для составления различных вариантов задачи с решением из области рациональных чисел, проверки полученных студентами результатов, а также в качестве образца выполнения задания.

Ключевые слова: аналитическая геометрия, эллипс, прямая, задача с параметром, точка касания, Mathcad

Для цитирования: Копотева А.В., Затонский А.В., Мамаев Д.А. Применение математического пакета для разработки и визуализации решения задачи аналитической геометрии с параметром // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 16–25. DOI: 10.14529/ctcr250302

MATHEMATICAL SOFTWARE APPLICATION FOR AN ANALYTICAL GEOMETRY PROBLEM WITH A PARAMETER SOLVING AND VISUALIZATION

A.V. Kopoteva, kopoteva_av@mail.ru

A.V. Zatonskiy, zxenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

D.A. Mamaev, dmitrijmamaev0@yandex.ru

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

Abstract. In this issue we study the possibility of mathematical software usage for analytical geometry with parameters problem solving. A review of Russian and foreign sources has shown that, despite the variety of mathematical software applications, they are rarely used to solve problems with parameters. **The purpose of the study** was to test the possibility of a mathematical package usage to solve problems with parameters, which will allow to avoid arithmetic and other errors and to obtain a tool for generating different variants of the same problem and a template for students' solutions checking. **Materials and methods.** We used Mathcad 15.0 environment for the straight line and an ellipse with a variable symmetry center ordinate relative position determination. First analytical solution of the relative position of a straight line and a second-order curve with a parameter problem is based on the number of curves' common points and their coordinates functional dependence on the parameter analysis. Second one is based on the point of contact coordinates determination using the equality of the straight line angular coefficients and curve tangent at the point of contact. **Results.** In this study it was established that Mathcad allows to implement both analytical methods and directly find the expressions for the coordinates of the depending on the parameter by solving a system of nonlinear equations and then to exam them for the set of real numbers belonging. **Conclusion.** Our research ascertains that Mathcad can be implemented for visualization and various solutions of analytical geometry with a parameter problem. Mathcad solution can be used to generate a set of different variants of the same problem with a rational number results, to verify students' problem solutions, and also as an example of correct solution.

Keywords: analytical geometry, ellipse, straight line, problem with parameter, tangent point, Mathcad

For citation: Kopoteva A.V., Zatonskiy A.V., Mamaev D.A. Mathematical software application for an analytical geometry problem with a parameter solving and visualization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):16–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250302

Введение

Математические задачи с параметром из школьной или университетской программы в силу своих сложности и нетривиальности оказываются подходящим инструментом организации научно-исследовательской работы студентов младших курсов. Однако использование таких задач в учебном процессе сопровождается целым рядом сложностей. Помимо непосредственной формулировки задачи на естественном языке преподавателю необходимо, во-первых, обеспечить достаточное число вариантов в соответствии с количеством студентов, во-вторых, подобрать такие числовые величины в ней, чтобы результаты расчетов оказались приемлемыми, в-третьих, разработать и реализовать метод решения, подходящий для проверки решения задачи студентом, и, в-четвертых, визуализировать полученные результаты. При этом само решение задачи с параметром зачастую приводит к набору взаимосвязанных задач различной сложности, часто не имеющих аналитического решения. В связи с перечисленными проблемами возникает необходимость выбора инструментального средства, позволяющего решить их хотя бы частично. Естественно, реализация одного и того же метода решения задачи с использованием различных математических пакетов может существенно различаться, а решение любой задачи в рамках конкретного пакета является прикладной задачей, имеющей собственную специфику и сложности. В рамках данной работы выполнена оценка возможностей среды Mathcad 15.0 для разработки и реализации метода решения задач с параметром на примере задачи исследования взаимного расположения прямой и кривой второго порядка в зависимости от параметра одной из них.

Обзор исследований, посвященных решению задач с параметрами, привел к неожиданным результатам. Вопросы необходимости и преимуществ применения программных средств в образовании поднимаются в [1] (на примере Mathcad), [2] (на примере Wolfram Mathematica) и [3] (на примере Matlab), однако нам не удалось обнаружить исследований, посвященных решению задач с параметрами из школьной или университетской программы. Русскоязычные авторы уделяют существенное внимание решению задач с параметрами из школьной программы в рамках подготовки к ЕГЭ. В частности, существуют статьи, посвященные решению геометрических [4] и тригонометрических [5] задач с параметрами, а также методам решения таких задач [6]. В отдельных исследованиях рассматриваются вопросы применения программных продуктов для решения задач школьной программы с параметром, в частности, Mathcad [7] и Wolfram alpha [8]. Несколько более широко как в отечественных, так и зарубежных изданиях представлены исследования, посвященные использованию программных средств для решения теоретических и прикладных задач. Применение пакета Mathcad для визуализации в задачах аналитической геометрии рассматривается в работах [9, 10]. Решение и визуализации задач начертательной геометрии средствами Wolfram Mathematica описаны в [11], применение его для построения линии пересечения поверхностей второго порядка – в [12]. Построение в среде Matlab поверхностей каналов теплообменных устройств реализовано в [13]. Проблеме программной визуализации и анимации на примере параметрических кривых Безье посвящено исследование [14]. Моделирование в среде Mathcad поведения идеальных материалов выполнено в [15].

Достаточно широко представлены прикладные задачи с параметрами, например, посвященные исследованию температуры стальных конструкций под действием солнечной энергии [16] и применению балансовой модели популяции для симуляции процесса кипения в смеси двух жидкостей [17]. Кроме того, большое внимание уделяется математическим задачам с параметрами: алгебраическим (решение общих нелинейных задач нахождения собственных значений матриц [18]), математического анализа (решение общих линейных эллиптических уравнений в частных производных второго порядка [19]), вариационного исчисления [20]. Таким образом, нам не удалось найти статей, посвященных решению задач аналитической геометрии с параметрами с использованием математических пакетов. Проблема является весьма актуальной как для преподавателя по причинам, перечисленным ранее, так и для студентов, поскольку попытка выполнить соответствующее задание вызвала у них существенные затруднения. Это означает, что успешная разработка и реализация метода решения задачи с параметром с использованием математического пакета полезны не только для преподавателя с точки зрения разработки и проверки студенческих работ, но и для студентов в качестве образца выполнения таких заданий, что и определяет актуальность данной работы.

Выполним решение задачи аналитической геометрии на взаимное расположение прямой и кривой второго порядка средствами Mathcad 15.0. Параметром может выступать любой из коэффициентов уравнений прямой или кривой второго порядка. Для определенности сформулируем задачу следующим образом: требуется исследовать взаимное расположение эллипса с центром в точке $M(-1; y_0)$ и полуосями $a = 4$ и $b = 3$ и прямой $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$ в зависимости от значения параметра y_0 , определить координаты общих точек, если они есть, и построить графики.

1. Визуализация задачи средствами Mathcad 15.0

Каноническое уравнение эллипса с центром в точке $M(x_0; y_0)$ и полуосями $a > 0$ и $b > 0$ имеет вид $(x - x_0)^2/a^2 + (y - y_0)^2/b^2 = 1$, причем явной однозначной зависимости между абсциссой и ординатой в данном случае не существует. Построение графика кривой в неявном виде в Mathcad 15.0 невозможно, поэтому введем замену переменных $(x - x_0)/a = \cos(t)$, $(y - y_0)/b = \sin(t)$ и перейдем к параметрическим уравнениям эллипса $x = x_0 + a \cdot \cos(t)$, $y = y_0 + b \cdot \sin(t)$. Тогда в нашем случае эллипс с центром симметрии в точке $M(-1; y_0)$, полуосями $a = 4$ и $b = 3$ описывается уравнением $(x + 1)^2/4^2 + (y - y_0)^2/3^2 = 1$ или в параметрической форме $x = -1 + 4 \cdot \cos(t)$, $y = y_0 + 3 \cdot \sin(t)$. Изменение ординаты центра эллипса y_0 приводит к его параллельному переносу по вертикали (рис. 1).

Прямая $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$ задана общим уравнением, т. е. тоже неявно, однако в данном случае можно получить явное уравнение $y = 5 \cdot x/16 - 2$. Визуальный анализ возможных взаимных расположений прямой и эллипса при различных значениях параметра y_0 (см. рис. 1) позволяет заключить, что кривые могут иметь $n = 0, 1, 2$ общих точек.

$$a := 4 \quad b := 3 \quad x_0 := -1 \quad x(t) := x_0 + a \cdot \cos(t) \quad y(t, y_0) := y_0 + b \cdot \sin(t)$$

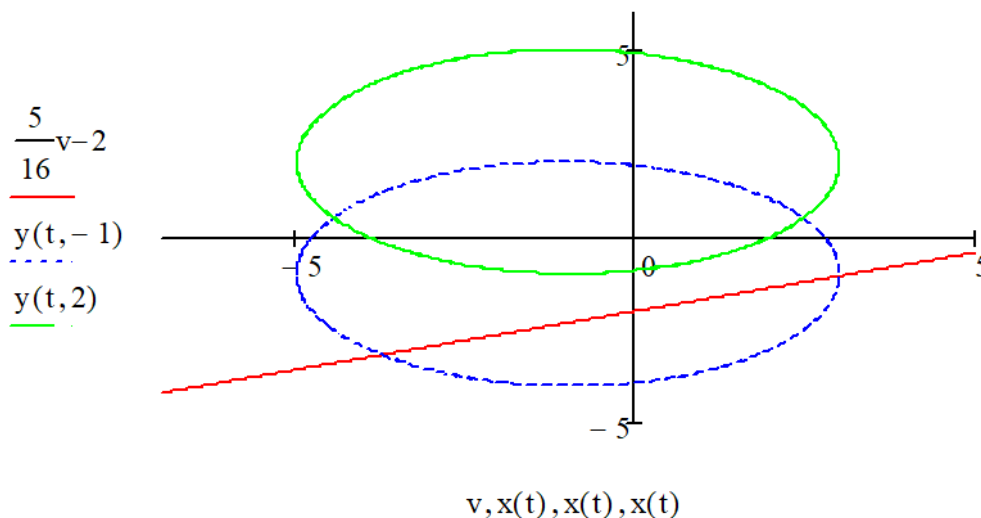


Рис. 1. Графики эллипса $(x + 1)^2/4^2 + (y - y_0)^2/3^2 = 1$ и прямой $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$ при различных значениях параметра y_0
Fig. 1. Ellipse $(x + 1)^2/4^2 + (y - y_0)^2/3^2 = 1$ and the straight line $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$ graphics for different values of parameter y_0

2. Решение задачи взаимного расположения прямой и эллипса путем определения их общих точек

Формально координаты общих точек могут быть найдены путем решения системы

$$\begin{cases} \frac{(x+1)^2}{4^2} + \frac{(y-y_0)^2}{3^2} = 1; \\ 5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Полученная система является нелинейной, при подстановке в первое уравнение явного выражения для y получается квадратное уравнение для x с параметром вида

$$\frac{169}{2304} \cdot x^2 - \frac{5 \cdot y_0 + 1}{72} \cdot x + \frac{y_0^2}{9} + \frac{4 \cdot y_0}{9} - \frac{71}{144} = 0. \quad (2)$$

Найдем выражение для дискриминанта квадратного уравнения (2) и разложим его на простые множители:

$$D = -y_0^2/36 - 37 \cdot y_0/288 + 445/3072 = (15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/9216.$$

Тогда

$$x_{1,2} = 1152 \cdot ((5 \cdot y_0 + 1)/72 \pm \sqrt{D})/169.$$

Очевидно, уравнение (2) не имеет действительных корней при $D < 0$, имеет действительный корень кратности 2 при $D = 0$ и пару различных действительных корней при $D > 0$.

Разложение дискриминанта на простые множители позволяет установить, что $D = 0$ при $y_{01} = 15/16$ и $y_{02} = -89/16$, т. е. при соответствующих значениях параметра система (1) имеет единственное решение, а прямая и эллипс – единственную общую точку (рис. 2). Найдем ее координаты при $y_{01} = 15/16$:

$$x_1 = 1152 \cdot (5 \cdot 15/16 + 1)/72/169 = 7/13,$$

тогда

$$y_1 = 5/16 \cdot 7/13 - 2 = -381/208,$$

т. е. точкой касания эллипса и прямой будет $M_1(7/13; -381/208)$. При $y_{02} = -89/16$

$$x_2 = 1152 \cdot (-5 \cdot 89/16 + 1)/72/169 = -33/13,$$

тогда

$$y_2 = 5/16 \cdot (-33/13) - 2 = -581/208,$$

т. е. точкой касания эллипса и прямой будет $M_2(-33/13; -581/208)$.

$$a := 4 \quad b := 3 \quad x_0 := -1 \quad x(t) := x_0 + a \cdot \cos(t) \quad y(t, y_0) := y_0 + b \cdot \sin(t)$$

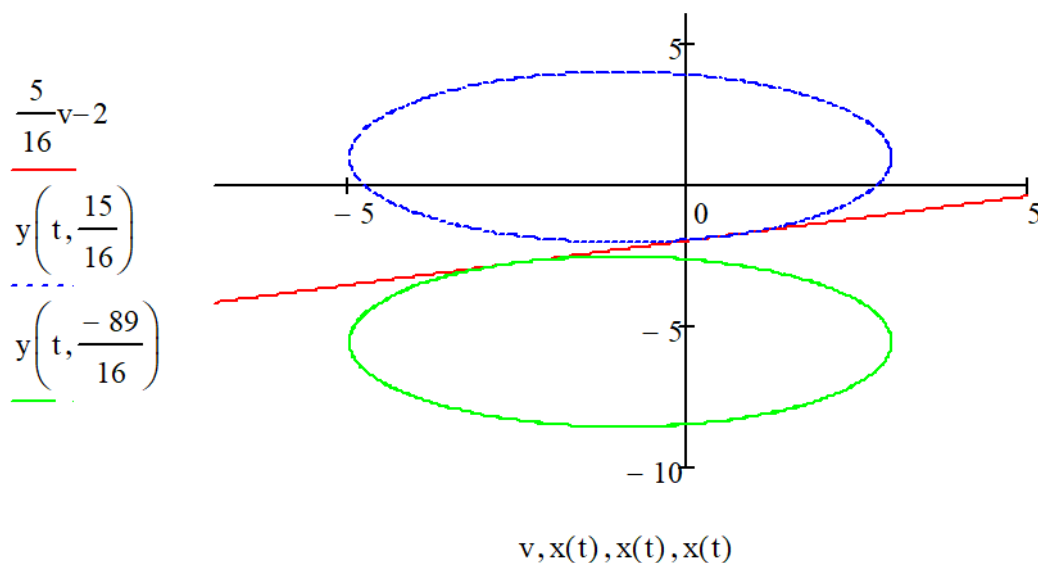


Рис. 2. Касание эллипса $(x + 1)^2/4^2 + (y - y_0)^2/3^2 = 1$ и прямой $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$
Fig. 2. Ellipse $(x + 1)^2/4^2 + (y - y_0)^2/3^2 = 1$ and the straight line $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$ points of contact

Если дискриминант положителен, т. е. $(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/9216 > 0$, то система (1) имеет два решения, а прямая пересекает эллипс в двух точках. Решение полученного неравенства имеет вид $-89/16 < y_0 < 15/16$. Абсциссы точек пересечения определяются выражениями:

$$x_{1,2} = 1152 \cdot ((5 \cdot y_0 + 1)/72 \pm \sqrt{(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/9216})/169,$$

откуда

$$x_1 = 16/169 + 80 \cdot y_0/169 + 12 \cdot \sqrt{(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/169},$$

$$x_2 = 16/169 + 80 \cdot y_0/169 - 12 \cdot \sqrt{(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/169}.$$

Ординаты точек пересечения равны соответственно

$$y_1 = 5 \cdot x_1/16 - 2 = 5 \cdot (16/169 + 80 \cdot y_0/169 + 12 \cdot \sqrt{(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/169})/16 - 2 =$$

$$= 25 \cdot y_0/169 - 333/169 + 15 \cdot \sqrt{(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/676},$$

$$y_2 = 5 \cdot x_2/16 - 2 = 5 \cdot (16/169 + 80 \cdot y_0/169 - 12 \cdot \sqrt{(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/169})/16 - 2 =$$

$$= 25 \cdot y_0/169 - 333/169 - 15 \cdot \sqrt{(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/676}.$$

Если дискриминант отрицателен, т. е. $(15 - 16 \cdot y_0) \cdot (16 \cdot y_0 + 89)/9216 < 0$, то система (1) не имеет решений, а прямая не пересекает эллипс. Решение полученного неравенства имеет вид $y_0 \in (-\infty; -89/16) \cup (15/16; +\infty)$.

3. Решение задачи взаимного расположения прямой и эллипса путем нахождения точки их касания

Задачу можно решить альтернативным способом, исходя из следующих соображений. В точке касания прямой и эллипса производная эллипса равна угловому коэффициенту касательной. Полученное равенство в совокупности с уравнениями прямой и эллипса дает систему трех уравнений с тремя неизвестными – искомым параметром и координатами точки касания.

В нашем случае производная эллипса находится по формуле производной неявной функции:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{(x+1)^2}{4^2} + \frac{(y-y_0)^2}{3^2} \right) = \frac{d}{dx} (1) \Rightarrow \frac{2 \cdot (x+1)}{16} + \frac{2 \cdot (y-y_0) \cdot y'}{9} = 0 \Rightarrow \frac{x+1}{8} + \frac{2 \cdot (y-y_0) \cdot y'}{9} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{2 \cdot (y-y_0) \cdot y'}{9} = -\frac{x+1}{8} \Rightarrow y' = -\frac{x+1}{8} \cdot \frac{9}{2 \cdot (y-y_0)} = -\frac{9}{16} \cdot \frac{x+1}{y-y_0}.$$

Равенство полученной производной в точке касания угловому коэффициенту рассматриваемой прямой дает соотношение вида

$$-\frac{9}{16} \cdot \frac{x_k + 1}{y_k - y_0} = \frac{5}{16}$$

или после преобразования

$$5 \cdot (y_k - y_0) + 9 \cdot (x_k + 1) = 0.$$

Поскольку точка касания лежит на прямой

$$5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0,$$

то полученная пара равенств образует систему двух линейных уравнений с параметром вида

$$\begin{cases} 5 \cdot (y_k - y_0) + 9 \cdot (x_k + 1) = 0; \\ 5 \cdot x_k - 16 \cdot y_k - 32 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Ее решение имеет вид

$$x_k = (80 \cdot y_0 + 16)/169;$$

$$y_k = (25 \cdot y_0 - 333)/169.$$

Подставляя полученные значения в уравнение эллипса, получаем квадратное уравнение относительно параметра y_0 вида

$$16 \cdot y_0^2/169 + 74 \cdot y_0/169 - 1335/2704 = 0.$$

Его решение дает пару действительных корней $y_{01} = 15/16$ и $y_{02} = -89/16$, совпадающих со значениями параметров, полученными выше. Подставляя полученные значения в выражения для координат точки касания, получаем

$$x_1 = (80 \cdot 15/16 + 16)/169 = 7/13;$$

$$x_2 = (80 \cdot (-89/16) + 16)/169 = -33/13;$$

$$y_1 = (25 \cdot 15/16 - 333)/169 = -381/208;$$

$$y_2 = (25 \cdot (-89/16) - 333)/169 = -581/208.$$

Понятно, что при значениях параметра, отличного от найденных, прямая будет либо пересекать эллипс, т. е. иметь с ним пару общих точек, либо не пересекать его, т. е. не иметь с ним общих точек. В соответствии с рис. 1 можно утверждать, что при превышении параметром соответствующего значения в верхней точке касания, т. е. при $y_0 > 15/16$, эллипс расположен выше прямой $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$ и не имеет с ней общих точек. Аналогично при значениях параметра меньших, чем в нижней точке касания, т. е. при $y_0 < -89/16$, эллипс расположен ниже прямой $5 \cdot x - 16 \cdot y - 32 = 0$ и также не имеет с ней общих точек. Соответственно, при $-89/16 < y_0 < 15/16$ прямая пересекает эллипс в двух точках. Координаты точек пересечения при этом придется искать как решение системы (1), причем случаи нулевого и отрицательного дискриминанта уравнения (2) можно не рассматривать.

Заметим, что все расчеты выполнены в Mathcad в силу громоздкости получаемых выражений.

4. Решение задачи взаимного расположения прямой и эллипса в Mathcad 15.0

Инструментальные средства удобно использовать, если требуется получить только ответ, но не решение, или для проверки правильности найденного решения. В нашем случае требуется именно последнее. При этом в процессе решения задачи обоими описанными выше способами Mathcad активно использовался, т. е. фактически были реализованы оба варианта. На рис. 3 представлен первый вариант решения. Очевидно, что полученные нами ранее аналитические результаты полностью подтверждаются расчетами в среде Mathcad, т. е. все три варианта решения задачи позволяют получить правильный ответ. Это означает, что полученное решение может быть использовано для проверки решения задачи студентами. Кроме того, изменяя значения числовых параметров кривых, на основании полученного решения можно подобрать их различные сочетания для получения необходимого количества вариантов с ответами из множества рациональных чисел. При этом мы не утверждаем, что способы решения задачи исчерпываются описанными нами, вполне возможно, что существуют другие способы решения, которые также могут быть реализованы в Mathcad.

Найдем координаты общих точек прямой и эллипса как решение соответствующей системы

$$\text{Given } \frac{(x+1)^2}{16} + \frac{(y-y_0)^2}{9} = 1 \quad 5x - 16y - 32 = 0$$

$$\text{Find}(x, y) \rightarrow \left(\begin{array}{l} \frac{80 \cdot y_0}{169} + \frac{12 \cdot \sqrt{1335 - 1184 \cdot y_0 - 256 \cdot y_0^2}}{169} + \frac{16}{169} \quad \frac{80 \cdot y_0}{169} - \frac{12 \cdot \sqrt{1335 - 1184 \cdot y_0 - 256 \cdot y_0^2}}{169} + \frac{16}{169} \\ \frac{25 \cdot y_0}{169} + \frac{15 \cdot \sqrt{1335 - 1184 \cdot y_0 - 256 \cdot y_0^2}}{676} - \frac{333}{169} \quad \frac{25 \cdot y_0}{169} - \frac{15 \cdot \sqrt{1335 - 1184 \cdot y_0 - 256 \cdot y_0^2}}{676} - \frac{333}{169} \end{array} \right)$$

Определим значения параметра, при которых подкоренное выражение равно нулю

$$D(y_0) := 1335 - 1184 \cdot y_0 - 256 \cdot y_0^2$$

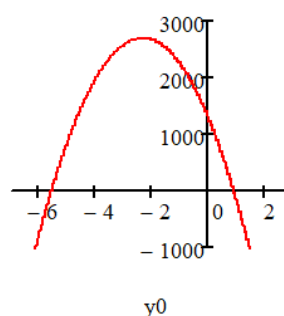
Построим график дискриминанта

$$\text{Given } D(y_0) = 0$$

$$\text{Find}(y_0) \rightarrow \left(\frac{15}{16} \quad -\frac{89}{16} \right)$$

При положительном дискриминанте, т.е. при $-89/16 < y_0 < 15/16$, получаем две точки пересечения с координатами, найденными выше. При отрицательном дискриминанте, т.е. при $y_0 < -89/16$ и $y_0 > 15/16$, прямая не пересекает эллипс.

$D(y_0)$



Найдем координаты точки касания при $y_0 = 15/16$ $y_{01} := \frac{15}{16}$

$$\text{Given } \frac{(x+1)^2}{16} + \frac{(y-y_{01})^2}{9} = 1 \quad 5x - 16y - 32 = 0 \quad \text{Find}(x, y)^T \rightarrow \left(\frac{7}{13} \quad -\frac{381}{208} \right)$$

Найдем координаты точки касания при $y_0 = -89/16$ $y_{02} := -\frac{89}{16}$

$$\text{Given } \frac{(x+1)^2}{16} + \frac{(y-y_{02})^2}{9} = 1 \quad 5x - 16y - 32 = 0 \quad \text{Find}(x, y)^T \rightarrow \left(-\frac{33}{13} \quad -\frac{581}{208} \right)$$

Рис. 3. Решение задачи взаимного расположения эллипса $(x+1)^2/4^2 + (y-y_0)^2/3^2 = 1$ и прямой $5x - 16y - 32 = 0$ в зависимости от параметра y_0 в среде Mathcad 15.0

Fig. 3. Relative position of ellipse $(x+1)^2/4^2 + (y-y_0)^2/3^2 = 1$ and straight line $5x - 16y - 32 = 0$ problem solution depending on the parameter y_0 in Mathcad 15.0

Закключение

Приведенные в работе варианты решения задачи определения взаимного расположения эллипса и прямой в зависимости от ординаты центра эллипса позволяют убедиться возможности разработки различных способов решения задачи с параметром в соответствии с навыками и предпочтениями решающего ее лица и реализации этого способа в математическом пакете. При этом Mathcad оказывается не только удобным средством визуализации и решения задачи в рамках собственного функционала, но и незаменимым инструментом, позволяющим сконструировать различные варианты аналитического решения, автоматизировать арифметические вычисления и алгебраические преобразования с целью устранить соответствующие ошибки, подобрать числовые значения и их сочетания для обеспечения требуемого вида решения и генерации необходимого числа вариантов задачи. Это позволяет использовать его как удобную и гибкую среду разработки, реализации и проверки правильности методов решения различных задач с параметрами.

Список литературы

1. Temiz I., Akuner C. Comparison of traditional education to computer aided education: simulation of three-phase rotating area in an induction machine // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2009. Vol. 1, iss. 1. P. 1825–1833. DOI: 10.1016/j.sbspro.2009.01.323

2. Aesthetic education: the process of teaching mathematics with the open-source software / A. Aktayeva, E. Zubareva, A. Dautov et al. // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 285–293. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.015
3. A Matlab-Based Game for Advanced Automatic Control Education / U. Münz, C. Böhm, J. Eck et al. // *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Vol. 42, iss. 24. P. 140–145. DOI: 10.3182/20091021-3-JP-2009.00027
4. Кузьмин С.Г., Костюченко Р.Ю. Задачи с параметрами в обучении школьников геометрии // *Мир науки, культуры и образования*. 2024. № 4 (107). С. 241–243.
5. Гузаиров Г.М., Мунасыпов Н.А., Сафарова А.Д., Черемисина М.И. Двойная подстановка в доказательствах и при решении тригонометрических неравенств // *Мир науки, культуры и образования*. 2021. № 4 (89). С. 110–113.
6. Здоровенко М.Ю., Зеленина Н.А. Замена переменной в задачах с параметрами // *Концепт*. 2018. № V7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zamena-peremennoy-v-zadachah-s-parametrami> (дата обращения: 24.01.2025) DOI: 10.24422/МСИТО.2018.V7.14884
7. Алексеева Т.А., Коропец А.А. Применение пакета Mathcad в школьном курсе математики (решение задач с параметрами) // *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия «Информатика и информатизация образования»*. 2006. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-paketa-mathcad-v-shkolnom-kurse-matematiki-reshenie-zadach-s-parametrami> (дата обращения: 24.01.2025).
8. Власов Д.А., Синчуков А.В., Качалова Г.А. Использование WolframAlpha при обучении решению задач с параметрами // *Вестник РУДН. Серия: Информатизация образования*. 2014. № 1. С. 64–72.
9. Выговская Л.С. Решение обратной задачи аналитической геометрии в системе Mathcad посредством инструментария класса R-функций // *Преподаватель XXI век*. 2020. № 3. С. 115–124. DOI: 10.31862/2073-9613-2020-3-115-124
10. Кузьмин О.В., Палеева М.Л. Потенциал прикладных заданий в обучении математике бакалавров технических направлений // *Вестник ИргТУ*. 2012. № 10 (69). С. 362–366.
11. Степура Е.А., Зонтов Р.А. Применение системы компьютерной математики Wolfram Mathematica при решении задач начертательной геометрии // *Вестник МГСУ*. 2011. № 2. С. 352–357.
12. Ваванов Д.А., Иващенко А.В. Линия пересечения двух однополостных гиперболоидов вращения разной формы // *Инновации и инвестиции*. 2019. № 1. С. 160–163.
13. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д., Мустакимова С.А. Геометрическое моделирование сложных поверхностей пружинно-витых каналов теплообменных устройств // *Известия КазГАСУ*. 2011. № 4 (18). С. 185–192.
14. Modeling time and topology for animation and visualization with examples on parametric geometry / K.E. Jordan, L.E. Miller, E.L.F. Moore et al. // *Theoretical Computer Science*. 2008. Vol. 405, iss. 1–2. P. 41–49. DOI: 10.1016/j.tcs.2008.06.023
15. Bochnia J. Ideal Material Models for Engineering Calculations // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 39. P. 98–110. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.013
16. Experimental study and parametric analysis of temperature fields in corrugated web steel beams under solar radiation / Ch. Cai, Z. Zhou, Sh. Huang et al. // *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 114. P. 381–403. DOI: 10.1016/j.aej.2024.11.086
17. Gajšek A., Tekavčič M., Končar B. Parametric study of population balance model on the DEBORA flow boiling experiment // *Nuclear Engineering and Technology*. 2024. Vol. 56, iss. 2. P. 624–635. DOI: 10.1016/j.net.2023.10.039
18. Pradovera D., Borghi A. Match-based solution of general parametric eigenvalue problems // *Journal of Computational Physics*. 2024. Vol. 519. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999124006326> (дата обращения: 24.01.2025). DOI: 10.1016/j.jcp.2024.113384
19. Chasapi M., Antolin P., Buffa A. A localized reduced basis approach for unfitted domain methods on parameterized geometries // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 410. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782523001214> (дата обращения: 24.01.2025). DOI: 10.1016/j.cma.2023.115997

20. Clarenz U., von der Mosel H. Isoperimetric inequalities for parametric variational problems // *Annales de l'Institut Henri Poincaré C, Analyse non linéaire*. 2002. Vol. 19, iss. 5. P. 617–629. DOI: 10.1016/S0294-1449(02)00096-3

References

1. Temiz I., Akuner C. Comparison of traditional education to computer aided education: simulation of three-phase rotating area in an induction machine. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2009;1(1):1825–1833. DOI: 10.1016/j.sbspro.2009.01.323
2. Aktayeva A., Zubareva E., Dautov A., Saginbayeva K., Niyazova R., Khan S., Shonasheva A. Aesthetic education: the process of teaching mathematics with the open-source software. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:285–293. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.015
3. Münz U., Böhm C., Eck J., Reble M., Schumm P., Allgöwer F. A Matlab-Based Game for Advanced Automatic Control Education. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010;42(24):140–145. DOI: 10.3182/20091021-3-JP-2009.00027
4. Kuzmin S.G., Kostyuchenko R.Yu. Problems with parameters in teaching geometry to schoolchildren. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya = The world of science, culture and education*. 2024;4(107):241–243. (In Russ.)
5. Guzairov G.M., Munasypov N.A., Safarova A.D., Cheremisina M.I. Double substitution in the proof and in solving trigonometric inequalities. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya = The world of science, culture and education*. 2021;4(89):110–113. (In Russ.)
6. Zdorovenko M.Yu., Zelenina N.A. Change of variable in tasks with parameters. *Koncept*. 2018;(V7). (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zamena-peremennoy-v-zadachah-s-parametrami> (accessed 24.01.2025) DOI: 10.24422/MCITO.2018.V7.14884
7. Alekseeva T.A., Koropets A.A. [Application of Mathcad software in the school mathematics course (solving problems with parameters)]. *Vestnik Moscow city teacher training university. Informatics and informatization of education*. 2006;(7). (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-paketa-mathcad-v-shkolnom-kurse-matematiki-reshenie-zadach-s-parametrami> (accessed 24.01.2025).
8. Vlasov D.A., Sinchukov A.V., Kachalova G.A. WolframAlpha use when training in the solution of tasks with parameters. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Informatization of education*. 2014;(1):64–72. (In Russ.)
9. Vygovskaya L.S. Solving the inverse problem of analytical geometry in Mathcad system using the tools of the R-function class. *Prepodavatel XXI vek*. 2020;(3):115–124. (In Russ.) DOI: 10.31862/2073-9613-2020-3-115-124
10. Kuzmin O.V., Paleeva M.L. Applied task potential in teaching technical bachelors mathematics. *Proceedings of Irkutsk state technical university = Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2012;10(69):362–366. (In Russ.)
11. Stepura E.A., Zontov R.A. Application of computer mathematics Wolfram Mathematica in solving problems descriptive geometry. *Vestnik MGSU*. 2011;(2):352–357. (In Russ.)
12. Vavanov D.A., Ivashchenko A.V. Line of crossing two universe hyperboloids of rotation of a different form. *Innovacii i investicii*. 2019;(1):160–163. (In Russ.)
13. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Mustakimova S.A. Geometrical modelling of difficult surfaces of spring-twisted channels of heat exchange devices. *News of the KSUAE*. 2011;4(18):85–192. (In Russ.)
14. Jordan K.E., Miller L.E., Moore E.L.F., Peters T.J., Russell A. Modeling time and topology for animation and visualization with examples on parametric geometry. *Theoretical Computer Science*. 2008;405(1–2):41–49. DOI: 10.1016/j.tcs.2008.06.023
15. Bochnia J. Ideal Material Models for Engineering Calculations. *Procedia Engineering*. 2012;39:98–110. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.013
16. Cai Ch., Zhou Z., Huang Sh., He X., Zou Y., Sun M. Experimental study and parametric analysis of temperature fields in corrugated web steel beams under solar radiation. *Alexandria Engineering Journal*. 2025;114:381–403. DOI: 10.1016/j.aej.2024.11.086
17. Gajšek A., Tekavčič M., Končar B. Parametric study of population balance model on the DEBORA flow boiling experiment. *Nuclear Engineering and Technology*. 2024;56(2):624–635. DOI: 10.1016/j.net.2023.10.039

18. Pradovera D., Borghi A. Match-based solution of general parametric eigenvalue problems. *Journal of Computational Physics*. 2024;519. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999124006326> (accessed 24.01.2025). DOI: 10.1016/j.jcp.2024.113384

19. Chasapi M., Antolin P., Buffa A. A localized reduced basis approach for unfitted domain methods on parameterized geometries. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023;410. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782523001214> (accessed 24.01.2025). DOI: 10.1016/j.cma.2023.115997

20. Clarenz U., von der Mosel H. Isoperimetric inequalities for parametric variational problems. *Annales de l'Institut Henri Poincaré C, Analyse non linéaire*. 2002;19(5):617–629. DOI: 10.1016/S0294-1449(02)00096-3

Информация об авторах

Копотева Анна Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры общенаучных дисциплин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; kopoteva_av@mail.ru.

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

Мамаев Дмитрий Альбертович, студент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; dmitrijmamaev0@yandex.ru.

Information about the authors

Anna V. Kopoteva, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of General Scientific Disciplines, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; kopoteva_av@mail.ru.

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

Dmitrij A. Mamaev, Student of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; dmitrijmamaev0@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 02.04.2025

The article was submitted 02.04.2025

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ В УПРАВЛЕНИИ РЕСУРСОМ ОБОРУДОВАНИЯ НАУКОЕМКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.А. Белякова, beliakovava@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

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

А.А. Шинкарев, shinkarevaa@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Современные наукоемкие производства требуют высокой точности, надежности и эффективности работы оборудования. Отказ критически важных узлов может привести к значительным финансовым потерям, нарушению технологических процессов, а также угрозе безопасности. В этой связи управление оборудованием и прогнозирование остаточного ресурса становятся ключевыми задачами для обеспечения бесперебойной работы предприятий. В данной работе произведен анализ влияния технологических параметров и химического состава стали на остаточный ресурс кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок. Разработана комплексная онтологическая модель, интегрирующая данные о температуре стали, механических нагрузках, содержании легирующих элементов и геометрических характеристиках оборудования. **Цель:** разработка онтологической модели для семантической интеграции разнородных данных и повышения точности прогнозирования остаточного ресурса оборудования с помощью гибридного подхода онтологического инжиниринга и методов машинного обучения. **Материалы и методы.** Разработана OWL-онтология, включающая классы «Кристаллизатор», «Химический состав», «Технологические параметры». Реализованы SPARQL-запросы для выявления зависимостей между параметрами работы и остаточного ресурса кристаллизатора. Интегрированы методы машинного обучения для прогнозирования и обнаружения аномалий. **Результаты.** Выявлены ключевые факторы влияния: температура стали, содержание меди, геометрия заготовки. Достигнута точность прогнозирования $R^2 = 0,85$, превышающая традиционные статистические методы. Разработаны правила логического вывода для автоматического определения критических состояний оборудования. **Заключение.** Проведенное исследование продемонстрировало эффективность комплексного подхода к прогнозированию остаточного ресурса кристаллизаторов машины непрерывного литья заготовок, объединяющего анализ технологических параметров, химического состава стали и геометрических характеристик оборудования. Внедрение методов машинного обучения и онтологического инжиниринга в управление оборудованием наукоемких производств позволяет перейти от реактивного к прогнозному обслуживанию, снижая затраты и повышая надежность. Это особенно важно в отраслях, где стоимость простоя крайне высока, а требования к безопасности и точности критичны. Дальнейшее развитие этих технологий, включая интеграцию с цифровыми двойниками и когнитивными системами, открывает новые возможности для Индустрии 4.0 и «умных» производств.

Ключевые слова: кристаллизатор МНЛЗ, онтологический инжиниринг, прогнозирование остаточного ресурса, наукоемкое производство, машинное обучение, семантический анализ

Для цитирования: Белякова В.А., Логиновский О.В., Шинкарев А.А. Онтологический инжиниринг в управлении ресурсом оборудования наукоемкого производства // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 26–41. DOI: 10.14529/ctcr250303

ONTOLOGY-BASED EQUIPMENT RESOURCE CONTROL IN KNOWLEDGE-INTENSIVE MANUFACTURING

V.A. *Beliakova*, beliakovava@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

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

A.A. *Shinkarev*, shinkarevaa@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Modern knowledge-intensive manufacturing requires high precision, reliability, and efficiency of equipment operation. The failure of critical components can lead to significant financial losses, disruption of technological processes, and safety risks. In this context, equipment management and residual life prediction become key tasks to ensure uninterrupted production. This study analyzes the influence of technological parameters and steel chemical composition on the residual life of continuous casting machine molds. A comprehensive ontological model integrating data on steel temperature, mechanical loads, alloying elements, and equipment geometric characteristics has been developed. **Objective:** to design an ontological model for semantic integration of heterogeneous data and improving equipment residual life prediction accuracy using a hybrid approach combining ontological engineering and machine learning methods. **Materials and methods.** An OWL ontology was developed, including classes such as “Mold,” “Chemical Composition,” and “Technological Parameters.” SPARQL queries were implemented to identify dependencies between operational parameters and mold residual life. Machine learning methods were integrated for prediction and anomaly detection. **Results.** Key influencing factors were identified: steel temperature, copper content, and billet geometry. A prediction accuracy of $R^2 = 0.85$ was achieved, surpassing traditional statistical methods. Logical inference rules were developed for automatic detection of critical equipment conditions. **Conclusion.** The study demonstrated the effectiveness of a comprehensive approach to predicting the residual life of continuous casting machine molds, combining analysis of technological parameters, steel chemical composition, and equipment geometry. The integration of machine learning and ontological engineering into high-tech equipment management enables a shift from reactive to predictive maintenance, reducing costs and improving reliability. This is particularly crucial in industries where downtime costs are extremely high, and safety and precision requirements are critical. Further development of these technologies, including integration with digital twins and cognitive systems, opens new opportunities for Industry 4.0 and smart manufacturing.

Keywords: CCM crystallizer, ontological engineering, residual resource forecasting, knowledge-intensive manufacturing, machine learning, semantic analysis

For citation: Beliakova V.A., Loginovskiy O.V., Shinkarev A.A. Ontology-based equipment resource control in knowledge-intensive manufacturing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):26–41. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250303

Введение

Современные металлургические предприятия демонстрируют активную интеграцию инновационных решений, сопровождающуюся ростом инвестиций в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), направленных на оптимизацию производительности труда, минимизацию брака и сокращение простоев технологического оборудования, что способствует трансформации отрасли в ключевой элемент наукоемких производственных систем. Вместе с тем эксплуатация кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) сопряжена с технологическими вызовами, обусловленными экстремальными рабочими условиями, включающими температурные воздействия свыше 1500 °C и механические нагрузки в диапазоне 3123–5964 тонн [1], что в сочетании с широким спектром марок стали и вариативностью геометрических параметров как заготовок, так и самих кристаллизаторов формирует многокомпонентную задачу управления ресурсом оборудования, требующую комплексных инженерных и научных решений.

Существующие подходы к мониторингу и прогнозированию остаточного срока службы (RUL) демонстрируют некоторые ограничения. Так, традиционные статистические методы обладают недостаточной точностью ($R^2 \approx 0,65$) [2], в то время как решения на основе машинного обу-

чения часто работают как «черный ящик» [3], что затрудняет их практическое применение. Отсутствие комплексных систем, способных интегрировать и анализировать все значимые параметры работы оборудования, приводит к неоптимальным решениям в области технического обслуживания и ремонтов.

Экономические последствия этих проблем весьма значительны. Незапланированные простои технологического оборудования, преждевременный износ дорогостоящих кристаллизаторов и сопутствующее ухудшение качества продукции создают дополнительные финансовые риски и угрозы производственной безопасности.

Научная новизна данного исследования заключается в разработке подхода, объединяющего семантические технологии и современные методы машинного обучения. Создаваемая онтологическая модель позволяет комплексно учитывать технологические параметры, химический состав стали и конструктивные особенности оборудования. Особое внимание уделяется разработке механизмов логического вывода, способных не только прогнозировать остаточный ресурс, но и автоматически выявлять аномальные режимы работы, формируя практические рекомендации для производственного персонала.

Практическая значимость исследования проявляется в нескольких аспектах. Для производственных предприятий внедрение предлагаемых решений означает потенциальное снижение простоев, увеличение межремонтных периодов и существенную оптимизацию затрат на техническое обслуживание. В работе предложен новый методологический подход к интеграции разнородных промышленных данных, который может быть адаптирован для различных типов сложного технологического оборудования, обеспечивая соответствующий цикл наукоемкого производства.

Целью данной работы является разработка онтологии для интеграции данных и повышения точности прогнозирования ресурса оборудования наукоемкого производства.

1. Материалы и методы

Методологическая основа исследования базируется на трех ключевых компонентах: принципах семантического веба (OWL, SPARQL), современных ML-фреймворках (XGBoost, TensorFlow) и промышленных стандартах мониторинга оборудования. Такой комплексный подход позволяет преодолеть принципиальные ограничения существующих решений за счет обеспечения полноты учета параметров, улучшенной интерпретируемости результатов и высокой гибкости системы.

В качестве основной гипотезы исследования предполагается, что комбинация онтологического моделирования и машинного обучения позволит создать более точные и надежные системы прогнозирования ресурса оборудования. Это достигается за счет семантической интеграции всех значимых параметров работы, что невозможно при использовании традиционных методов анализа данных. Разрабатываемая система предназначена не только для прогнозирования, но и для поддержки принятия решений, предоставляя производственному персоналу наукоемкого предприятия понятные и обоснованные рекомендации по управлению оборудованием и предотвращению аварий.

Современные подходы к прогнозированию остаточного ресурса оборудования можно разделить на три основные группы [3], каждая из которых имеет свои преимущества и существенные ограничения.

Статистические методы [4], включая регрессионный анализ и методы временных рядов, традиционно применяются в промышленности благодаря своей простоте и интерпретируемости. Однако, как показали исследования [5], при работе с многомерными данными кристаллизаторов МНЛЗ эти методы демонстрируют низкую точность ($R^2 \approx 0,65$), что связано с их неспособностью адекватно учитывать нелинейные взаимосвязи между параметрами. Особенно ярко это проявляется при анализе комплексного влияния химического состава стали на износ оборудования, где традиционные статистические модели учитывают не более 3–5 основных элементов из 24 присутствующих в данных [6–12].

Методы машинного обучения, особенно алгоритмы типа XGBoost и нейронные сети, показывают значительно лучшие результаты [13]. Тем не менее, как отмечают [14–16], промышленное внедрение этих методов сталкивается с двумя ключевыми проблемами. Во-первых, большинство ML-моделей работают как «черные ящики», что затрудняет интерпретацию результатов и принятие инженерных решений. Во-вторых, для эффективной работы они требуют больших

объемов размеченных данных, которые часто отсутствуют для редких, но критически важных режимов работы оборудования.

Физические модели износа [17] теоретически могли бы преодолеть эти ограничения. Однако их практическое применение ограничено чрезвычайной сложностью математического описания всех взаимодействующих факторов в реальных производственных условиях. Как показал анализ [18], расхождения между теоретическими предсказаниями и фактическими данными могут достигать 40–60 %.

Онтологический подход, предлагаемый в данном исследовании, позволяет преодолеть указанные ограничения за счет нескольких принципиальных преимуществ. Во-первых, как демонстрирует [19], семантические модели обеспечивают естественную интеграцию разнородных данных – от технологических параметров до химического состава. Во-вторых, онтологии позволяют сохранить интерпретируемость, характерную для статистических методов, при этом достигая точности, сопоставимой с ML-алгоритмами [20].

Особенно важно, что онтологический подход, в отличие от методов, основанных только на данных, позволяет формализовать экспертные знания о процессах износа. Как отмечают [21], это критически важно для промышленных применений, где необходимо не просто предсказание, но и понимание причинно-следственных связей. Кроме того, разработанная система может эволюционировать вместе с технологическим процессом, добавляя новые параметры и взаимосвязи без необходимости полного переобучения модели.

2. Постановка задачи

В рамках данного исследования была разработана комплексная методологическая база, объединяющая современные подходы к анализу данных и прогнозированию ресурса оборудования. Основу исследования составили производственные данные, собираемые в режиме реального времени с 28 кристаллизаторами МНЛЗ на протяжении 18 месяцев непрерывной эксплуатации.

Технологические параметры представляют собой наиболее динамичную составляющую данных и включают температурные показатели (стали, охлаждающей жидкости, стенок кристаллизатора), механические нагрузки (сопротивление, усилия, вибрации), параметры системы охлаждения (расход воды, перепады давления), а также временные характеристики технологических циклов. Особое значение имеет мониторинг температурных режимов, где отклонения даже на 10–15 °C от оптимальных могут существенно влиять на ресурс оборудования.

Химический состав стали анализируется по 24 ключевым элементам, включая углерод (C), кремний (Si), марганец (Mn), медь (Cu) и никель (Ni). Данные получают методом спектрального анализа для каждой отдельной плавки, что позволяет установить четкие корреляции между составом стали и темпами износа кристаллизатора. Особое внимание уделяется показателям чистоты стали и содержанию микроскопических включений, которые могут ускорять деградацию рабочих поверхностей.

Геометрические параметры включают как постоянные характеристики (размеры заготовок 150×150 и 180×180 мм), так и изменяющиеся во времени показатели износа рабочих поверхностей. Эти данные особенно важны для понимания пространственного распределения нагрузок и прогнозирования локальных повреждений.

Особое место в исследовании занимает анализ аномальных режимов работы, представляющих наибольшую опасность для оборудования. Наиболее показательной является комбинация повышенной температуры стали (> 1570 °C) с высоким содержанием меди (> 0,035 %). Статистический анализ показал, что такие условия эксплуатации приводят к ускоренному износу (в 2,3 раза выше среднего), снижению остаточного ресурса на 35–40 % и существенному повышению вероятности аварийных ситуаций. Для своевременного выявления подобных аномалий был разработан специальный алгоритм, сочетающий онтологическую классификацию режимов работы, статистические критерии (правило 3σ) и современные методы машинного обучения (Isolation Forest).

Методика обработки данных включает три последовательных этапа. На этапе предварительной обработки выполняется нормализация и стандартизация параметров, заполнение пропущенных значений, фильтрация шумов и артефактов измерений. Семантическая интеграция предполагает построение комплексной онтологической модели, установление связей между разнородными параметрами и разработку правил логического вывода. Заключительный этап аналитической

обработки включает многомерный статистический анализ, применение методов машинного обучения для прогнозирования RUL и визуализацию комплексных зависимостей.

Прогнозирование остаточного ресурса оборудования (RUL) производится на основании уравнения регрессии

$$RUL = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 C_{Cu} + \beta_3 G + \beta_4 (T \cdot C_{Cu}) + \varepsilon, \quad (1)$$

где T – температура стали, °C); C_{Cu} – содержание меди, %; G – геометрический параметр (например, размер заготовки в мм); β_i – коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов; ε – ошибка модели.

Доверительные интервалы для коэффициентов β_i приняты как $\beta_i \pm t_{\alpha/2} \cdot \sigma_{\beta_i}$, где σ_{β_i} – стандартная ошибка коэффициента регрессии; $t_{\alpha/2}$ – критическое значение t -распределения для уровня значимости α .

Разработанная методология обладает рядом принципиальных преимуществ. Во-первых, она обеспечивает комплексный учет всех значимых параметров работы оборудования. Во-вторых, система обладает высокой гибкостью и позволяет легко интегрировать новые данные и параметры. В-третьих, сохраняется высокая интерпретируемость результатов, что критически важно для принятия инженерных решений. Наконец, предложенный подход обладает хорошей масштабируемостью и может быть адаптирован для различных типов промышленного оборудования.

3. Описание онтологической модели

Разработанная онтологическая модель представляет собой формализованное описание предметной области, визуализированное в виде семантического графа. В центре модели находится класс «Кристаллизатор» (Crystallizer), который через систему отношений соединяется с тремя ключевыми группами параметров: параметрами работы, химическим составом стали, а также геометрией сляба.

На рис. 1 представлена визуализация онтологической схемы в виде направленного графа, отображающего ключевые классы онтологий и их взаимосвязи.

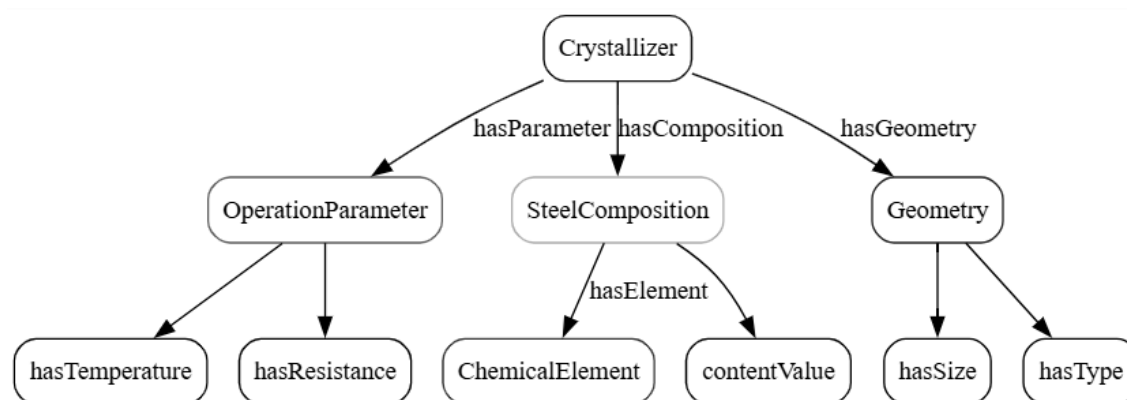


Рис. 1. Графовая онтологическая модель кристаллизатора
Fig. 1. Crystallizer ontology graph model

Семантическая структура модели включает следующие компоненты.

1. Класс Crystallizer является центральным узлом модели и представляет конкретную единицу оборудования. Он связан отношениями: hasParameter (с технологическими параметрами работы), hasComposition (с химическим составом стали), hasGeometry (с геометрическими характеристиками).

2. Технологические параметры включают: температурные показатели (hasTemperature), механические нагрузки (hasResistance), параметры охлаждения (hasWaterConsumption).

3. Химический состав описывается через конкретные элементы (Carbon, Copper) и их процентное содержание (contentValue).

Ключевые особенности реализации включают модульную архитектуру с четким разделением аспектов, поддержку автоматического логического вывода и совместимость с промышленными стандартами, обеспечивая при этом возможность расширения новыми параметрами. Данная модель служит основой для комплексного анализа состояния оборудования, прогнозирования оста-

точного ресурса, формирования рекомендаций по обслуживанию и эффективной интеграции с системами промышленного интернета вещей.

4. Интеграция онтологий с методами машинного обучения

Разработанная онтологическая модель существенно расширяет возможности традиционных методов машинного обучения за счет семантического обогащения исходных признаков. В контексте использования алгоритмов градиентного бустинга деревьев решений XGBoost и алгоритма поиска аномалий Isolation Forest онтология выполняет несколько ключевых функций, преобразующих исходные данные в более информативное пространство признаков.

Применение онтологического подхода позволяет преодолеть принципиальные ограничения «сырых» данных, которые обычно представляют собой разрозненные числовые показатели датчиков и результатов лабораторных анализов. Онтология устанавливает семантические связи между этими разрозненными параметрами, создавая целостную картину технологического процесса. Для алгоритма XGBoost это означает появление новых производных признаков, отражающих комплексное взаимодействие факторов, таких как совместное влияние температуры стали и содержания меди на скорость износа кристаллизатора.

Особую ценность онтологическая модель представляет для методов обнаружения аномалий, в частности для Isolation Forest. Семантическое описание нормальных режимов работы позволяет алгоритму более точно идентифицировать границы аномального поведения. Онтология формализует экспертные знания о критических сочетаниях параметров, которые затем используются для настройки чувствительности модели. Например, комбинация повышенной температуры ($> 1570\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высокого содержания меди ($> 0,035\%$) автоматически маркируется как потенциально опасная, что помогает алгоритму сосредоточиться на наиболее значимых отклонениях.

Важным аспектом интеграции является возможность онтологии предоставлять контекст для интерпретации результатов машинного обучения. Если традиционные методы выдают лишь числовые показатели важности признаков, то семантическая модель позволяет объяснить, почему определенные параметры оказывают наибольшее влияние на прогноз. Это особенно ценно для таких алгоритмов, как XGBoost, где онтология помогает раскрыть «черный ящик», устанавливая смысловые связи между наиболее значимыми признаками и физическими процессами износа.

Для алгоритма XGBoost онтологическая обработка создает производные признаки второго порядка, такие как зависимость термомеханического напряжения от температуры и содержания меди, что подтверждается диаграммой важности признаков (рис. 2).

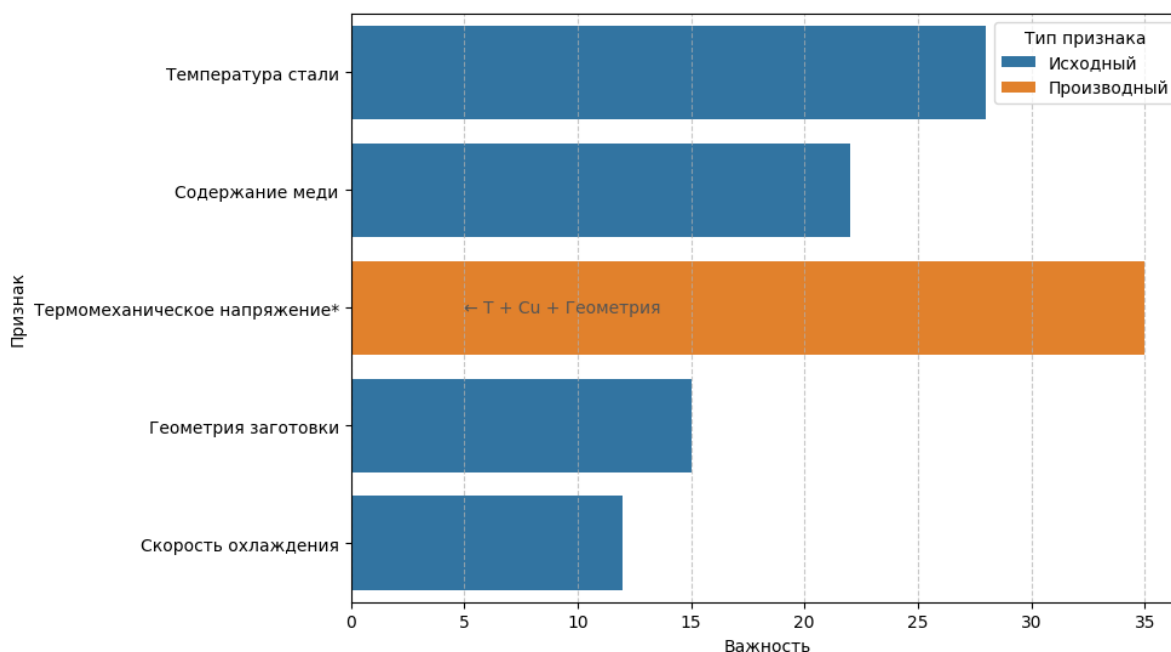


Рис. 2. Важность признаков с онтологическими связями в прогнозировании ресурса кристаллизатора
Fig. 2. Feature importance with ontological relationships in crystallizer RUL prediction

На графике видно, что семантически обогащенные признаки занимают верхние позиции с важностью 22–35 %, тогда как исходные параметры в изоляции не превышают 15 %.

Преобразование данных через онтологическую модель также решает проблему разреженности и неполноты исходных данных. Семантические правила позволяют логически выводить недостающие значения на основе имеющихся зависимостей, что значительно улучшает качество подготовки данных для обучения моделей. Для модели Isolation Forest это означает более надежное выделение аномалий, а для XGBoost – повышение точности прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

Трехмерная точечная диаграмма (рис. 3) демонстрирует выявление аномальных точек алгоритмом Isolation Forest в пространстве параметров {Температура, Содержание меди, Остаточный ресурс}, где красным цветом выделены кластеры, соответствующие критическим зонам, определенным онтологической моделью (температура > 1570 °C и содержание меди > 0,035 %).

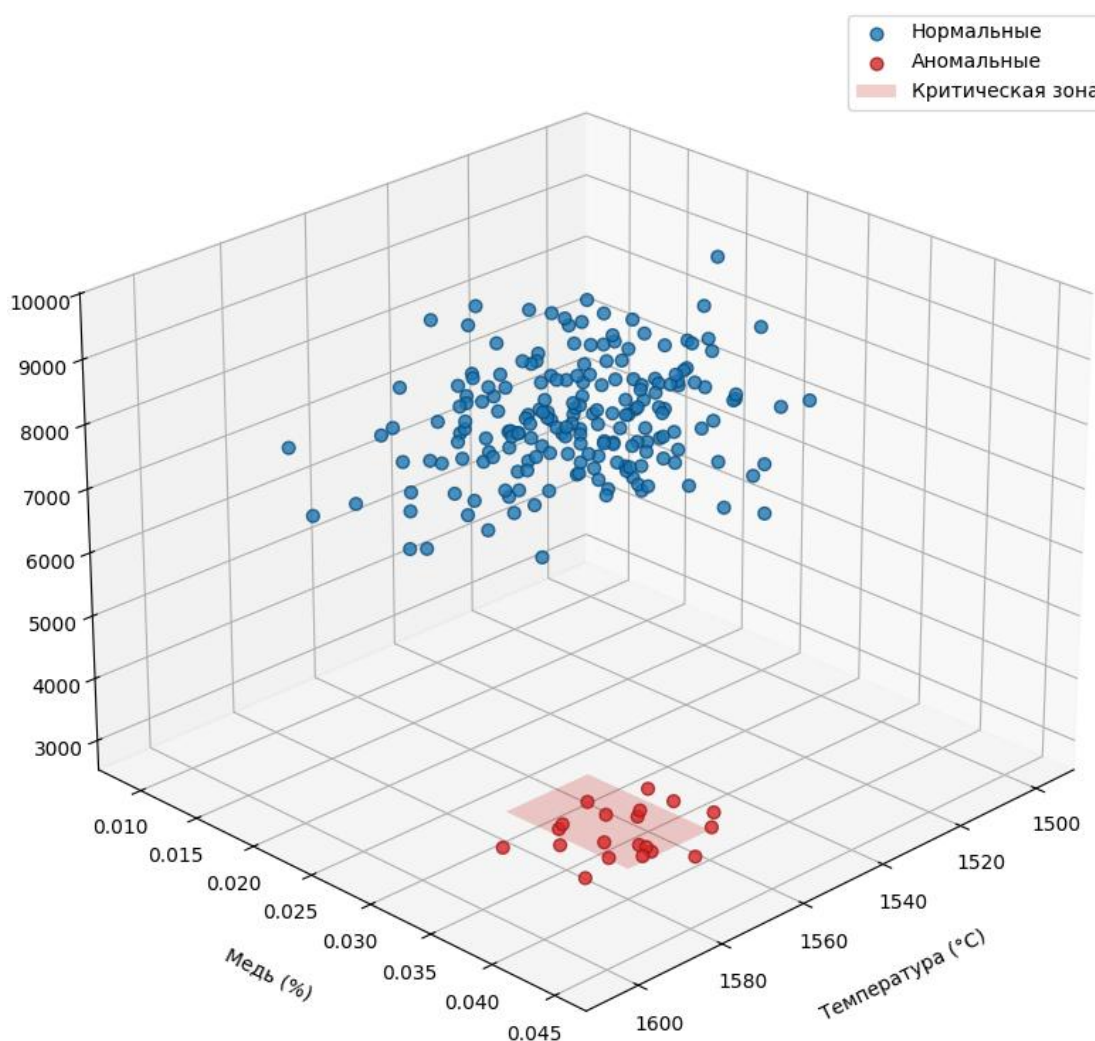


Рис. 3. Трехмерная визуализация аномальных режимов работы кристаллизатора с выделением критических зон

Fig. 3. 3D visualization of crystallizer anomalous operating modes with critical zones highlighting

Количественное сравнение метрик качества: коэффициент детерминации R^2 для XGBoost увеличился с 0,72 до 0,85 после интеграции с онтологической моделью, а F1-мера для Isolation Forest улучшилась с 0,81 до 0,93. Семантические правила позволили сократить долю ложных срабатываний на 40 %, что существенно повышает практическую применимость системы в промышленных условиях (рис. 4).

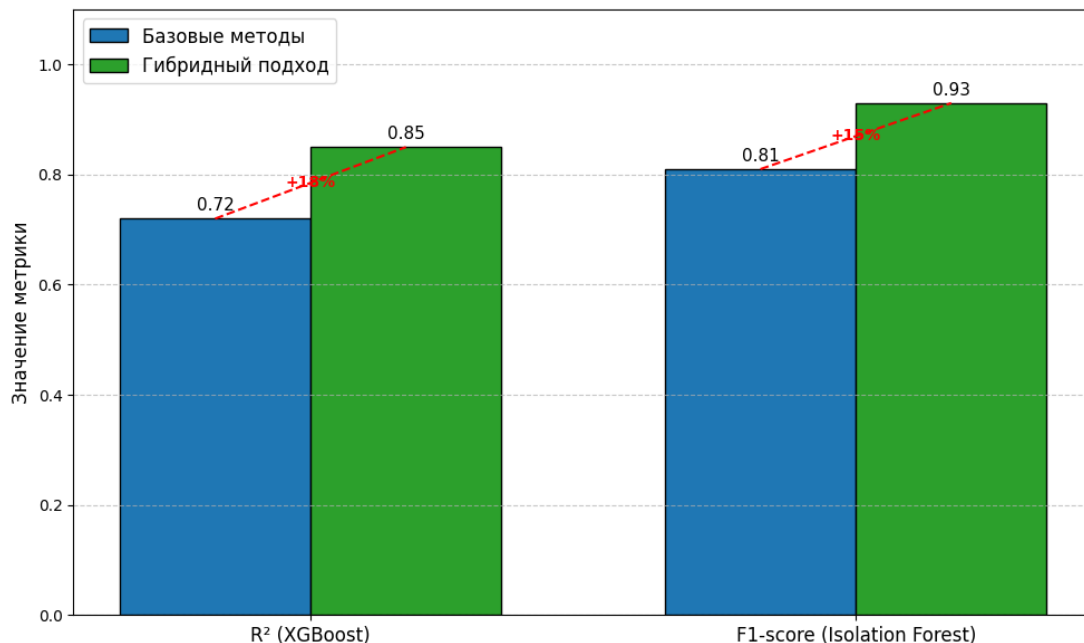


Рис. 4. Сравнение эффективности базового и гибридного подходов

Fig. 4. Performance comparison of baseline and hybrid approaches

Механизм интерпретации, показанный на семантической сети (рис. 5), раскрывает цепочки логического вывода: от сырых данных через ML-прогнозы к конкретным инженерным рекомендациям. Такой симбиоз технологий обеспечивает не только более точные прогнозы остаточного ресурса, но и принципиально новый уровень объяснимости результатов. Визуализация когнитивных связей между физическими параметрами и их влиянием на износ оборудования позволяет технологам принимать обоснованные решения, опираясь не только на «черный ящик» ML-моделей, но и на формализованные экспертные знания, заложенные в онтологию.

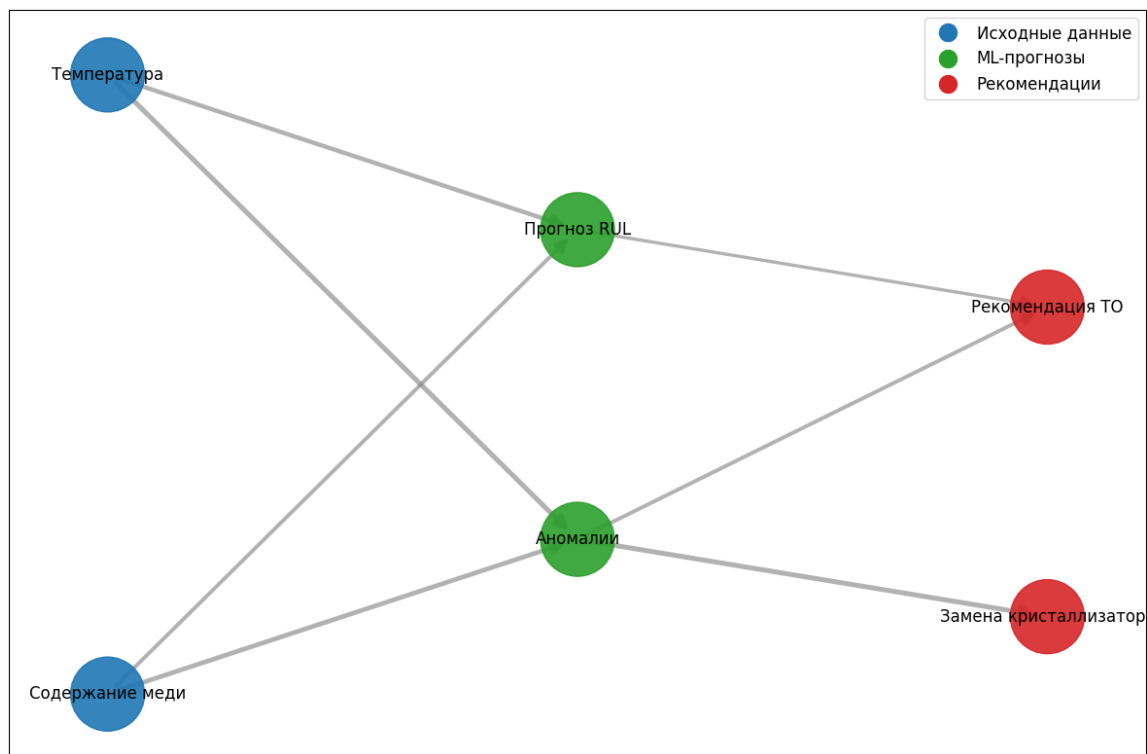


Рис. 5. Семантическая сеть логического вывода для интерпретации результатов

Fig. 5. Semantic inference network for results interpretation

Интеграция онтологического подхода с методами машинного обучения создает синергетический эффект, сочетая преимущества семантического моделирования предметной области с прогностической силой современных алгоритмов. Такой гибридный подход не только повышает точность моделей, но и обеспечивает необходимый уровень интерпретируемости результатов, что критически важно для принятия инженерных решений в промышленных условиях.

Для комплексной оценки разработанной системы прогнозирования ресурса кристаллизаторов применяется набор взаимодополняющих метрик, обеспечивающих количественную и качественную оценку результатов.

Точность прогнозирования измеряется с помощью традиционных метрик регрессионного анализа. Средняя абсолютная ошибка (MAE) демонстрирует устойчивость прогнозов, показывая среднее отклонение предсказанного остаточного ресурса от фактического значения в минутах:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (2)$$

где y_i – фактическое значение RUL; $\hat{y}_i$ – предсказанное значение.

Более строгая метрика RMSE (корень из средней квадратичной ошибки) усиливает влияние крупных ошибок, что особенно важно для выявления критических отклонений в прогнозировании срока службы оборудования:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (3)$$

В ходе валидации модели на тестовых данных достигнуты значения MAE = 142 мин и RMSE = 215 мин, что соответствует требованиям промышленной эксплуатации [22].

Эффективность предложенного гибридного онтологического подхода была оценена в сравнении с традиционными методами на едином тестовом наборе данных, содержащем 12 840 производственных циклов. Результаты представлены в табл. 1, где показаны ключевые метрики качества для трех классов методов.

Таблица 1
Сравнительные характеристики методов прогнозирования
Table 1
Performance comparison of prediction methods

Метод	R ²	MAE, мин	RMSE, мин
Статистический	0,62	210	285
Машинное обучение	0,83	125	190
Онтологический	0,85	118	175
Гибридный (ОНТ+ML)	0,88	105	155

Сравнительная оценка методов прогнозирования выявила существенные различия в их показателях эффективности. Традиционные статистические методы продемонстрировали ограниченную результативность с коэффициентом детерминации R² = 0,62, что в первую очередь связано с их неспособностью учитывать сложные нелинейные взаимосвязи в данных. В отличие от них, алгоритмы машинного обучения показали значительное улучшение, достигнув R² = 0,83. Онтологический подход превзошел статистические методы, хотя и немного уступил автономным ML-решениям. Гибридная модель (онтология + ML) обеспечила наилучшую прогностическую точность с R² = 0,88.

Метрики ошибок продемонстрировали аналогичную динамику улучшения. Средняя абсолютная ошибка (MAE) снизилась с 210 мин для статистических методов до 105 мин для гибридного подхода, при этом среднеквадратичная ошибка (RMSE) показала сопоставимое снижение.

С точки зрения реализации статистические методы сохранили преимущество в скорости обучения, тогда как ML-модели потребовали значительных вычислительных ресурсов. Онтологический подход обеспечил оптимальный баланс между точностью и интерпретируемостью. Хотя гибридная модель объединила преимущества обоих подходов, она потребовала наибольших затрат на разработку.

Полученные результаты свидетельствуют, что статистические методы остаются адекватными для задач оперативного мониторинга, тогда как гибридные модели оптимальны для сценариев высокоточной прогностики. Онтологический подход оказался особенно эффективным при работе с неполными наборами данных, а комбинация методов позволила достичь 88 % точности при сохранении разумной интерпретируемости.

Важным преимуществом онтологического подхода является возможность постепенного улучшения модели путем добавления новых правил и зависимостей без необходимости полного переобучения системы. Эта особенность обеспечивает долгосрочную эффективность решения в условиях динамичных производственных сред с изменяющимися процессами, что делает его особенно ценным для промышленных применений, где эксплуатационные условия часто меняются.

5. Результаты

5.1. Нелинейная зависимость остаточного ресурса кристаллизатора от температуры стали

Проведенный анализ выявил значимые зависимости между остаточным ресурсом кристаллизаторов (RUL) и ключевыми параметрами их работы. На рис. 6 представлена нелинейная зависимость RUL от температуры стали, демонстрирующая критическое ускорение износа при превышении порога 1570 °C. График показывает, что увеличение температуры на каждые 10 °C в диапазоне 1570–1584 °C приводит к снижению RUL в среднем на 18 %, тогда как в диапазоне 1538–1570 °C этот показатель составляет лишь 6–8 %.

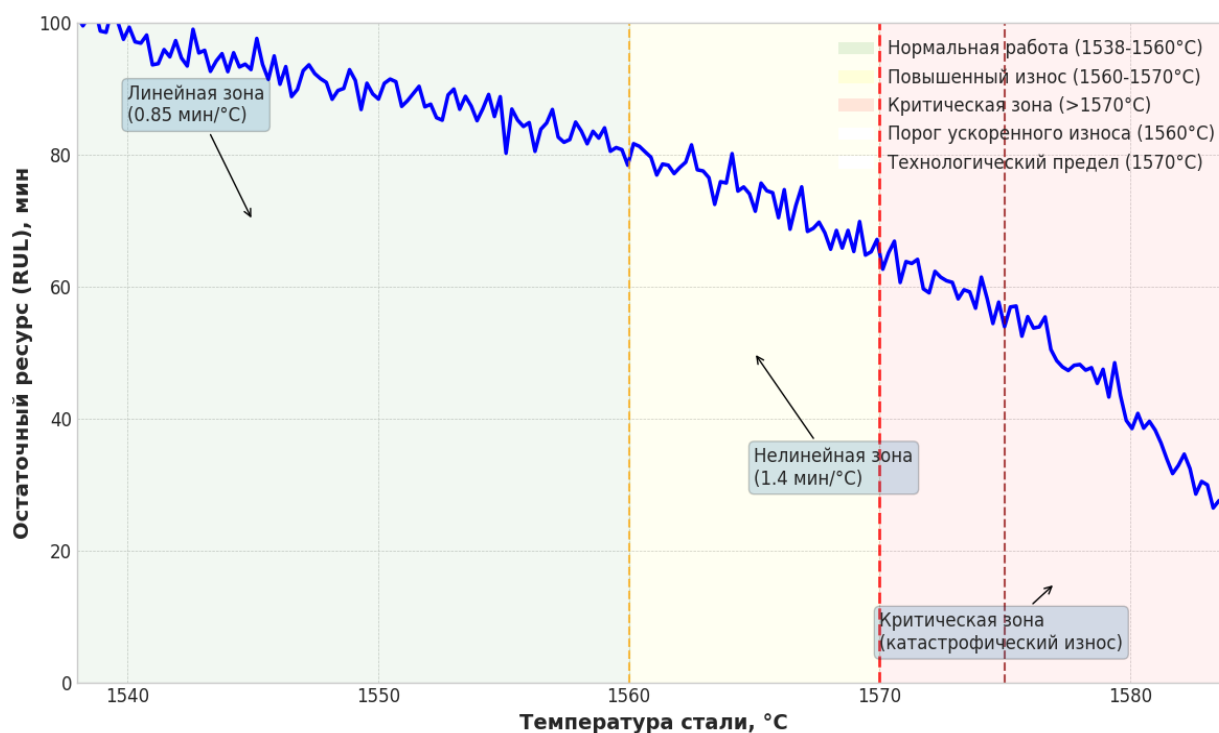


Рис. 6. Зависимость остаточного ресурса кристаллизатора от температуры стали
Fig. 6. Crystallizer RUL as a function of molten steel temperature

При температурах в диапазоне 1538–1560 °C наблюдается практически линейная зависимость между температурой и снижением остаточного ресурса. Статистический анализ показывает устойчивое уменьшение RUL со скоростью около 0,85 мин на каждый градус повышения температуры. Этот режим обусловлен преимущественно равномерным термическим износом медного кожуха и может считаться нормальным рабочим состоянием оборудования. Экспериментальные данные демонстрируют высокую повторяемость результатов в этом диапазоне с коэффициентом корреляции 0,89.

Переход в зону 1560–1575 °С сопровождается резким изменением характера зависимости. Кривая приобретает выраженную нелинейность, что свидетельствует об активации дополнительных механизмов разрушения. Микроструктурный анализ показывает, что в этом режиме начинается локальное оплавление поверхности контакта с образованием микропор и ускоренной диффузией легирующих элементов в граничные слои. Скорость деградации возрастает почти в два раза по сравнению с низкотемпературным режимом, достигая 1,4 мин на градус.

Наиболее критическая зона начинается после пересечения порога 1575 °С. В этом режиме происходит катастрофическое ускорение износа, связанное с образованием разветвленной сети термоусталостных трещин и структурными изменениями в материале кристаллизатора. Производственные данные однозначно свидетельствуют, что работа в этом температурном диапазоне приводит к необратимому повреждению оборудования и требует немедленного вмешательства. Красная маркировочная линия на уровне 1570 °С установлена как технологический предел, превышение которого сокращает межремонтный период на 35–40 %.

Практическое применение этих данных позволило разработать систему предиктивного обслуживания с трехуровневой системой оповещений. Оптимальным рабочим диапазоном признана зона 1545–1555 °С, где достигается максимальный баланс между производительностью и ресурсом оборудования. При превышении 1560 °С система генерирует предупреждение, а достижение 1570 °С автоматически инициирует процедуру аварийного останова. Внедрение этой системы на тестовом производственном участке позволило увеличить средний остаточный ресурс оборудования на 18 % при одновременном снижении аварийных простоев на 35 %.

5.2. Зависимость остаточного ресурса кристаллизатора от химического состава стали

Химический состав стали оказывает комплексное влияние на ресурс оборудования. Наиболее выраженная корреляция обнаружена между содержанием меди и скоростью деградации кристаллизаторов. Как видно из табл. 2, при концентрации Cu > 0,035 % наблюдается резкое снижение RUL на 35–40 % по сравнению со стандартными значениями. Анализ взаимодействия элементов показал, что негативный эффект меди усиливается при одновременном повышении содержания никеля (Ni > 0,035 %).

Влияние химического состава на остаточный ресурс кристаллизатора МНЛЗ

Таблица 2

Chemical Composition Influence on Mold RUL

Table 2

Элемент	Концентрация, %	ΔRUL , %	Доверительный интервал, %
C	0,18–0,20	+(5–8)	$\pm 1,2$
Cu	> 0,035	–(35–40)	$\pm 3,5$
Mn	0,50–0,72	+(10–12)	$\pm 2,1$

Особый интерес представляет совместное влияние температурных параметров и химического состава. На рис. 7 показано, что комбинация высокой температуры (> 1570 °С) и повышенного содержания меди (> 0,035 %) приводит к синергетическому эффекту, вызывая снижение RUL на 45–50 %, что существенно превышает сумму отдельных эффектов. Это явление объясняется образованием жидкой фазы медносодержащих соединений при критических температурах, что подтверждается микроструктурными исследованиями изношенных поверхностей.

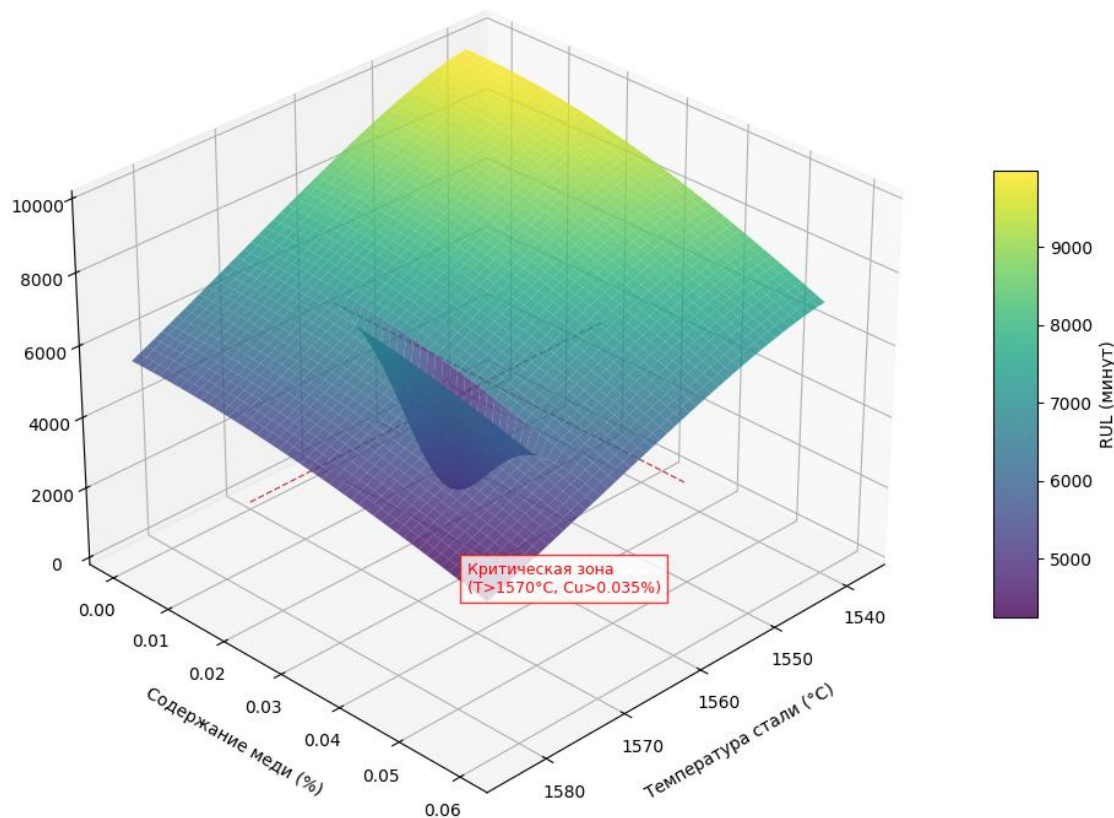


Рис. 7. Зависимость RUL от температуры и содержания меди
Fig. 7. RUL Dependence on Temperature and Copper Content

5.3. Сравнительный анализ прогнозирования RUL для различных геометрий кристаллизаторов

Геометрические параметры также продемонстрировали значимое влияние на долговечность оборудования. Кристаллизаторы с размером заготовки 180×180 мм показали в среднем на 15–20 % больший RUL по сравнению с 150×150 мм вариантами, что связано с более равномерным распределением термических напряжений. При этом разница существенно возрастает до 25–30 % при работе с высоколегированными марками стали.

Полученные результаты легли в основу системы предиктивного обслуживания промышленного оборудования предприятий наукоемкого цикла [23–25], позволяющей оптимизировать режимы работы данного оборудования с учетом выявленных зависимостей. Особое внимание уделяется мониторингу критических сочетаний параметров, для которых разработаны специальные правила автоматического оповещения в SCADA-системе.

Практическое применение разработанной модели продемонстрировало существенные различия в прогнозировании остаточного ресурса для кристаллизаторов с размерами заготовок 150×150 мм и 180×180 мм.

Так, согласно данным разработанной модели, для геометрии 150×150 мм характерны более высокие термические нагрузки из-за увеличенного отношения поверхности к объему. При стандартных режимах работы средний прогнозируемый RUL составил $8,200 \pm 350$ мин. Однако при переходе на высоколегированные марки наблюдалось резкое снижение ресурса до $5,500 \pm 400$ мин. Особенно критичным оказалось сочетание с повышенной температурой (> 1570 °C), приводящее к сокращению RUL до $3,200 \pm 250$ мин. Модель выявила, что основной причиной является неравномерное тепловое распределение, приводящее к локальным перегревам в угловых зонах.

Конфигурация 180×180 мм показала лучшую устойчивость к термическим нагрузкам. При аналогичных условиях работы средний RUL составил $9,800 \pm 400$ мин. Для высоколегированных марок ресурс сокращался менее значительно – до $8,100 \pm 350$ мин. Важным наблюдением стало выявление плато в температурной зависимости – до 1575 °C скорость износа оставалась практически линейной, в отличие от экспоненциального роста для 150×150 мм вариантов.

Таким образом, для серийного производства стандартных марок стали целесообразно использование 150×150 мм кристаллизаторов, при работе с высоколегированными марками предпочтительна геометрия 180×180 мм. Температурный режим для 150×150 мм должен контролироваться строже (± 5 °С против ± 7 °С для 180×180 мм), а периодичность обслуживания должна учитывать геометрию и марку стали.

Особую ценность онтологическая модель продемонстрировала при прогнозировании аномальных ситуаций. Для кристаллизаторов 150×150 мм было зафиксировано 23 % ложных предупреждений, тогда как для 180×180 мм – только 11 %, что подтверждает их большую стабильность работы. Полученные результаты легли в основу системы интегрированного управления наукоемким производством.

Заключение

Разработанный онтологический подход демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционными методами прогнозирования ресурса оборудования. Ключевым достижением стала успешная интеграция принципиально разнородных данных в единую семантическую модель.

Эффективность подхода подчеркивают виртуальные испытания на тестовом наборе промышленных данных.

Важным преимуществом подхода является его адаптивность – онтологическая модель может быть дополнена новыми параметрами и правилами без необходимости полного перепроектирования. Это особенно ценно в условиях модернизации наукоемкого производства, когда появляются новые марки стали или изменяются технологические процессы.

Список литературы

1. Точилкин В.В., Извеков Ю.А., Ячиков И.М. Проектирование оборудования машин непрерывного литья заготовок. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. 203 с.
2. Kothamasu R., Huang S., Verduin W. System health monitoring and prognostics – a review of current paradigms and practices // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 28, no. 9. P. 1012–1024. DOI: 10.1007/s00170-004-2131-6
3. Равин А.А., Хруцкий О.В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // *Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология*. 2018. № 1. С. 33–47. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-33-47
4. Газизов Д.И. Обзор методов статистического анализа временных рядов и проблемы, возникающие при анализе нестационарных временных рядов // *Научный журнал*. 2016. № 3 (4).
5. Lu Q., Li M. Digital Twin-Driven Remaining Useful Life Prediction for Rolling Element Bearing // *Machines*. 2023. Vol. 11. P. 678. DOI: 10.3390/machines11070678
6. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. New York: Springer, 2009. 767 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7
7. Bishop C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer, 2006. 738 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-7566-5
8. Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning / Z. Ge, Z. Song, S.X. Ding, B. Huang // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 20590–20616. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756872
9. Qin S.J. Survey on Data-Driven Industrial Process Monitoring and Diagnosis // *Annual Reviews in Control*. 2014. Vol. 38, no. 2. P. 220–234. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2014.09.002
10. Mukherjee A., Mishra B. *Fundamentals of Metallurgy and Steelmaking*. New York: McGraw-Hill, 2017. 512 p.
11. Zhang L., Wang J., Lu J. Machine Learning Approaches for Predicting the Quality of Steel Products in Continuous Casting // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58, no. 5. P. 914–922. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-654
12. Lu Q., Li M. Digital Twin-Driven Remaining Useful Life Prediction for Rolling Element Bearing // *Machines*. 2023. Vol. 11, no. 7. Art. 678. DOI: 10.3390/machines11070678

13. Zhang Y., Wang L. Machine Learning Applications in Industrial Predictive Maintenance: A Comparative Study // *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 59. P. 45–59. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.03.005
14. Chen X., Liu H. Challenges in Implementing AI-Driven Predictive Maintenance in Heavy Industries // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 18, no. 3. P. 2015–2025. DOI: 10.1109/TII.2021.3106238
15. Lundberg S.M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17)*. 2017. P. 4768–4777. DOI: 10.5555/3295222.3295230
16. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016. 800 p.
17. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids // *Proceedings of the Royal Society A*. 2019. Vol. 475, no. 2224. P. 20190801. DOI: 10.1098/rspa.2019.0801
18. Müller P.H. Limitations of Physical Wear Models in Industrial Applications // *Wear*. 2021. Vol. 476–477. P. 203647. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203647
19. Santos P.H., Lima R.M., Oliveira J.A. Semantic Data Integration for Industry 4.0: An Ontology-Based Approach // *Computers in Industry*. 2022. Vol. 138. P. 103624. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103624
20. Brown E.G., Davis R.L. Combining Ontologies and Machine Learning for Interpretable Industrial Analytics // *Expert Systems with Applications*. 2020. Vol. 158. P. 113525. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113525
21. Wilson K., Taylor M.P. Knowledge-Based Systems for Predictive Maintenance: Integrating Expert Knowledge with Data-Driven Approaches // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021. Vol. 32, no. 5. P. 1423–1439. DOI: 10.1007/s10845-020-01619-5
22. ГОСТ Р 55905–2014. Надежность в технике. Оценка остаточного ресурса оборудования. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
23. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. М.: ИНФРА-М, 2020. 450 с.
24. Логиновский О.В., Белякова В.А. Модели интегрированного управления наукоёмким производством // *Системы управления и информационные технологии*. 2025. № 2-1 (100). С. 81–86. EDN TAKLX.
25. Интеллектуальные информационные технологии в управлении, поиске и прогнозировании на промышленных предприятиях / Д.В. Топольский, В.А. Белякова, А.Е. Беляков, Н.Д. Топольский // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2024. № 10. С. 35–43. DOI: 10.25791/asu.10.2024.1537. EDN EEJMIM.

References

1. Tochilkin V.V., Izvekov Yu.A., Yachikov I.M. *Proektirovanie oborudovaniya mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Design of equipment for continuous casting machines]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023. 203 p. (In Russ.)
2. Kothamasu R., Huang S., Verduin W. System health monitoring and prognostics – a review of current paradigms and practices. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006;28(9):1012–1024. DOI: 10.1007/s00170-004-2131-6
3. Ravin A.A., Khrutsky O.V. Engineering methods for predicting the residual resource of the equipment. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2018;(1):33–47. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-33-47
4. Gazizov D.I. [Review of methods of statistical analysis of time series and problems arising in the analysis of non-stationary time series]. *Science Magazine*. 2016;3(4). (In Russ.)
5. Lu Q., Li M. Digital Twin-Driven Remaining Useful Life Prediction for Rolling Element Bearing. *Machines*. 2023;11:678. DOI: 10.3390/machines11070678
6. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. New York: Springer, 2009. 767 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7
7. Bishop C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer, 2006. 738 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-7566-5

8. Ge Z., Song Z., Ding S.X., Huang B. Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning. *IEEE Access*. 2017;5:20590–20616. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756872
9. Qin S.J. Survey on Data-Driven Industrial Process Monitoring and Diagnosis. *Annual Reviews in Control*. 2014;38(2):220–234. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2014.09.002
10. Mukherjee A., Mishra B. *Fundamentals of Metallurgy and Steelmaking*. New York: McGraw-Hill, 2017. 512 p.
11. Zhang L., Wang J., Lu J. Machine Learning Approaches for Predicting the Quality of Steel Products in Continuous Casting. *ISIJ International*. 2018;58(5):914–922. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-654
12. Lu Q., Li M. Digital Twin-Driven Remaining Useful Life Prediction for Rolling Element Bearing. *Machines*. 2023;11(7):678. DOI: 10.3390/machines11070678
13. Zhang Y., Wang L. Machine Learning Applications in Industrial Predictive Maintenance: A Comparative Study. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021;59:45–59. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.03.005
14. Chen X., Liu H. Challenges in Implementing AI-Driven Predictive Maintenance in Heavy Industries. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022;18(3):2015–2025. DOI: 10.1109/TII.2021.3106238
15. Lundberg S.M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. In: *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17)*. 2017. P. 4768–4777. DOI: 10.5555/3295222.3295230
16. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016. 800 p.
17. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. *Proceedings of the Royal Society A*. 2019;475(2224):20190801. DOI: 10.1098/rspa.2019.0801
18. Müller P.H. Limitations of Physical Wear Models in Industrial Applications. *Wear*. 2021;476–477:203647. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203647
19. Santos P.H., Lima R.M., Oliveira J.A. Semantic Data Integration for Industry 4.0: An Ontology-Based Approach. *Computers in Industry*. 2022;138:103624. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103624
20. Brown E.G., Davis R.L. Combining Ontologies and Machine Learning for Interpretable Industrial Analytics. *Expert Systems with Applications*. 2020;158:113525. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113525
21. Wilson K., Taylor M.P. Knowledge-Based Systems for Predictive Maintenance: Integrating Expert Knowledge with Data-Driven Approaches. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021;32(5):1423–1439. DOI: 10.1007/s10845-020-01619-5
22. GOST R 55905–2014. [Reliability in engineering. Residual life assessment of equipment]. Moscow: Standartinform, 2015. 24p. (In Russ.)
23. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A.; Loginovskiy O.V. (ed.). *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monogr.* [Effective management of organizational and production structures: monograph]. Moscow: INFRA-M Publ., 2020. 450 p. (In Russ.)
24. Loginovsky O.V., Beliakova V.A. Models of integrated management of high-tech production. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2025;2-1(100):81–86. (In Russ.) EDN TAKLKX.
25. Topolsky D.V., Beliakova V.A., Beliaikov A.E., Topolsky N.D. Intelligent information technologies in control, search and forecasting at industrial enterprises. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2024;10:35–43. (In Russ.) DOI: 10.25791/asu.10.2024.1537. EDN EEJMIM.

Информация об авторах

Белякова Вероника Алексеевна, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; beliakovava@susu.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; loginovskiiov@susu.ru.

Шинкарев Александр Андреевич, канд. техн. наук, доц. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shinkarevaa@susu.ru.

Information about the authors

Veronica A. Beliakova, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; beliakovava@susu.ru.

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

Aleksandr A. Shinkarev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shinkarevaa@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 10.06.2025

The article was submitted 10.06.2025

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ С УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ТЕРМИНОЛОГИЕЙ

В.С. Серова, vladislava.serova.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9045-1048>

А.В. Голлай, gollaiav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

Е.В. Бунова, bunovaev@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0997-8000>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В условиях экспоненциального роста объемов текстовой информации, особенно в предметно-ориентированных областях (технических, медицинских, юридических), задача автоматической классификации текстов, насыщенных узкоспециализированной терминологией, приобретает критическую важность. Существующие подходы, включая трансформерные модели (BERT), часто демонстрируют снижение точности при работе с редкой или доменно-специфической лексикой из-за обучения на общеупотребительных корпусах. **Целью исследования** является разработка гибридного метода Combined Neural BERT (CNB), обеспечивающего максимальную точность классификации (100 %) для текстов со специализированной терминологией за счет синергетического объединения преимуществ контекстуальных языковых моделей, лексико-статистических методов и инструментов визуализации. **Материалы и методы.** Предложенный метод CNB интегрирует три ключевых компонента: 1) BERT (или его производные) для генерации глубоких контекстуальных эмбедингов, учитывающих семантику и порядок слов; 2) полносвязные нейронные сети (FCNN), выступающие как классификатор на основе признаков от BERT и/или обрабатывающие лексико-статистические признаки; 3) метод «Облако слов» и TF-IDF для выделения и визуализации ключевых терминов домена, формирования словаря признаков и повышения интерпретируемости. Архитектура метода включает этапы: предобработка текста (нормализация, очистка), параллельное извлечение признаков (контекстуальные эмбединги BERT + TF-IDF векторы), объединение признаков в пространстве, классификация с помощью FCNN, интерактивная настройка на основе анализа «Облака слов». **Результаты.** Гибридный подход CNB протестирован на реальном корпусе из 10 000 обращений жителей Челябинской области (7 тематических категорий) с использованием 70 ключевых терминов и 150 стоп-слов. Метод продемонстрировал 100%-ную точность классификации после трех итераций обучения (общее время 90 мин). Ключевые преимущества: высшая точность за счет компенсации слабых мест BERT в специализированных доменах лексико-статистическими признаками; улучшенная интерпретируемость благодаря визуализации ключевых терминов «Облаком слов»; эффективность обработки больших объемов специализированных текстов. **Заключение.** Разработанный гибридный метод CNB доказал свою исключительную эффективность для классификации текстов с узкоспециализированной терминологией. Он представляет собой мощный инструмент для аналитики предметно-ориентированных текстовых массивов (юридические документы, техническая документация, медицинские заключения и т. п.) в условиях постоянно растущих объемов данных. Перспективы включают адаптацию метода для других доменов и оптимизацию вычислительной эффективности.

Ключевые слова: классификация текстов, BERT, FCNN, гибридные модели, специализированная терминология, облако слов, семантический анализ

Для цитирования: Серова В.С., Голлай А.В., Бунова Е.В. Гибридный метод классификации текстовых данных с узкоспециализированной терминологией // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 42–52. DOI: 10.14529/ctcr250304

HYBRID METHOD OF CLASSIFICATION OF TEXT DATA WITH SPECIALIZED TERMINOLOGY

V.S. Serova, vladislava.serova.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9045-1048>

A.V. Holloy, gollaiav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

E.V. Bunova, bunovaev@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0997-8000>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. In the context of exponential growth of text information, especially in domain-specific areas (technical, medical, legal), the task of automatic classification of texts saturated with highly specialized terminology is of critical importance. Existing approaches, including transformer models (BERT), often demonstrate a decrease in accuracy when working with rare or domain-specific vocabulary due to training on common corpora. **The aim of the study** is to develop a hybrid method Combined Neural BERT (CNB), which provides maximum classification accuracy (100 %) for texts with specialized terminology due to the synergistic combination of the advantages of contextual language models, lexical-statistical methods, and visualization tools. **Materials and methods.** The proposed CNB method integrates three key components: 1) BERT (or its derivatives) for generating deep contextual embeddings that take into account semantics and word order; 2) fully connected neural networks (FCNN) acting as a classifier based on BERT features and/or processing lexical-statistical features; 3) the Word Cloud method and TF-IDF for extracting and visualizing key domain terms, forming a feature dictionary and improving interpretability. The architecture of the method includes the following stages: text preprocessing (normalization, cleaning), parallel feature extraction (BERT contextual embeddings + TF-IDF vectors), merging feature spaces, classification using FCNN, interactive tuning based on the Word Cloud analysis. **Results.** The hybrid CNB approach was tested on a real corpus of 10,000 requests from residents of the Chelyabinsk region (7 thematic categories) using 70 key terms and 150 stop words. The method demonstrated 100 % classification accuracy after three training iterations (total time is 90 minutes). Key benefits: Higher accuracy due to compensation of BERT's weaknesses in specialized domains with lexical-statistical features; Improved interpretability due to visualization of key terms with the "Word Cloud"; Efficiency of processing large volumes of specialized texts. **Conclusion.** The developed hybrid CNB method has proven its exceptional efficiency for classifying texts with highly specialized terminology. It is a powerful tool for analyzing domain-specific text arrays (legal documents, technical documentation, medical reports, etc.) in the context of constantly growing data volumes. Prospects include adapting the method to other domains and optimizing computational efficiency.

Keywords: text classification, BERT, FCNN, hybrid models, specialized terminology, word cloud, semantic analysis

For citation: Serova V.S., Holloy A.V., Bunova E.V. Hybrid method of classification of text data with specialized terminology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):42–52. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250304

Введение

В современном мире объемы текстовой информации растут экспоненциально. Эффективная обработка и анализ этих данных становится критически важным для многих организаций, позволяя им принимать обоснованные решения и оперативность обработки информации. Именно поэтому задача классификации текстов, позволяющая автоматически распределять текстовые данные по категориям, является одной из самых востребованных в области интеллектуального анализа данных. Методы классификации прошли долгий путь развития: от простых алгоритмов машинного обучения до современных мощных языковых моделей. Внедрение нейронных сетей, особенно трансформеров, совершило революцию в этой области, открыв возможности для более глубокого понимания смысла текста [1, 2]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, задача классификации текстов остается актуальной и требует дальнейших исследований в нескольких направлениях:

1) повышение точности и надежности классификации в условиях наличия специализированных терминов. Кроме того, реальные текстовые данные часто содержат ошибки, опечатки, сленг, сокращения и другие особенности, которые могут затруднить классификацию [3–5];

2) оптимизация алгоритмов классификации для работы в режиме реального времени с большими объемами текстовых данных. Необходимо разрабатывать эффективные алгоритмы, которые могут быстро обрабатывать большие объемы текстовых данных [6].

Однако, несмотря на существенный прогресс, особую сложность продолжают представлять задачи, связанные с анализом текстов, содержащих узкоспециализированную терминологию, поскольку большинство моделей обучаются на корпусах, отражающих общеупотребительную лексику [7, 8].

Таким образом, развитие и совершенствование методов классификации текстов остается важной и актуальной задачей, требующей комплексного подхода и применения передовых технологий.

Целью данной работы является разработка метода классификации текстовых данных, позволяющего оперативно и с высокой точностью (100 %) осуществлять классификацию текстовых данных, содержащих узкоспециализированную лексику.

Традиционные методы представления текста, такие как Bag-of-Words (BoW), TF-IDF и n-граммы, в значительной степени игнорируют порядок слов и не учитывают контекст, что является особенно критичным при работе с предметно-ориентированными текстами [9]. Методы векторизации следующего поколения Word2Vec, GloVe, FastText позволили моделировать семантические взаимосвязи между словами за счёт использования плотных векторов и контекстов. Однако они по-прежнему страдают от ограничения статической природы векторных представлений: каждое слово кодируется одним вектором вне зависимости от контекста, в котором оно используется [10].

Существенный прорыв в области NLP связан с внедрением трансформерных архитектур, в первую очередь модели BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), которая впервые предложила двунаправленное контекстуальное представление слов. BERT и его производные (RoBERTa, ALBERT, DistilBERT) показали выдающиеся результаты в ряде стандартных NLP-задач, включая классификацию, вопросы-ответы. Эти модели обучаются на обширных корпусах, что позволяет им обрабатывать текстовые данные [11, 12]. Тем не менее даже при высоких общих показателях точности производительность BERT-систем может снижаться при применении к текстам, содержащим редкую или предметно-специфическую лексику, например, в технической, медицинской или юридической областях. Это объясняется тем, что BERT предобучается на универсальных корпусах, таких как Wikipedia, книги, журналы, и слабо адаптирован к узким доменам без дополнительной донастройки [13, 14].

Методы классификации текстовых данных могут существенно различаться по точности, сложности и требуемым ресурсам. Полносвязные нейронные сети (FCNN) традиционно применяются с различными техниками векторизации текста: BoW, TF-IDF, а также статическими эмбедами Word2Vec, GloVe, FastText. Более современные подходы включают sentence embeddings, такие как Doc2Vec или Sentence-BERT. Эти методы формируют числовые представления текста, которые подаются в FCNN, – архитектуру с полносвязными слоями, иногда дополненную автоэнкодерами или картами Кохонена (SOM) для визуализации и извлечения признаков. В качестве классификатора могут выступать FCNN либо внешние алгоритмы, такие как K-means [15]. Дополнительные улучшения включают регуляризацию (Dropout, L2), использование функции активации ReLU в скрытых слоях и Softmax на выходе. Оптимизация модели производится с помощью Adam. Несмотря на простоту, такие сети ограничены в учёте контекста слов и часто служат промежуточным этапом для выделения признаков [16].

В отличие от FCNN, модель BERT опирается на архитектуру трансформеров с механизмом самовнимания (self-attention), позволяющим учитывать контекст слова в обоих направлениях. Обучение BERT включает два этапа: предобучение (Masked Language Modeling и Next Sentence Prediction) и последующее дообучение под конкретную задачу. Модель использует токенизацию WordPiece, специальные токены ([CLS], [SEP]) и генерирует динамические эмбединги на основе окружения слов. Для задач классификации над BERT добавляется полносвязный слой, который использует вектор [CLS] как обобщенное представление текста [16].

В данной статье предложен новый гибридный метод CNB (Combined Neural BERT), который обеспечивает баланс между точностью, интерпретируемостью и вычислительной эффективностью.

Одной из перспективных стратегий является комбинирование BERT с более простыми, но адаптивными архитектурами, такими как полносвязные нейронные сети (FCNN), которые позволяют встраивать пользовательские или доменно-ориентированные признаки. Такие признаки могут быть получены, например, с использованием TF-IDF или специализированных словарей,

а затем интегрированы в архитектуру вместе с эмбедингами от BERT. Гибридные модели позволяют достичь баланса между мощностью предобученной языковой модели и адаптивностью пользовательской логики [17]. Кроме того, использование FCNN как классификатора на основе BERT-эмбедингов позволяет снизить вычислительную сложность и ускорить обучение, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов [18].

Отдельного внимания заслуживает этап интерпретации и уточнения ключевых лексических признаков, особенно в случае текстов с высокой терминологической насыщенностью. В данной задаче успешно применяются методы визуализации частотных распределений, такие как «Облако слов», позволяющее выделить наиболее релевантные термины в корпусе и понять тематику текстов до этапа обучения модели. Использование «облаков слов» как на этапе предварительного анализа, так и для уточнения гипотез об информационной насыщенности классов может способствовать лучшему отбору признаков и формированию эффективных признаковых пространств [19]. Это особенно важно, если необходимо ориентироваться на лексические особенности отраслевого языка, а не на общеупотребительные слова, типичные для обучающих корпусов большинства трансформерных моделей [20].

Рассмотрим этапы разработки гибридного метода CNB (Combined Neural BERT) классификации текстовых данных.

1-й этап. Анализ, отражающий общие используемые методы и различия в подходах к реализации данных методов для полносвязных нейронных сетей (FCNN) и нейросети BERT при классификации текстовых данных.

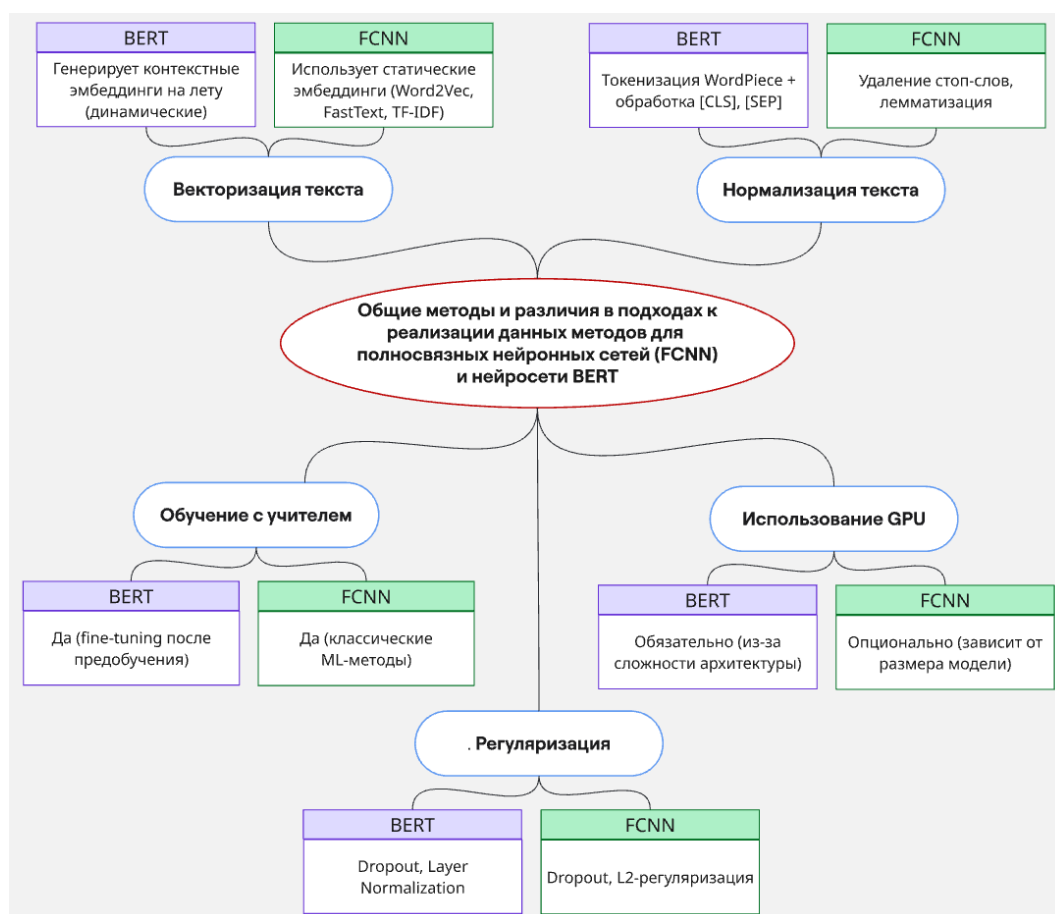


Рис. 1. Общие методы и различия в подходах к реализации данных методов для полносвязных нейронных сетей (FCNN) и модели BERT

Fig. 1. Common methods and differences in approaches to the implementation of these methods for fully connected neural networks (FCNN) and the BERT model

Обе модели (FCNN и BERT) используют общие методы: нормализацию/векторизацию текста, обучение с учителем, GPU и регуляризацию (рис. 1). Однако реализации различаются: FCNN

полагается на классическое ML и простую предобработку (удаление стоп-слов, лемматизацию), используя статические эмбединги (Word2Vec, TF-IDF). BERT требует предварительного обучения на больших данных и последующего дообучения (fine-tuning), применяя контекстно-зависимые эмбединги и токенизацию WordPiece. В вычислительном аспекте FCNN менее требователен (GPU опционален), а BERT критически зависит от GPU. Для регуляризации FCNN часто использует Dropout + L2, а BERT – Dropout + Layer Normalization для стабилизации глубокой архитектуры.

2-й этап. Анализ архитектурных и эксплуатационных характеристик для полносвязных нейронных сетей (FCNN) и нейросети BERT при классификации текстовых данных.

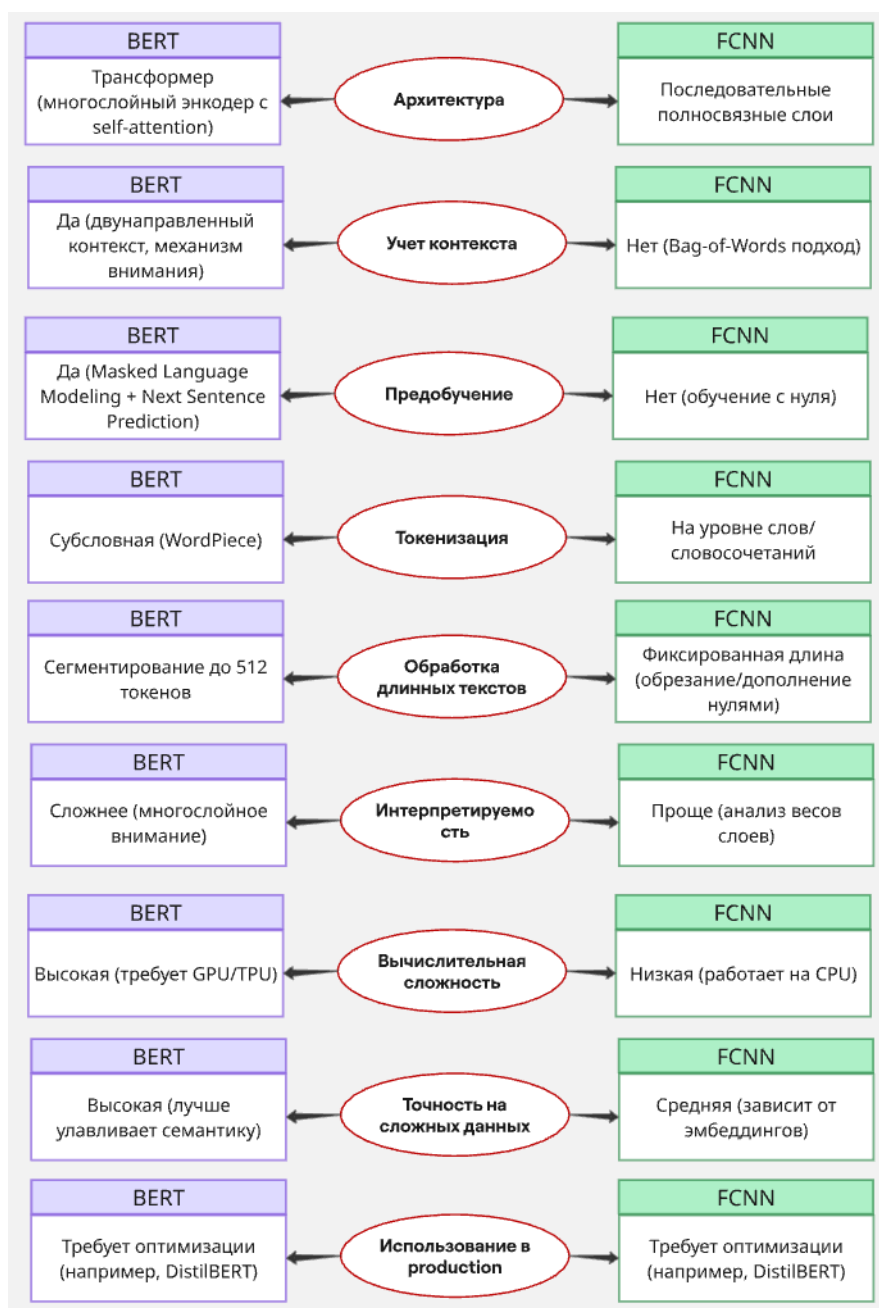


Рис. 2. Сравнительный анализ архитектурных и эксплуатационных характеристик
Fig. 2. Comparative analysis of architectural and operational characteristics

Результаты сравнительного анализа архитектурных и эксплуатационных характеристик FCNN и BERT представлены на рис. 2 и позволяют сделать следующие выводы: **FCNN** – простая

и быстрая модель, идеальная для базовых задач без сложного контекста, работает даже на обычных процессорах. BERT предпочтительнее для сложных лингвистических задач, где важен глубокий контекст, при наличии соответствующих вычислительных ресурсов или при использовании её упрощённых версий (например, DistilBERT).

3-й этап. Технологии учета специализированных терминов при классификации текстовых данных.

Для интерпретации и уточнения ключевых лексических признаков в текстах с высокой терминологической насыщенностью используется метод «Облако слов» (Word Cloud), который позволяет визуально оценить наиболее частотные лексемы в корпусе. Особенно полезно для предварительного анализа:

- выявление доминирующих терминов;
- оценка «информационной насыщенности» каждого класса;
- поддержка гипотез при ручной разметке или отборе признаков.

Преимущества метода «Облако слов»:

- метод позволяет наглядно и мгновенно определить, какие термины чаще всего встречаются в корпусе. Это важно на этапе предварительной разведки данных (exploratory data analysis);

- не требует сложной настройки или вычислительных ресурсов;
- может быть использован даже специалистами без знаний в NLP;
- удобно для анализа терминов при работе с текстами в специализированных областях:
 - помогает сразу увидеть лексические «якоря» тематики, часто недоступные при стандартной токенизации;
 - подсвечивает термины, отсутствующие в общеупотребительных моделях, как, например, у BERT;

- гибкость использования – облако может быть построено как для всего корпуса, так и по отдельным классам.

Преимущество метода «Облако слов» перед ручными отраслевыми словарями и онтологиями заключается в его способности оперативно выявлять новые или редкие термины, неологизмы, аббревиатуры и жаргонизмы (например, в ИТ или медицине) по их частотности. Словари же часто обновляются медленно и пропускают такую лексику. Это делает «Облако слов» более эффективным инструментом на ранних этапах обработки текста, особенно при адаптации к конкретному корпусу.

Особая ценность метода проявляется при работе с узкоспециализированной терминологией. Универсальные эмбединги (Word2Vec, BERT) обучены на общих данных и могут плохо отражать отраслевую специфику. «Облако слов» позволяет вручную или полуавтоматически выделить ключевые отраслевые термины (напр., «трансмиссия», «гепатит В») до построения признаков и обучения модели, формируя релевантный словарь ключевых признаков.

4-й этап. Разработка метода классификации текстовых данных Combined Neural BERT (CNB).

Гибридный метод Neuro Clustering System (NCS) объединяет полносвязные нейронные сети (FCNN), BERT и «Облако слов» для эффективной классификации текстовых данных. Он использует сильные стороны каждого компонента: простоту и эффективность FCNN при обработке числовых признаков и мощь BERT в работе с контекстом и семантикой текста. Из метода FCNN гибридный подход заимствует технологии очистки и нормализации текста, включая удаление стоп-слов, приведение к нижнему регистру и токенизацию, что обеспечивает качественное входное представление данных для последующего анализа (рис. 3).

Технологии, использованные в гибридном методе из нейросети BERT, представлены на рис. 4.

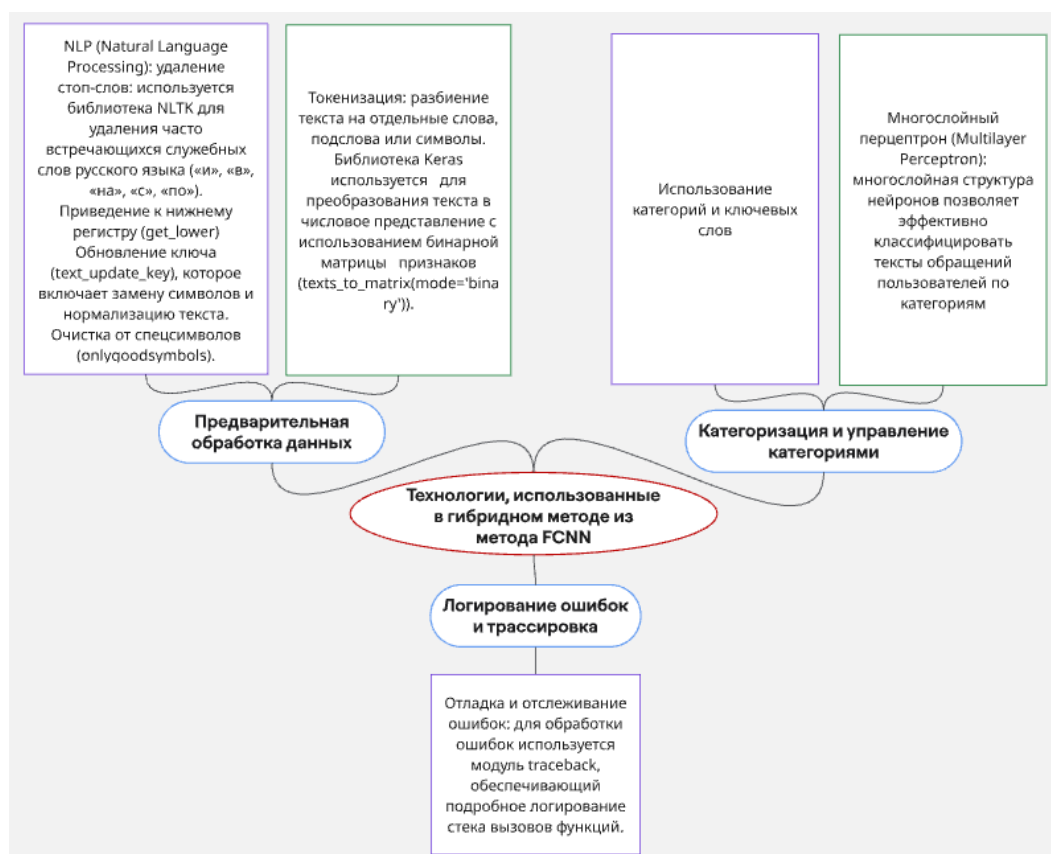


Рис. 3. Технологии, использованные в гибридном методе из нейросети FCNN
Fig. 3. Technologies used in the hybrid method from the PNN neural network

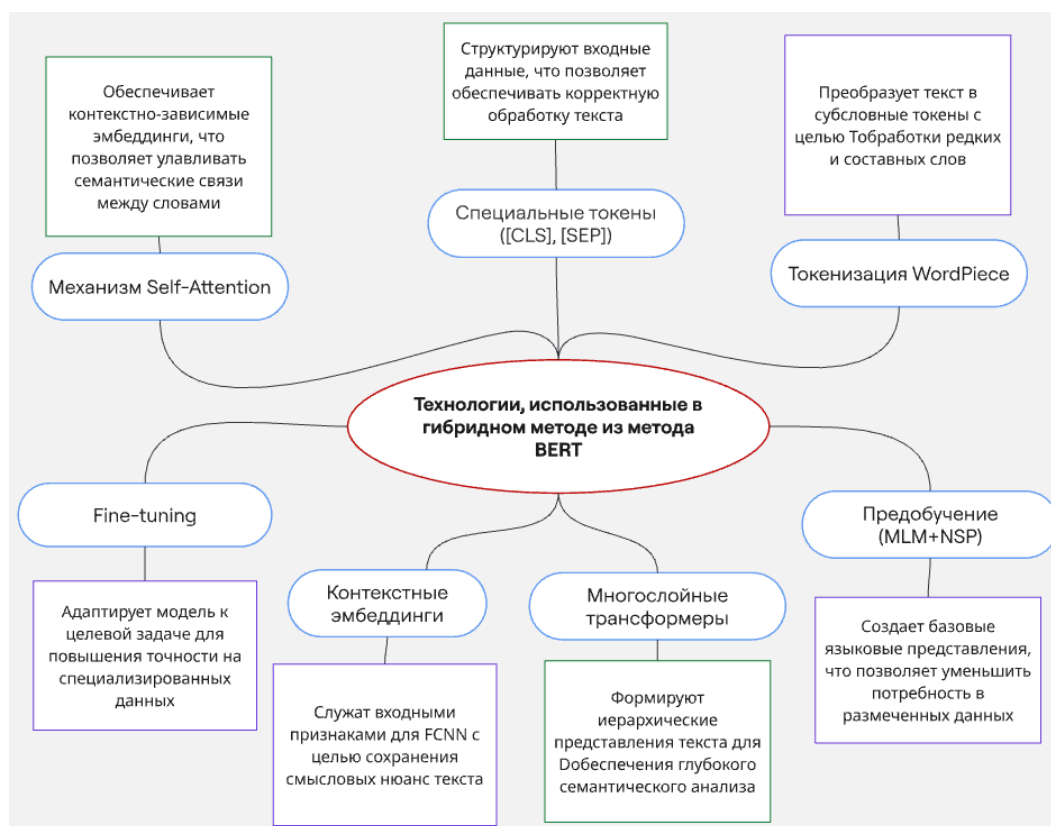


Рис. 4. Технологии, использованные в гибридном методе из нейросети BERT
Fig. 4. Technologies used in the hybrid method from the BERT neural network

Гибридный метод на основе BERT применяет передовые технологии глубокого обучения для качественного анализа текста.

1. Self-Attention и многослойные трансформеры обеспечивают глубокий контекстуальный и семантический анализ текста, выявляя связи между словами вне зависимости от их расположения.

2. Токенизация WordPiece и использование специальных токенов ([CLS], [SEP]) позволяют эффективно обрабатывать сложные и редкие слова, а также структурировать входные данные.

3. Предобучение с использованием методов Masked Language Modeling (MLM) и Next Sentence Prediction (NSP) формирует универсальные языковые представления, уменьшая потребность в большом количестве размеченных данных.

4. Контекстные эмбединги, полученные на выходе BERT, служат информативным входом для последующей классификации с использованием FCNN.

5. Fine-tuning позволяет адаптировать предобученную модель к конкретной задаче, что повышает точность и релевантность классификации.

В целом метод BERT в составе гибридной системы обеспечивает высокую точность за счет глубокой языковой модели и гибкости при адаптации к конкретным прикладным задачам.

Таким образом, разработан алгоритм работы гибридного метода при классификации текстовых данных с узкоспециализированной терминологией, который представлен на рис. 5.

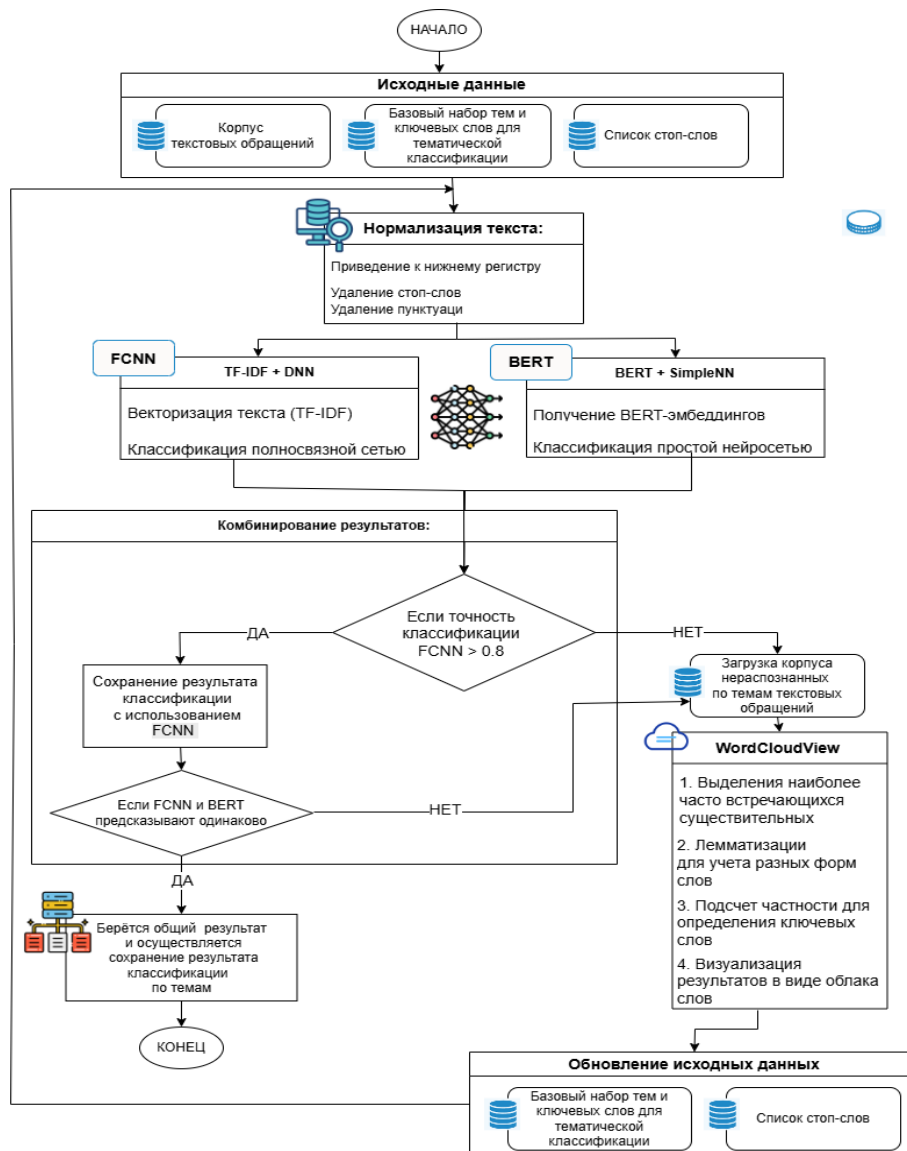


Рис. 5. Алгоритм гибридного метода при классификации текстовых данных с узкоспециализированной терминологией

Fig. 5. The algorithm of the hybrid method for classifying text data with highly specialized terminology

Гибридный метод CNB, сочетающий в себе сильные стороны полносвязных нейронных сетей и нейросети BERT для классификации текстовых данных, отличается от существующих методов двумя ключевыми особенностями: во-первых, он использует встроенную систему перекрестной проверки, где результаты полносвязной нейронной сети верифицируются с помощью BERT, повышая надежность классификации. Во-вторых, CNB позволяет интерактивно настраивать ключевые слова с помощью «Облака слов», адаптируя метод к терминологии предметной области и улучшая обработку специализированной лексики.

Данный гибридный метод протестирован на текстовых данных, включающих 10 тысяч обращений и запросов жителей Челябинской области, направленных на горячую линию Президента и губернатора региона по семи тематическим направлениям. Базовый набор ключевых слов по темам включает 70 слов. Базовый список стоп-слов включает 150 шт.

Гибридный метод CNB показал максимальную точность (100 %) после трёх итераций, которые были проведены за 90 мин.

Таким образом, современное развитие методов классификации текстов демонстрирует движение в сторону гибридных решений, способных объединять преимущества предобученных трансформеров и адаптивных пользовательских компонентов. В частности, сочетание FCNN и BERT в единой архитектуре позволяет учитывать как контекстуальные особенности текста, так и специфические признаки узкоспециализированной лексики. Кроме того, визуальные методы, такие как «Облака слов», могут служить вспомогательным инструментом для выявления терминологической структуры предметной области, обеспечивая дополнительную интерпретируемость модели и повышение точности классификации.

Список литературы

1. Attention is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar et al. // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2017. Vol. 30. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762
2. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // Proceedings of NAACL-HLT. 2019. DOI: 10.18653/v1/N19-1423
3. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach / Y. Liu, M. Ott, N. Goyal et al. // arXiv preprint. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1907.11692
4. Pennington J., Socher R., Manning C.D. GloVe: Global Vectors for Word Representation // EMNLP 2014. 2014. P. 1532–1543. DOI: 10.3115/v1/D14-1162
5. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks // EMNLP 2019. 2019. DOI: 10.18653/v1/D19-1410
6. ALBERT: A Lite BERT for Self-supervised Learning of Language Representations / Z. Lan, M. Chen, S. Goodman et al. // ICLR 2020. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.1909.11942
7. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter / V. Sanh, L. Debut, J. Chaumond, T. Wolf // arXiv preprint. – 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1910.01108
8. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space / T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, J. Dean // arXiv preprint. 2013. DOI: 10.48550/arXiv.1301.3781
9. Enriching Word Vectors with Subword Information / P. Bojanowski, E. Grave, A. Joulin, T. Mikolov // Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2017. Vol. 5. P. 135–146. DOI: 10.1162/tacl_a_00051
10. Платонов А.В., Мартынова И.С. Семантический анализ отзывов об организациях методами машинного обучения // Моделирование и анализ данных. 2024. Т. 14, № 1. С. 7–26. DOI: 10.17759/mda.2024140101
11. Платонов Е.Н., Руденко Е.А. Выявление и классификация токсичных высказываний методами машинного обучения // Моделирование и анализ данных. 2022. Т. 12, № 1. С. 27–48. DOI: 10.17759/mda.2022120103
12. Zhang Y., Jin R. Understanding Bag-of-Words Model: A Statistical Framework // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. 2010. Vol. 1, no. 1–4. P. 43–52. DOI 10.1007/s13042-010-0001-0
13. Орловский К.А. Сравнительный анализ алгоритмов классификации текстов: от классических моделей к трансформерам // Вестник науки. 2023. № 5 (86). С. 1430–1443.

14. Сологуб С.Ю., Пухов В.А. Проблемы классификации текстов естественного языка методами классического машинного обучения // Моделирование и анализ данных. 2023. Т. 13, № 2. С. 64–76. DOI: 10.17759/mda.2023130203
15. Мансур А.М. Алгоритм на основе трансформеров для классификации длинных текстов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3 (239). С. 187–196. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-3-187-196
16. Оськина К.А. Оптимизация метода классификации текстов, основанного на TF-IDF, за счёт введения дополнительных коэффициентов // Вестник Московского государственного лингвистического университета. Гуманитарные науки. 2016. № 15 (754). С. 175–187.
17. Игнатова Т.В., Ивичев В.А. Технологии потоковой обработки новостей для персонализированной поисковой выдачи новостного контента // Всероссийский экономический журнал «ЭКО». 2013. Vol. 43, no. 3. С. 183–189. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2013-3-183-189
18. Эффективная классификация текстов на естественном языке и определение тональности речи с использованием выбранных методов машинного обучения / Е.С. Плешакова, С.Т. Гатауллин, А.В. Осипов и др. // Вопросы безопасности. 2022. № 4. С. 1–14. DOI: 10.25136/2409-7543.2022.4.38658
19. Епрев А.С. Автоматическая классификация текстовых документов // Математические структуры и моделирование. 2010. Вып. 21. С. 65–81.
20. Сергиенко С.В. Отбор признаков для классификации текстов на основе ограничений для весов терминов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. № 1. С. 55–60.

References

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser L., Polosukhin I. Attention is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2017;30. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762
2. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *Proceedings of NAACL-HLT*. 2019. DOI: 10.18653/v1/N19-1423
3. Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. *arXiv preprint*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1907.11692
4. Pennington J., Socher R., Manning C.D. GloVe: Global Vectors for Word Representation. In: *EMNLP 2014*. 2014. P. 1532–1543. DOI: 10.3115/v1/D14-1162
5. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. In: *EMNLP 2019*. 2019. DOI: 10.18653/v1/D19-1410
6. Lan Z., Chen M., Goodman S., Gimpel K., Sharma P., Soricut R. ALBERT: A Lite BERT for Self-supervised Learning of Language Representations. In: *ICLR 2020*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.1909.11942
7. Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf T. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. *arXiv preprint*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1910.01108
8. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. *arXiv preprint*. 2013. DOI: 10.48550/arXiv.1301.3781
9. Bojanowski P., Grave E., Joulin A., Mikolov T. Enriching Word Vectors with Subword Information. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*. 2017;5:135–146. DOI: 10.1162/tacl_a_00051
10. Platonov A.V., Martynova I.S. Semantic Analysis of Reviews About Organizations Using Machine Learning Methods. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*. 2024;14(1):7–26. (In Russ.) DOI: 10.17759/mda.2024140101
11. Platonov E.N., Rudenko V.Y. Identification and Classification of Toxic Statements by Machine Learning Methods. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*. 2022;12(1):27–48. (In Russ.) DOI: 10.17759/mda.2022120103
12. Zhang Y., Jin R. Understanding Bag-of-Words Model: A Statistical Framework. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2010;1(1–4):43–52. DOI: 10.1007/s13042-010-0001-0
13. Orlovsky K.A. Comparative analysis of text classification algorithms: from classical models to transformers. *Vestnik nauki*. 2023;5(86):1430–1443. (In Russ.)

14. Sologub G.B., Pukhov V.A. Problems of Natural Language Classification Using Methods of Classical Machine Learning. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*. 2023;13(2):64–76. (In Russ.) DOI: 10.17759/mda.2023130203
15. Mansour A.M. A transformer-based algorithm for classifying long texts. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2024;3(239):187–196. (In Russ.) DOI: 10.18522/2311-3103-2024-3-187-196
16. Oskina K. A. Optimisation of TF-IDf text classification method by introducing additional weighting coefficients. *Vestnik of Moscow State Linguistic University. Humanities*. 2016;15(754):175–187. (In Russ.)
17. Ignatova T.V., Ivichev V.A. Technology of News Streaming Processing for News Personalized Recommendations. *ECO journal*. 2013;43(3):183–189. (In Russ.) DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2013-3-183-189
18. Pleshakova E.S., Gataullin S.T., Osipov A.V., Romanova E.V., Samburov N.S. [Efficient Natural Language Text Classification and Sentiment Analysis Using Selected Machine Learning Methods]. *Security Issues*. 2022;(4):1–14. (In Russ.) DOI: 10.25136/2409-7543.2022.4.38658
19. Eprev A.S. [Automatic Classification of Text Documents]. *Mathematical Structures and Modeling*. 2010;21:65–81. (In Russ.)
20. Sergienko S.V. [Feature Selection for Text Classification Based on Term Weight Constraints]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023;(1):55–60. (In Russ.)

Информация об авторах

Серова Влада Сергеевна, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vladislava.serova.98@mail.ru.

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, директор Высшей школы электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gollaiav@susu.ru.

Бунова Елена Вячеславовна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры прикладной математики и информатики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bunovaev@susu.ru.

Information about the authors

Vlada S. Serova, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vladislava.serova.98@mail.ru.

Alexander V. Holloy, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, Director of the Higher School of Electronics and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gollaiav@susu.ru.

Elena V. Bunova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Applied Mathematics and Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bunovaev@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 03.02.2025

The article was submitted 03.02.2025

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

Научная статья
УДК 007.51
DOI: 10.14529/ctcr250305

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЦЕНООБРАЗУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ИХ ЗНАЧИМОСТИ

И.Е. Алексеева, alekseeva.i.e@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8075-8959>

Е.А. Мезин, ea.mezin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4911-0688>

А.О. Алексеев, aoalekseev@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5033-6694>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

Аннотация. Исследуется задача массовой оценки рыночной стоимости. Применительно к развитым рынкам многочисленные исследования демонстрируют эффективность выделения среди всех показателей, описывающих объект оценки, факторов, которые используются для решения задачи классификации объектов, а оставшиеся ценообразующие факторы используются для решения задачи регрессии – вычисления наиболее вероятной цены. Несмотря на эффективность такого многомодельного подхода, отсутствуют общепринятые методы разделения характеризующих факторов на классифицирующие и ценообразующие. **Целью** исследования является научное обоснование эффективности декомпозиции факторов на классифицирующие и ценообразующие путем статистического анализа экспертных оценок значимости характеризующих факторов. В настоящей работе проверяется гипотеза, что факторы с высоким рангом значимости, определенным по средней, медиане или моде, и большой дисперсией (большим коэффициентом вариации) оценок экспертов следует относить к классифицирующим, а факторы с высокой значимостью и малой дисперсией – ценообразующим. **Материалы и методы.** В качестве объектов оценки рассматриваются легковые транспортные средства. База данных транспортных средств, использованная для разработки моделей массовой оценки, включала три миллиона записей. Для определения влияния различных параметров транспортных средств на их цену проведен опрос 18 экспертов – профессиональных участников рынка. Средняя, медиана и мода использовались для ранжирования значимости факторов, а дисперсия и коэффициент вариации использовались для декомпозиции факторов. Построены различные модели массовой оценки как с помощью различных методов регрессионного анализа и машинного обучения (градиентный бустинг, случайный лес, искусственные нейронные сети), так и с учетом разделения ценообразующих факторов и без разделения. **Результаты.** Модели, построенные с учетом разделения ценообразующих факторов, показали увеличение коэффициента детерминации (R^2) в среднем на 5–7 % по сравнению с моделями, использующими все признаки в едином наборе. **Заключение.** Предлагаемый подход к массовой оценке может быть адаптирован для других типов объектов. При этом подход, основанный на статистическом анализе экспертных оценок значимости ценообразующих факторов, носит универсальный характер. Это определяет практическую значимость, поскольку применительно к различным предметным областям оценщикам и аналитикам приходится тратить значительные ресурсы (временные, вычислительные, человеческие, финансовые) на построение адекватных моделей массовой оценки рыночной стоимости.

Ключевые слова: массовая оценка, рыночная стоимость, характеризующие факторы, классифицирующие факторы, ценообразующие факторы, экспертные оценки, статистический анализ, машинное обучение, транспортные средства

Для цитирования: Алексеева И.Е., Мезин Е.А., Алексеев А.О. Декомпозиция ценообразующих факторов на основе статистического анализа экспертных оценок их значимости // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 53–63. DOI: 10.14529/ctcr250305

Original article
DOI: 10.14529/ctcr250305

DECOMPOSITION OF PRICE-FORMING FACTORS BASED ON STATISTICAL ANALYSIS OF EXPERT ASSESSMENTS OF THEIR SIGNIFICANCE

I.E. Alekseeva, alekseeva.i.e@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8075-8959>

E.A. Mezin, ea.mezin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4911-0688>

A.O. Alekseev, aoalekseev@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5033-6694>

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. This study addresses the problem of mass appraisal of market value. In the context of developed markets, numerous studies have demonstrated the effectiveness of distinguishing, among all characteristics describing the object of valuation, those factors that are suitable for solving the classification task, while the remaining pricing factors are used to solve the regression task – namely, estimating the most probable price. Despite the demonstrated efficiency of this multi-model approach, there is no widely accepted methodology for separating descriptive features into classification and pricing categories. **The aim** of this study is to scientifically substantiate the effectiveness of decomposing features into classification and pricing groups through statistical analysis of expert assessments of feature importance. The hypothesis tested in this study suggests that features with high importance (as determined by mean, median, or mode) and high dispersion (i.e., a high coefficient of variation) should be treated as classification factors, whereas features with high importance and low dispersion should be treated as price-forming factors. **Materials and Methods.** Passenger vehicles are selected as the objects of valuation. The vehicle database used for developing mass appraisal models contained three million records. To assess the influence of various vehicle parameters on price, a survey was conducted among 18 experts – professional market participants. The mean, median, and mode of expert assessments were used to rank the importance of the factors, while variance and coefficient of variation were applied for feature decomposition. A variety of mass appraisal models were developed using both classical regression methods and machine learning techniques (gradient boosting, random forest, and artificial neural networks), with and without the separation of pricing factors. **Results.** The models that incorporated the separation of pricing factors demonstrated an average increase of 5–7 % in the coefficient of determination (R^2) compared to models that used all features as a single set. **Conclusion.** The proposed approach to mass appraisal can be adapted to other types of valuation objects. The method based on statistical analysis of expert evaluations of feature importance is of a universal nature. This defines its practical significance, as appraisers and analysts in various domains often face substantial resource demands – time, computational, human, and financial – for constructing reliable mass appraisal models of market value.

Keywords: mass appraisal, market value, characterizing factors, classifying factors, price-forming factors, expert assessments, statistical analysis, machine learning, vehicles

For citation: Alekseeva I.E., Mezin E.A., Alekseev A.O. Decomposition of price-forming factors based on statistical analysis of expert assessments of their significance. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):53–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250305

Введение

Наиболее изученной сферой применения методов массовой оценки рыночной стоимости является жилая недвижимость. Общепринятой в отечественной профессиональной среде методологией анализа рынка недвижимости является методология дискретно-пространственного параметрического моделирования (ДПММ), разработанная Г.М. Стерником и С.Г. Стерником [1]. Согласно ДПММ, выделяются различные кластеры недвижимости, представляющие собой однородные группы объектов, например, выделенные по качеству, местоположению, размерам [2] и другим параметрам. Эти группы формируются для статистического анализа и моделирования отдельных кластеров недвижимости. Именно поэтому аналитики рынка недвижимости и профессиональные оценщики разрабатывают экономико-математические модели внутри каждого кластера отдельно, в результате чего получается не одна общая модель, а комплекс моделей.

Иностранные исследователи, например, М. Чен, Ё. Чун и Д.А. Грифиц [3], также отмечают целесообразность кластеризации объектов оценки, называя их «субрынками». Так, в [3] выполнили пространственную кластеризацию объектов недвижимости и для каждого кластера построили отдельную модель массовой оценки. С. Сисман и А.Ч. Айдиноглу в [4] продемонстрировали преимущества такого подхода. В их исследовании массовая оценка жилья выполнялась с разбивкой данных на 5 кластеров по географическому положению и социально-экономическим характеристикам районов. Результаты исследования [4] показали, что модели множественной регрессии по кластерам показали себя значительно точнее, чем единая модель по всей выборке.

Таким образом, при массовой оценке рыночной стоимости целесообразно группировать объекты оценки так, чтобы часть ценообразующих факторов принимала одинаковые значения (эти факторы определяют группу, синонимы: кластер, класс), а часть факторов отличалась (эти факторы определяют влияние характеристик на цену объекта внутри группы). Далее первые характеризующие факторы будем называть классифицирующими, вторые – истинно ценообразующими, еще их допустимо называть регрессорами. При таком подходе важным является декомпозиция ценообразующих факторов на классифицирующие и истинно ценообразующие. Несмотря на применение схожих идей в разных сферах, единого подхода к разделению ценообразующих факторов на эти группы нет, поэтому, как правило, выделение истинно ценообразующих факторов осуществляется экспертно.

Вопросы анализа информации, получаемой в процессе экспертной оценки объектов, рассматривают О.Н. Коростелева, Г.В. Савинов в [5]. Так, в [5] описывается статистический подход к обработке количественных экспертных оценок, позволяющий не только определить итоговую оценку, но и оценить ее достоверность. Особое внимание уделяется выявлению случаев расхождения мнений среди экспертов и методам количественной оценки таких отклонений. При этом авторы делают вывод о необходимости исследования отклонений, но рекомендации сводятся к оценке уровня профессиональной подготовки экспертов и их замене или к уточнению параметров оцениваемых объектов [5].

Особенности обработки экспертных мнений, в том числе при оценке рыночной стоимости, исследовались в работах Т.В. Дивинной, Е.А. Петраковой, М.С. Вишневого [6], В.А. Бакланова, Э.Я. Семенцовой, А.П. Чумаченко [7], В.Л. Шабека, А.А. Косовских, А.Ф. Зубрицкого, Д.Л. Коржицкого, Д.А. Шалагина [8].

Нельзя не отметить, что обработка экспертных суждений нашла широкое применение в оценке различных видов недвижимого имущества, прежде всего благодаря работам Л.А. Лейфера, Т.В. Крайниковой [9, 10]. Мнения профессиональных участников рынка недвижимости (агенты недвижимости, брокеры недвижимости, оценщики, аналитики рынка) о размерах корректировок цены объектов-аналогов ложатся в основу издаваемых Приволжским центром методического и информационного обеспечения оценки справочников оценщика, например, [11].

Помимо научных и аналитических работ существуют нормативные рекомендации, указанные в законе об оценочной деятельности и федеральных стандартах оценки [12–14].

В указанных выше трудах и нормативных актах изложены различные подходы к анализу экспертных суждений и способах их вынесения, при этом, как уже отмечалось выше, методов определения классифицирующих и ценообразующих признаков нет.

Целью настоящей статьи является научное обоснование метода декомпозиции ценообразующих факторов на классифицирующие и истинно ценообразующие, основанного на статистическом анализе экспертных оценок их значимости.

Данные и методы

В настоящей работе рассматривается задача массовой оценки рыночной стоимости легковых транспортных средств. В ходе исследования предложено выписать пользовательские характеристики легковых автомобилей и определить степень их значимости для оценки на основании экспертных опросов.

Под легковым автомобилем в настоящем исследовании понимается транспортное средство заводского массового производства, предназначенное для перевозки пассажиров и небольших грузов на дорогах общего пользования. Основные характеристики, соответствующие легковым автомобилям, приведены в табл. 1.

Параметры легковых транспортных средств

Таблица 1

Table 1

Parameters of passenger vehicles

№	Название характеристики	Описание характеристики
1	Марка производителя	Наименование завода, осуществившего, как правило, проектирование и выпуск легкового автомобиля
2	Модель	Принадлежность легкового автомобиля к определенному проекту (классу), разработанному производителем
3	Год изготовления	Год завершения производства автомобиля, может не совпадать с годом его поставки в продажу
4	Модификация модели	Различные производители могут со временем менять внешний вид, характеристики транспортного средства, двигатель и техническое наполнение в рамках одного наименования модели
5	Комплектация	Совокупность установленных функциональных и(или) визуальных дополнений конкретного автомобиля
6	Цвет автомобиля	Любая палитра, соответствующая цветовой политике производителя
7	Состояние автомобиля	Битый, восстановленный, без существенных скрытых повреждений, без существенных внешних повреждений, с нормальным износом относительно года выпуска, с нормальным износом относительно пробега, новый
8	Пробег	Количество километров, которые преодолело транспортное средство за весь срок его эксплуатации
9	Количество собственников	Количество владельцев, отраженных в паспорте транспортного средства, которые могли распоряжаться транспортным средством
10	Объем багажника	Обычно измеряется в литрах и характеризует грузовую вместимость
11	Вместимость	Легковой автомобиль может перевозить от 2 до 7 пассажиров
12	Грузоподъемность	Обычно измеряется в килограммах полезной нагрузки
13	Тип топлива	Бензин, дизель, газ, гибрид, электричество
14	Расход топлива	Литров на 100 км
15	Запас хода	Количество километров, которые может преодолеть транспортное средство с учетом обычных условий эксплуатации
16	Тип кузова автомобиля	Седан, универсал, купе, пикап, лифтбек, внедорожник и т. д.
17	Тип привода	Передний, задний, полный
18	Тип трансмиссии	Автоматическая, роботизированная, механическая, на базе вариатора
19	Объем двигателя	В России общепринято, что измеряется в кубических сантиметрах в большинстве случаев варьирует от 800 до 4000 куб. см
20	Мощность	Измеряется в кВт, но общепринятая мера измерения – лошадиные силы, которые обычно варьируют от 60 до 300 л.с.
21	Крутящий момент	Диапазон показателей прилагаемой силы к прокручиванию коленчатого вала, обычно измеряется в Нм
22	Максимальная скорость	Предельное значение, которое может развивать легковой автомобиль, обычно входит в диапазон от 120 до 200 км/ч
23	Время разгона до 100 км/ч	Динамика среднего автомобиля эквивалентна диапазону 6–12 с
24	Габаритные размеры	Длина, ширина и высота легкового автомобиля могут варьироваться в зависимости от модели, но обычно они имеют длину от 3,5 до 5 м, ширину – от 1,5 до 2 м и высоту – от 1 до 1,5 м
25	Экологические характеристики	В зависимости от типа топлива и мощности двигателя легковой автомобиль может иметь различные уровни выбросов загрязняющих веществ
26	Личность продавца	Сам собственник, продавший автомобиль

Комбинации перечисленных выше характеристик влияют на представление покупателя о том, привлекателен к покупке автомобиль или нет.

При этом на формирование цены влияют не только качественные и визуальные характеристики автомобиля, но и внешние условия, к которым можно отнести: государство (регион) продажи автомобиля и связанные с ним нормативные правила, устанавливающие таможенные пошлины, режимы налогообложения; наличие возможности технического обслуживания автомобиля в конкретном регионе и наличие поставок запасных частей; продвижение брендов, реклама, отзывы владельцев в рамках отдельных территорий, которые создают представление потенциальных покупателей о привлекательности конкретного экземпляра транспортного средства; регион производства транспортного средства и связанные с восприятием этого региона представления о престижности и(или) надежности автомобиля; распространенность автомобиля в конкретном регионе; региональный рынок продажи транспортных средств, который показывает величину спроса и предложения в конкретный момент времени; тенденция развития региональной экономики: снижение или рост реальных доходов населения, показатели инфляции; общая динамика цен в отрасли продажи автомобилей: среднее удорожание или удешевление отдельных, нескольких или всех групп легковых транспортных средств с течением времени; культурные особенности взаимодействия людей, проживающих на определенной территории, их готовность изменять продажную цену, согласовывать условия сделки; сезонность: время года, в которое происходит локальное смещение баланса спроса и предложения; наличие кратковременных шоковых экономических ситуаций, которые могут повлечь пиковое изменение баланса спроса и предложения, как то: резкую приостановку продаж, ажиотажный спрос, отсутствие предложений. В связи с поставленной задачей на оценку легковых автомобилей массового производства на локальном рынке Российской Федерации были сделаны некоторые допущения. Приведем некоторые из них. Авторы исследования считают, что на оговоренной территории достаточным образом развит информационный обмен между участниками гражданского оборота, имеется равный доступ к информации, а конъюнктура рынка по легковым автомобилям массового производства сложена оптимальным способом (имеется и спрос, и предложение без сильного дисбаланса). К рассмотрению не будут приниматься марки и модели легковых транспортных средств, не распространенных в Российской Федерации (так, например, популярная в Индии марка «Тата» не представлена на российском рынке и не может служить объектом автоматизированной оценки ввиду отсутствия спроса на данную марку). Тенденции изменения баланса спроса и предложения отслеживаются по имеющимся на рынке предложениям: общее количество предложений и ежемесячная динамика цен по категориям и в целом по рынку предложений.

С учетом указанных допущений было предложено сконцентрировать внимание только на внутренних факторах транспортного средства, а внешнюю среду считать единой для всего рынка. Динамика цен предложений по когортам автомобилей будет указывать на смещение всего сегмента и должна повлиять не только на продавцов, но и на покупателей транспортных средств.

Модель

Для ранжирования значимости факторов с точки зрения их влияния на цену автомобиля было предложено провести исследование в формате опросов экспертов. Все оговоренные выше характеристики транспортного средства были предложены в виде несортированного списка экспертам. Респондентам в персональных опросах было предложено оценить значимость каждой характеристики с точки зрения ее влияния на цену автомобиля по десятибалльной шкале, где «0 баллов» – оценка, соответствующая тому, что характеристика абсолютно не имеет значимости для оценки, «10 баллов» – характеристика имеет максимальное влияние на оценку транспортного средства покупателем и продавцом.

Далее по каждой характеристике были рассчитаны статистические показатели экспертных суждений: среднее значение, медианное значение, мода, дисперсия и среднее квадратичное отклонение.

Одной из задач было определение согласованности мнений экспертов, высказанной по каждой характеристике. Для определения согласованности была использована методика, предложенная А.М. Григаном в монографии [15]. Согласно методике необходимо рассчитать среднее квадратичное отклонение оценок экспертов, после чего определить коэффициент вариации. Согласованными мнениями считались оценки экспертов, по которым коэффициент вариации не превышал значения 0,4 [15].

Полученные результаты

В результате проведенных расчетов получена таблица ранжированных критериев, которые должны включаться в базовую модель оценки транспортных средств (табл. 2).

Значимость критериев оценки и согласованность экспертных суждений

Таблица 2

Table 2

Significance of evaluation criteria and consistency of expert judgments

Характеристика	Среднее квадратичное отклонение	Коэффициент вариации	Мода	Медиана	Среднее арифметическое
Год изготовления	0,5549	0,0772537	10,00	10,00	9,64
Пробег	0,8846	0,0990042	10,00	10,00	9,50
Состояние автомобиля	0,8791	0,0994440	10,00	10,00	9,43
Марка производителя	19,2088	0,6391559	10,00	10,00	6,86
Модель	18,4176	0,6530652	10,00	10,00	6,57
Тип трансмиссии	1,2088	0,1202524	10,00	9,50	9,14
Модификация модели	13,4780	0,4803495	10,00	9,50	7,64
Комплектация	0,6429	0,0976085	9,00	8,00	8,21
Мощность	1,3242	0,1564097	8,00	8,00	7,36
Тип привода	1,1484	0,1515410	8,00	7,50	7,07
Объем двигателя	1,4121	0,1647167	7,00	7,00	7,21
Количество собственников	1,5385	0,1771925	7,00	7,00	7,00
Цвет автомобиля	0,6868	0,1196122	6,00	7,00	6,93
Тип топлива	1,8736	0,2202674	5,00	6,50	6,21
Тип кузова автомобиля	5,3022	0,3883988	7,00	6,50	5,93
Расход топлива	3,1923	0,3248551	5,00	5,00	5,50
Крутящий момент	7,2088	0,6480839	5,00	5,00	4,14
Вместимость	4,7473	0,7625867	5,00	3,00	2,86
Максимальная скорость	10,4011	0,9606602	0,00	2,50	3,36
Время разгона до 100 км/ч	10,5549	0,9677388	0,00	2,50	3,36
Запас хода	6,7692	0,8672582	6,00	2,50	3,00
Грузоподъемность	3,5659	0,8528114	0,00	2,50	2,21
Габаритные размеры	5,8736	1,0945094	0,00	1,50	2,21
Объем багажника	2,7253	1,0505349	0,00	1,00	1,57
Экологические характеристики	1,7857	0,9846467	1,00	1,00	1,36

Поскольку эксперты давали оценку в дискретных значениях, при анализе их оценок дополнительно рассматривались такие статистические меры, как мода и медиана. Сортировка табл. 2 выполнена по медианным значениям.

При высокой значимости факторов наибольшее внимание привлекают факторы марки, модели и модификации транспортного средства, поскольку по ним эксперты дали значительные отклонения в оценке. Дополнительные опросы показали, что эксперты, поставившие наименьшее значение указанным факторам, поясняли, что указанные параметры не участвуют в оценке конкретного транспортного средства, а именно по указанным критериям производится отбор аналогов, с которыми сопоставляются при сравнительном анализе цен, другие эксперты указали, что оценка конкретного автомобиля производится, исходя из их начального группового отбора и типизации, поэтому они присваивали данным факторам максимальное значение.

Для построения моделей оценки и их сопоставления по точности было проведено дополнительное исследование в части построения различных моделей нейросетевых алгоритмов по полной выборке значимых параметров либо с предварительной кластеризацией экземпляров оценки по классифицирующим параметрам. Оценку точности моделей производили на основе показателя коэффициента детерминации (R^2), значения которого представлены в табл. 3.

Результаты моделей массовой оценки на основе показателя коэффициента детерминации

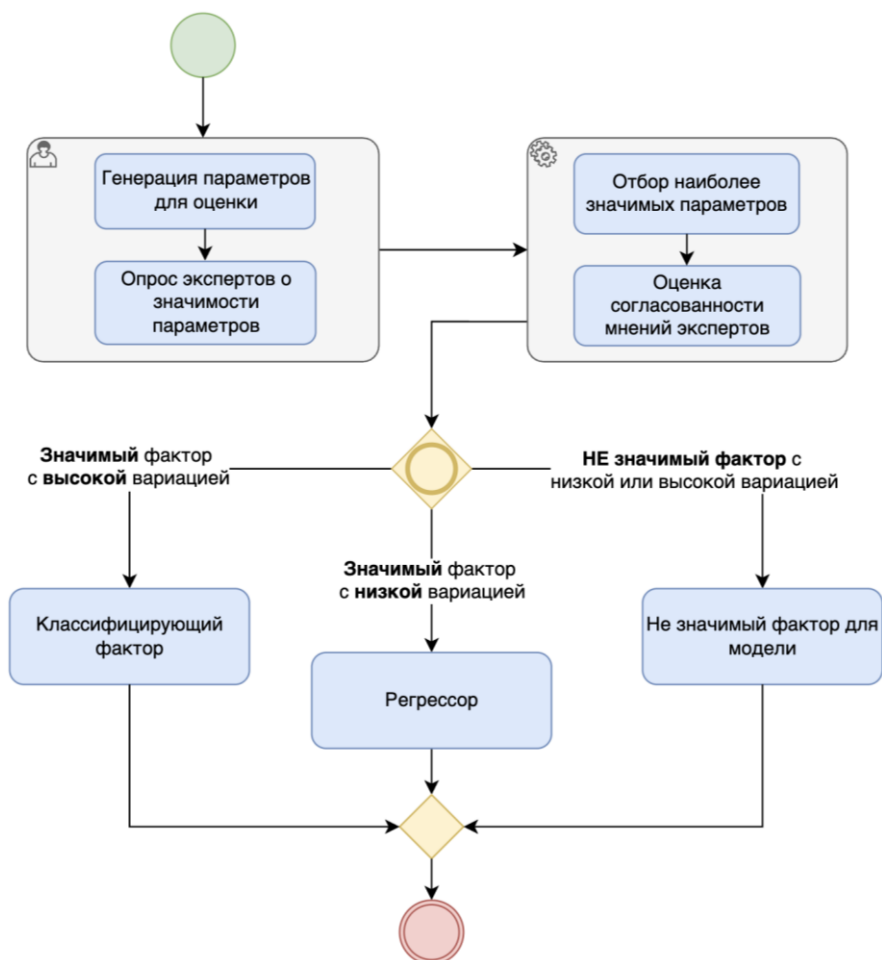
Таблица 3

Table 3

Results of Mass Valuation Models based on the Coefficient of Determination

	Предсказание по абсолютному отклонению от среднего		Предсказание по процентному отклонению от среднего	
	Все характеристики	С учетом классификации	Все характеристики	С учетом классификации
Линейная регрессия	0,757	0,907	0,866	0,938
Множественная линейная регрессия	0,823	0,937	0,891	0,944
Случайный лес	0,883	0,944	0,924	0,949
Полносвязная нейронная сеть	0,921	0,945	0,934	0,941
Бустинг	0,941	0,950	0,948	0,954
CatBoost	0,945	0,952	0,950	0,954

Как видно из приведенной табл. 3, любая из предложенных моделей представляла наиболее значимые результаты при сегментации выборки на основе классифицирующих параметров: марка производителя, модель, модификация модели. При этом выделение в том числе модификации модели в классифицирующий признак давало существенный прирост точности рассматриваемых алгоритмов.



Алгоритм определения значимых классифицирующих и ценообразующих параметров объектов массовой оценки
Algorithm for Identifying Significant Classifying and Price-forming Parameters of Mass Appraisal Objects

В современных научных работах прослеживается тенденция уделять внимание однородности объектов при оценке. Разделение в настоящем исследовании факторов на классифицирующие и характеризующие получило практическое подтверждение улучшения точности всех исследованных моделей, начиная от линейной регрессии и заканчивая методологией CatBost.

Сегментация объектов оценки по ключевым признакам позволяет учесть структурные различия и повысить качество оценки. Методологически важно обосновать выбор таких признаков – через экспертные рейтинги значимости и согласованности мнений либо через их статистический анализ и отбор.

Концептуально предложенный в настоящей работе метод декомпозиции ценнообразующих факторов на классифицирующие и характеризующие приведен в виде блок-схемы, выполненной в нотации BPMN (см. рисунок).

Приведенный в статье метод оценивает роль человеческого фактора, при котором рассогласованность суждений не является ошибкой, а является проявлением экспертности, что выражается в увеличении коэффициента вариации при сохранении высокой значимости факторов оценки.

Заключение

Из данного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Оптимальным для использования можно считать фактор с медианным значением больше 5, что говорит о том, что большинство экспертов считают его значимым для использования в оценке автомобиля.

2. Для отбора ценнообразующих факторов экземпляра оценки предлагается выбрать все значимые критерии, по которым коэффициент вариации менее или равен 0,4, что говорит об удовлетворительной согласованности экспертных мнений относительно критериев оценки легкового автомобиля.

3. Если значимость фактора выше среднего и при этом наблюдается неудовлетворительная согласованность экспертов относительно критерия оценки (коэффициент вариации больше 0,4), то фактор можно считать классифицирующим, а не ценнообразующим.

Таким образом, разработан гибридный метод декомпозиции ценнообразующих факторов, отличающийся от известных тем, что в случае высокого значения медианы рангов и их значительной дисперсии такой признак следует относить к классифицирующей категории, в противном случае признак можно считать регрессором.

Такой подход позволяет построить комплекс математических моделей (в том числе ансамбль нейронных сетей), точность которых превосходит общую модель, в которой все признаки учтены в комплексе.

Альтернативные подходы и мнения

Не все исследования однозначно поддерживают необходимость и перспективность кластеризации объектов оценки. Отмечается, что эффект сегментации зависит от природы данных и метода моделирования. В [16] Е. Аленани, Л.А. Лехам и С. Лу указывают, что ими был реализован интегрированный подход кластеризации с последующей регрессией по локации, результаты получились смешанными: для одного кластера точность прогноза слегка улучшилась, а для другого – даже ухудшилась по сравнению с общей моделью. Авторы отмечают, что такие причины, как перегруппировка данных или недостаточный размер выборки в отдельных кластерах, могли нивелировать выигрыш от сегментации. Это предупреждает, что неправильная или чрезмерная сегментация может снизить точность (например, когда группы получаются слишком мелкими или неустойчивыми).

В [17] В.Л. Ясницкий, Л.Н. Ясницкий указывают на целесообразность оценки не только на основании рыночных факторов, присущих объекту массового оценивания, но и на основании внешнеэкономических факторов: курсы валют, значение ВВП, объем строительства в регионе.

В [18] предпринята попытка построить комплексную нейросетевую модель для оценки рыночной стоимости не только в масштабах локального рынка, но и в масштабах всех крупнейших городов России.

Действительно, современные методы машинного обучения способны во многом учесть нелинейности и взаимодействия признаков без явного разделения на группы. Например, градиентные бустинги и случайные леса автоматически выявляют важные разветвления по категориальным признакам (условно выполняя роль сегментации внутри модели).

Список литературы

1. Стерник Г.М., Стерник С.Г. Анализ рынка недвижимости для профессионалов. М.: Экономика, 2009. 606 с.
2. Стерник С.Г. Методология дискретного пространственно-параметрического моделирования рынков недвижимости // Прикладная математика и вопросы управления. 2020. № 4. С. 155–185. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.10. URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/amcs/article/view/2103/1568>.
3. Chen M., Chun Y., Griffith D.A. Delineating Housing Submarkets Using Space–Time House Sales Data: Spatially Constrained Data-Driven Approaches // Journal of Risk and Financial Management. 2023. Vol. 16 (6). Art. 291. DOI: 10.3390/jrfm16060291. URL: <https://www.mdpi.com/1911-8074/16/6/291>.
4. Sisman S., Aydinoglu A.C. Improving performance of mass real estate valuation through application of the dataset optimization and Spatially Constrained Multivariate Clustering Analysis // Land Use Policy. 2022. Vol. 119. Art. 106167. DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106167. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837722001946>.
5. Коростелева О.Н., Савинов Г.В. Статистический анализ экспертных оценок // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2023. № 3-2 (141). С. 109–113. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54018681_62504708.pdf.
6. Дивина Т.В., Петракова Е.А., Вишневский М.С. Основные методы анализа экспертных оценок // Экономика и бизнес: теория и практика. 2019. № 7. С. 42–44. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11072. EDN ACKSPN. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39166510_92559182.pdf.
7. Бакланов В.А., Семенцова Э.Я., Чумаченко А.П. Анализ возможности повышения уровня достоверности результатов экспертных оценок при подготовке и принятии управленческих решений // ГосРег: государственное регулирование общественных отношений. 2023. № 1 (43). С. 42–50. EDN APXCKW. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54602229_28276803.pdf.
8. Оценка стоимости автотранспортных средств сравнительным методом. Количественные методы расчета стоимости: учеб.-метод. пособие / В.Л. Шабека, А.А. Косовский, А.Ф. Зубрицкий и др.; под общ. ред. проф. Р.Б. Ивутя. Минск: БНТУ, 2010. 60 с. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/768/Ocenka_stoimosti_avtotransportnyh.pdf.
9. Лейфер Л.А., Кашникова З.А. Определение рыночной стоимости недвижимости на основе коллективных экспертных оценок // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2012. № 2 (125). С. 20–28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17323993>.
10. Лейфер Л.А., Крайникова Т.В. Новая концепция информационно-справочного обеспечения оценочной деятельности. Справочники оценщика недвижимости-2019 // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2019. № 5 (212). С. 34–44. DOI: 10.24411/2072-4098-2019-10504. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37616461>.
11. Лейфер Л.А., Крайникова Т.В. Справочник оценщика недвижимости-2020. Производственно-складская недвижимость и сходные типы объектов: корректирующие коэффициенты и скидки для сравнительного подхода / под ред. Л.А. Лейфера. Н. Новгород: Информ-Оценка, 2020. 413 с.
12. Федеральный закон «Об оценочной деятельности в Российской Федерации» от 29 июля 1998 г. № 135-ФЗ // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19586/ (дата обращения: 23.02.2025).
13. Федеральный стандарт оценки «Общие понятия оценки, подходы и требования к проведению оценки (ФСО № 1)»: утвержден приказом Минэкономразвития России от 14 апреля 2022 г. № 200 // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_126896/ (дата обращения: 23.02.2025).
14. Федеральный стандарт оценки «Подходы и методы оценки (ФСО № 5)»: утвержден приказом Минэкономразвития России от 14 апреля 2022 г. № 200 // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_126896/ (дата обращения: 23.02.2025).
15. Григан А.М. Управленческая диагностика: теория и практика: моногр. Ростов н/Д: Изд-во РСЭИ, 2009. 316 с.
16. Alenany E., Lekham L.A., Lu S. Integrated Clustering Regression for Real Estate Valuation // Real Estate Finance. 2021. Vol. 1. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3835967>.

17. Ясницкий Л.Н., Ясницкий В.Л. Разработка и применение комплексных нейросетевых моделей массовой оценки и прогнозирования стоимости жилых объектов на примере рынков недвижимости Екатеринбурга и Перми // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2017. № 3 (186). С. 68–84. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28822345>.

18. Ясницкий Л.Н., Ясницкий В.Л., Алексеев А.О. Моделирование рынков жилой недвижимости крупнейших городов России // Экономика региона. 2022. Т. 18, № 2. С. 609–622. DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-2-22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49152828>.

References

1. Sternik G.M., Sternik S.G. *Analiz rynka nedvizhimosti dlya professionalov* [Real estate market analysis for professionals]. Moscow: Ekonomika Publ., 2009, 606 p. (In Russ.)

2. Sternik S.G. Methodology of discrete spatial-parametric real estate market modelling. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2020;(4):155–185. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.10. Available at: <https://ered.pstu.ru/index.php/amcs/article/view/2103/1568>.

3. Chen M., Chun Y., Griffith D.A. Delineating Housing Submarkets Using Space–Time House Sales Data: Spatially Constrained Data-Driven Approaches. *Journal of Risk and Financial Management*. 2023;16(6):291. DOI: 10.3390/jrfm16060291. Available at: <https://www.mdpi.com/1911-8074/16/6/291>.

4. Sisman S., Aydinoglu A.C. Improving Performance of Mass Real Estate Valuation Through Application of the Dataset Optimization and Spatially Constrained Multivariate Clustering Analysis. *Land Use Policy*. 2022;119:106167. DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106167. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837722001946>.

5. Korosteleva O.N., Savinov G.V. Statistical Analysis of Expert Assessments. *Proceedings of the Saint Petersburg State University of Economics*. 2023;3-2 (141):109-113. (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54018681_62504708.pdf.

6. Divina T.V., Petrakova E.A., Vishnevsky Basic methods of analysis of expert assessments. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2019;(7):42–44. (In Russ.) DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11072. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39166510_92559182.pdf.

7. Baklanov V.A., Sementsova E.Ya., Chumachenko A.P. [Analysis of the Possibility of Increasing the Reliability of Expert Evaluations in Decision-Making]. *State Regulation of Public Relations*. 2023;1(43):42–50. (In Russ.) Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54602229_28276803.pdf.

8. Shabeka V.L., Kosovskiy A.A., Zubritskiy A.F., Korzhitskiy D.L., Shalagin D.A. *Otsenka stoimosti avtotransportnykh sredstv sravnitel'nykh metodom. Kolichestvennye metody rascheta stoimosti: ucheb.-metod. posobie* [Valuation of Motor Vehicles Using the Comparative Method. Quantitative Calculation Methods: Educational and Methodological Guide]. Minsk: BNTU, 2010. 60 p. (In Russ.) Available at: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/768/Ocenka_stoimosti_avtotransportnykh.pdf.

9. Leifer L.A., Kashnikova Z.A. [Definition of market value of real estate based on expert collective assessments]. *Property Relations in the Russian Federation*. 2012;2(125):20–28. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17323993>.

10. Leifer L.A., Krainikova T.V. [New concept of information and background assessment of assessment activity. Directors of real estate evaluator-2019]. *Property Relations in the Russian Federation*. 2019;5(212):34–44. (In Russ.) DOI: 10.24411/2072-4098-2019-10504. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37616461>.

11. Leifer L.A., Krainikova T.V. *Spravochnik otsenshchika nedvizhimosti-2020. Proizvodstvenno-skladskaya nedvizhimost' i skhodnye tipy ob"ektov* [Appraiser's Handbook 2020. Industrial and Warehouse Real Estate and Similar Types of Properties: Adjustment Coefficients and Discounts for the Comparative Approach]. Nizhny Novgorod: Inform-Otsenka, 2020. 413 p. (In Russ.)

12. *Federal'nyy zakon "Ob otsenochnoy deyatel'nosti v Rossiyskoy Federatsii" ot 29 iyulya 1998 g. No. 135-FZ* [Federal Law "On appraisal activities in the Russian Federation" dated July 29, 1998 No. 135-FZ]. *ConsultantPlus*. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19586/ (accessed 23.02.2025).

13. *Federal'nyy standart otsenki "Obshchie ponyatiya otsenki, podkhody i trebovaniya k provedeniyu otsenki (FSO No. 1)"*: utverzhden prikazom Minekonomrazvitiya Rossii ot 14 aprelya 2022 g. No. 200 [Federal Valuation Standard "General Valuation Concepts, Approaches and Requirements for Conduc-

ting Valuation (FSO No. 1)”: Approved by Order of the Ministry of Economic Development of Russia on April 14, 2022, No. 200]. *ConsultantPlus*. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_126896/ (accessed 23.02.2025).

14. *Federal'nyy standart otsenki “Podkhody i metody otsenki (FSO № 5)”*: utverzhden prikazom Minekonomrazvitiya Rossii ot 14 aprelya 2022 g. No. 200 [Federal Valuation Standard “Approaches and Valuation Methods (FSO No. 5)”: Approved by Order of the Ministry of Economic Development of Russia on April 14, 2022, No. 200]. *ConsultantPlus*. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_126896/ (accessed 23.02.2025).

15. Grigan A.M. *Upravlencheskaya diagnostika: teoriya i praktika: monogr.* [Management Diagnostics: Theory and Practice. Monograph]. Rostov-on-Don: RSEI Publ., 2009. 316 p. (In Russ.)

16. Alenany E., Lekham L.A., Lu S. Integrated Clustering Regression for Real Estate Valuation. *Real Estate Finance*. 2021;1. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3835967>.

17. Yasnitsky L.N., Yasnitsky V.L. The development and application of integrated neural network models for mass appraisal and forecasting the value of residential properties on the example of the real estate markets of Yekaterinburg and Perm city. *Property Relations in the Russian Federation*. 2017;3(186):68–84. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28822345>.

18. Yasnitsky L.N., Yasnitsky V.L., Alekseev A.O. Simulation of residential real estate markets in the largest Russian cities. *Ekonomika regiona = Economy of region*. 2022;18(2):609–612. (In Russ.) DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-2-22. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49152828>.

Информация об авторах

Алексеева Ирина Евгеньевна, канд. экон. наук, доц. кафедры менеджмента и маркетинга, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; alekseeva.i.e@yandex.ru.

Мезин Евгений Александрович, аспирант кафедры экономики и финансов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; ea.mezin@gmail.com.

Алексеев Александр Олегович, канд. экон. наук, доц., начальник управления организации научных исследований, доц. кафедры экономики и финансов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; aoalekseev@pstu.ru.

Information about the authors

Irina E. Alekseeva, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof. of the Department of Management and Marketing, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; alekseeva.i.e@yandex.ru.

Evgenii A. Mezin, Postgraduate student of the Department of Economics and Finance, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; ea.mezin@gmail.com.

Aleksandr O. Alekseev, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Head of the Administrative Directorate for Organization of Scientific Researchers, Ass. Prof. of the Department of Economics and Finance, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; aoalekseev@pstu.ru.

Вклад авторов: редактирование статьи, консультирование по вопросам оценки рыночной стоимости – Алексеева И.Е.; формулировка гипотезы, сбор данных, выполнение расчетов, подготовка статьи – Мезин Е.А., научное руководство, редактирование статьи – Алексеев А.О.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: editing of the article, consulting on market value appraisal – Alekseeva I.E.; hypothesis formulation, data collection, calculations, preparation of the article – Mezin E.A.; scientific guidance, editing of the article – Alekseev A.O.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.05.2025

The article was submitted 06.05.2025

МОДЕЛЬ ИНКРЕМЕНТНОЙ МИГРАЦИИ ДАННЫХ В ПРОЕКТАХ ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ

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

О.Л. Голубева, golubeva.ol@mail.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Миграция данных играет ключевую роль в проектах по внедрению ERP-систем. Сценарии миграции могут быть весьма сложными и продолжительными, требовать значительных ресурсов и высокой квалификации со стороны персонала компании. Недостаточная оценка доступных ресурсов может привести к значительному росту затрат и нарушению плановых сроков запуска ERP-системы. Тем не менее сложность миграционных сценариев часто оказывается недооцененной. Большинство существующих исследований посвящено преимущественно техническим аспектам миграции данных, в то время как концептуальные элементы, такие как взаимосвязь миграции данных с бизнес-процессами, остаются недостаточно изученными. **Цель исследования.** Настоящая статья направлена на разработку модели миграции данных, учитывающей взаимодействие бизнес-процессов и данных в процессе внедрения ERP-систем, с целью повышения эффективности проектов миграции и минимизации рисков. **Материалы и методы.** В работе использованы методы алгоритмического моделирования и описания бизнес-процессов (BPMN) для разработки инкрементной стратегии миграции данных. **Результаты.** Результатом исследования стала модель миграции данных, которая отражает взаимосвязь между данными и бизнес-процессами. Модель включает определение состояний миграции и переходов между ними, необходимых параметров и переменных, отражающих привлечение исполнителей по этапам миграции и выполнение соответствующих работ по обеспечению процесса миграции данных. В рамках модели разработаны также итоговые показатели, которые позволяют более точно оценить риски и ресурсы, необходимые для успешного завершения миграции. **Заключение.** Предложенная модель может служить основой для успешного планирования миграции данных в рамках внедрения ERP-систем, что является необходимым условием для достижения бизнес-целей и повышения операционной эффективности организаций.

Ключевые слова: миграция данных, ERP-системы, внедрение ERP, инкрементная стратегия, моделирование проектов

Для цитирования: Логиновский О.В., Голубева О.Л. Модель инкрементной миграции данных в проектах внедрения ERP-систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 64–76. DOI: 10.14529/ctcr250306

Original article
DOI: 10.14529/ctcr250306

MODEL OF INCREMENTAL DATA MIGRATION IN ERP IMPLEMENTATION PROJECTS

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

O.L. Golubeva, golubeva.ol@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Data migration plays a crucial role in the implementation of ERP. Migration scenarios can be quite complex and prolonged, requiring significant resources and a high level of expertise from organization personnel. Inadequate assessment of available resources may lead to a substantial increase in costs and disruption of the planned timelines for the launch of the ERP system. However, the complexity of migration scenarios is often underestimated. The majority of existing research primarily focuses on the technical

aspects of data migration, while conceptual elements, such as the relationship between data migration and business processes, remain insufficiently explored. **The aim of the study.** This article aims to develop a data migration model that considers the interaction between business processes and data during the ERP system implementation, with the goal of enhancing the effectiveness of migration projects and minimizing risks. **Materials and methods.** The study employs algorithmic modeling techniques and Business Process Model and Notation (BPMN) to create an incremental data migration strategy. **Results.** The outcome of the research is a data migration model that reflects the interrelationship between data and business processes. This model includes the definition of migration states and transitions between them, necessary parameters and variables that reflect the involvement of stakeholders at various stages of migration, and the execution of relevant tasks to ensure the data migration process. The model also establishes key performance indicators that enable more accurate assessment of risks and resources required for the successful completion of migration. **Conclusion.** The proposed model can serve as a foundation for effective planning of data migration within the framework of ERP system implementation, which is a requisite condition for achieving business objectives and enhancing operational efficiency in organizations.

Keywords: data migration, ERP systems, ERP implementation, incremental strategy, project modeling

For citation: Loginovskiy O.V., Golubeva O.L. Model of incremental data migration in ERP implementation projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):64–76. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250306

Введение

Системы планирования ресурсов предприятия (ERP) – это интегрированные программные пакеты, которые автоматизируют бизнес-процессы организации в области закупок, производства, продаж и других основных операций [1]. Для эффективного сопровождения бизнес-процессов ERP-системы объединяют данные компании на единой цифровой платформе, предоставляя доступ к ним для всех пользователей и структурных подразделений [2].

Проекты внедрения ERP зачастую предполагают перенос данных и бизнес-процессов из предшествующих систем [3]. Такой перенос называется миграцией и заключается в перемещении данных из одного или нескольких источников в систему-приемник (целевую систему), которой в данном случае ставится ERP-система.

В цифровую эпоху данные представляют собой основные активы любой организации, и их качество, последовательность и актуальность имеют огромное значение для эффективного функционирования компании, а потому успех внедрения ERP критически зависит от эффективного выполнения миграции данных [4].

Организации, которые недооценивают важность миграции, рискуют столкнуться с серьезными последствиями. Исследование Brainhub [5] показывает, что почти 40 % проектов миграции не достигли своим бизнес-целей, что привело к перерасходу бюджета в среднем на 30–50 %. Отдельного внимания стоит вывод Brainhub [5] о том, что неудачные проекты миграции часто заканчиваются серией каскадных бизнес-воздействий, имеющих существенные негативные последствия для деятельности компании, вплоть до сбоев в обслуживании клиентов длительностью в несколько недель.

В соответствии с этим при внедрении ERP, где большой объем и разнообразие данных делают миграцию сложной и рискованной задачей, представляется эффективным использование инкрементной стратегии миграции, которая позволяет постепенно переносить данные из одной системы в другую.

Инкрементный подход предоставляет возможность более контролируемо управлять процессом перехода, сокращая риски и повышая вероятность успешной миграции. Данные переносятся партиями или модулями [6], что позволяет сосредоточиться на определенных участках данных и систем. После каждого этапа миграции проводится проверка правильности переноса данных и их соответствия требованиям новой системы. Кроме того, инкрементная стратегия облегчает нагрузку на команду проекта, позволяя проводить миграцию в более предсказуемом масштабе и управлять ресурсами более эффективно. Пользователи могут начать работать с новой системой и предоставлять обратную связь в части соответствия бизнес-процессам.

1. Анализ научных работ по теме миграции данных

Тема миграции данных в контексте внедрения ERP-систем нашла широкое отражение в зарубежной литературе.

В работе Shafiq Hussain [7] подчеркивается первостепенное значение обеспечения целостности данных на протяжении всего процесса миграции. Авторы указывают, что минимизация времени простоя остается важнейшей задачей при переносе данных, поскольку сбои в работе могут привести к значительным финансовым потерям и снижению удовлетворенности клиентов. В то же время внедрение поэтапной миграции и использование автоматизированных средств поддержки миграции могут значительно снизить негативное влияние на непрерывность бизнеса.

Digneshkumar Khatri [8] в исследовании 2023 года рассматривает проблемы и ключевые аспекты миграции данных для ERP-системы SAP S/4HANA. В статье неоднократно подчеркивается, что разработка эффективных стратегий миграции данных необходима для обеспечения целостности данных и минимизации сбоев в бизнес-процессах компании.

Nilesh Kulkarni и Saurav Bansal [4] выявили сложный и разнообразный характер проблем, с которыми сталкиваются организации в процессе миграции. Авторы указывают на важность систематического и итеративного подхода для обеспечения целостности данных и функциональности системы.

В исследовании Laxman Vattam [9] рассматривается перенос данных в систему Salesforce. Эта система относится к классу CRM, а не ERP, но процесс миграции сталкивается с аналогичными проблемами. В данном исследовании много внимания уделяется анализу бизнес-данных и разработке политики управления данными с четко определенными ролями и обязанностями.

Таким образом, исследователи по данной теме сходятся во мнении, что миграция данных в рамках реализации проектов ERP-систем имеет прямую связь с бизнес-процессами компании. Этот аспект требует особого внимания и тщательной проработки стратегий, поскольку неудачное завершение миграции может привести к негативным последствиям для операционной деятельности организации [10].

С учетом этого многие авторы рекомендуют применять поэтапный подход к переносу данных в проектах ERP. Такое решение обусловлено высокой сложностью и значительным объемом взаимосвязей между различными данными. Поэтапная миграция позволяет более эффективно управлять рисками, обеспечивая плавный переход и минимизируя вероятность возникновения ошибок или потери информации.

Многие исследования отмечают, что участие сотрудников компании и внешних консультантов в процессах миграции данных является критически важным элементом успешного завершения проекта внедрения ERP.

Сотрудники предприятия играют важную роль благодаря своему глубокому пониманию бизнес-процессов. Привлечение заинтересованных сторон имеет решающее значение для обеспечения соответствия миграции потребностям бизнеса и своевременного выявления и решения потенциальных проблем [11]. После завершения технической части миграции сотрудникам предстоит тестировать новые данные, чтобы убедиться в корректности переноса и функционирования бизнес-процессов.

Миграция данных в проектах внедрения ERP требует специфических компетенций и релевантного опыта решения подобных задач. ERP-системы в принципе охватывают множество аспектов функционирования предприятия, каждая из которых требует глубокой экспертизы и понимания специфических бизнес-процессов. Этим обосновывается привлечение к проектам миграции внешних консультантов, которые помогут избежать распространенных ошибок и решить возникающие у сотрудников проблемы с данными и бизнес-процессами.

Что касается непосредственно моделей миграции данных, то они достаточно разнообразны, что подчеркивает сложность и многоплановость данного процесса. Можно выделить следующие основные группы математических и алгоритмических моделей, связанных с миграцией данных:

1. Модели оценки качества данных: позволяют проанализировать такие аспекты, как точность, полнота, согласованность, актуальность, доступность и уникальность данных [12].

2. Модели предварительной обработки данных: представляют собой алгоритмизированные процедуры подготовки данных к миграции, включая выявление аномалий, устранение ошибок и нормализацию.

3. Трансформационные модели: описывают различные преобразования данных для обеспечения совместимости, качества и соответствия при переносе между различными технологиями хранения или моделями данных [11, 13–17].

4. Модели оценки результатов миграции: включают определение устойчивости бизнес-процессов в целевой системе, сравнение мигрированных данных с источником, анализ частоты появления негативных последствий, соответствия инвестиций в миграцию с полученными выгодами.

Необходимо отметить, что на данный момент большинство исследователей миграции данных фокусируются на технических аспектах процесса, таких как извлечение, трансформация и загрузка (ETL). Однако они зачастую не учитывают последовательность и особенности бизнес-процессов, которые должны запускаться в процессе миграции. Это приводит к недостаточной интеграции между техническими и бизнес-объектами.

Отсутствие формализованных механизмов, которые могли бы соединить миграцию данных и бизнес-процессы, нередко создает неопределенность при планировании проектов. Организациям сложно предсказать сроки и стоимость миграции, а также человеческие ресурсы, которые необходимо будет задействовать на проекте.

В соответствии с этим целью данной статьи является разработка модели миграции данных, которая бы учитывала интеграцию данных и бизнес-процессов и позволила компаниям и специалистам по внедрению ERP более эффективно управлять проектами миграции.

С учетом основных проблем, связанных с миграцией данных в проектах внедрения ERP-систем, модель должна соответствовать следующим требованиям:

- 1) возможность отражения взаимосвязей и взаимозависимостей между данными и бизнес-процессами;
- 2) учет доступности сотрудников и консультантов по ERP-системам, компетенции которых необходимы для сопровождения проекта миграции;
- 3) наличие формализованных показателей миграции данных, учитывающих временные, трудовые и финансовые затраты.

2. Взаимосвязь миграции данных и бизнес-процессов предприятия

Бизнес-процессы в ERP-системе представляют собой набор взаимосвязанных действий, которые обеспечивают достижение целей организации. Эти процессы охватывают все аспекты функционирования компании, включая управление финансами, производством, продажами, запасами и человеческими ресурсами [18–20].

Каждый бизнес-процесс состоит из последовательности действий, которая регламентирована архитектурой ERP-системы. Например, бизнес-процесс закупки материалов (рис. 1) включает подбор поставщика, регистрацию договора, отражение условий оплаты, оформление заказа, выставление счета, оформление поступления товаров и регистрацию оплаты поставщику.

В соответствии с этим мы можем спроектировать стратегию миграции данных, учитывающую возможность распараллеливания отдельных этапов (рис. 2). Например, в проекте миграции данных для бизнес-процесса закупки материалов первичными данными являются сведения о поставщиках. Далее можно перенести договоры, а следом – заказы поставщикам. После переноса заказов можно мигрировать поступления материалов и счета на оплату. Необходимо также учесть, что для формирования счетов на оплату необходимо получить данные о реквизитах банковского счета соответствующего поставщика. Последним этапом является перенос документов оплаты, которые могут включать сведения как о выставленных счетах, так и о поставках, к которым привязана оплата.

Картируя таким образом бизнес-процессы, можно получить представление об эффективной последовательности миграции данных, которая обеспечивает целостность бизнес-процессов.

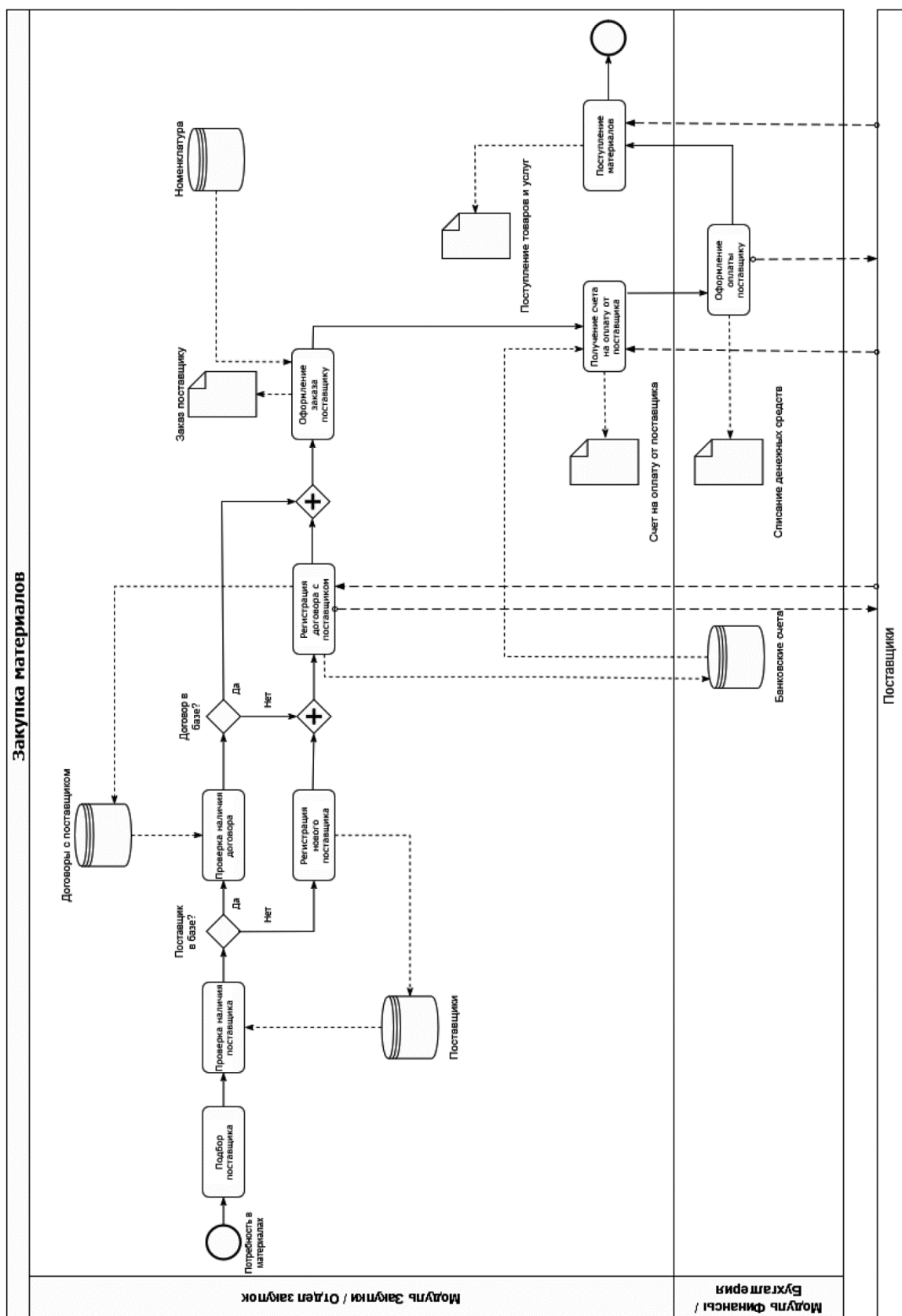


Рис. 1. Модель бизнес-процесса «Закупка материалов»
Fig. 1. Business Process Model "Material Procurement"

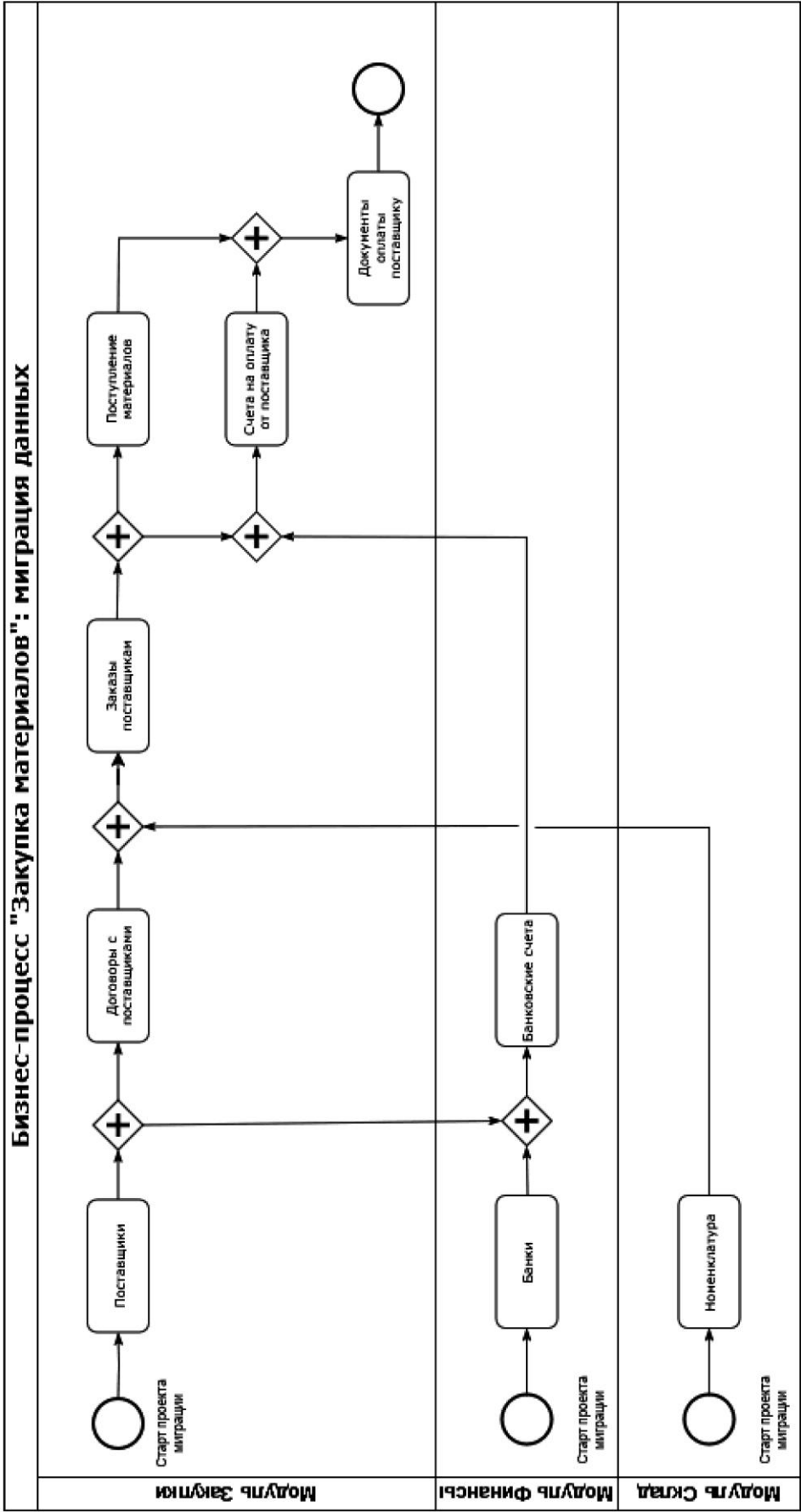


Рис. 2. Карта миграции данных бизнес-процесса «Закупка материалов»
Fig. 2. Data Migration Map of the "Material Procurement" Business Process

3. Формирование инкрементной модели миграции данных

Различные этапы миграции данных: перенос сведений о поставщиках, перенос договоров поставщиков, перенос заказов поставщикам и т. д. – можно представить в виде отдельных состояний проекта миграции. В каждом таком состоянии происходит как техническая часть миграции данных (ETL), так и их размещение в ERP-системе, встраивание в бизнес-процессы, тестирование и внесение исправлений при необходимости. Множество таких состояний обозначим как

$$S = \{s_i\}, i = \overline{1, N},$$

где N – количество состояний.

Проект миграции данных может находиться одновременно в нескольких состояниях в соответствии с этапами миграции, которые могут происходить параллельно, например, перенос сведений о поставщиках и перенос сведений о покупателях. Но чтобы поддержать целостность и согласованность бизнес-процессов, смена одного состояния на другое должна происходить с учетом взаимосвязи между данными. В предложенной модели переход в новое состояние будет осуществляться, если система закончила пребывание во всех предшествующих состояниях, то есть все необходимые предшествующие этапы завершены.

Для определения такого рода взаимосвязей между состояниями, введем бинарную матрицу переходов:

$$R = (r_{ij}), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N},$$

где $r_{ij} = 1$, если состояние j является предшествующим для i , и $r_{ij} = 0$, если не является; N – количество состояний.

Для сопровождения каждого состояния требуются сотрудники определенного профиля и консультанты по ERP-системе. Например, для переноса данных модуля «Закупки» нужно будет задействовать сотрудников отдела закупок.

Соответственно, для определения профиля сотрудников, соответствующих каждому состоянию, введем матрицу соответствия:

$$P = (p_{ij}), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M},$$

где $p_{ij} = 1$, если состоянию i требуются сотрудники профиля j , и $p_{ij} = 0$, если не требуются; N – количество состояний; M – количество профильных групп.

Описание параметров модели

Параметрами мы будем считать значения, которые устанавливаются заранее и остаются неизменными в процессе реализации модели. В соответствии с требованиями к модели необходимо задать следующие параметры:

1) объем работ для сотрудников в каждом состоянии миграции v_i^e определяется как количество человеко-часов, которые необходимо затратить в данном состоянии при сопровождении соответствующего этапа миграции сотрудниками компании.

2) объем работ для консультантов в каждом состоянии миграции v_i^k определяется как количество человеко-часов, которые необходимо затратить в данном состоянии при сопровождении соответствующего этапа миграции консультантами.

3) максимально доступное число консультантов на проекте – K .

4) максимально доступное число сотрудников по профильным группам (например, менеджеры по закупкам, сотрудники отдела кадров и т. п.):

$$E = (E_j), j = \overline{1, M},$$

где M – количество профильных групп.

5) стоимость часа работы консультанта C^k .

Описание переменных модели

Переменными мы будем считать значения, которые динамически определяются в процессе реализации модели. В соответствии с требованиями необходимо ввести следующие переменные:

1) модельное время t – будет меняться дискретно и показывать текущую продолжительность проекта миграции;

2) множество актуальных состояний в каждый момент времени $S(t) \in S$;

3) множество завершенных состояний $F \in S$;

- 4) количество сотрудников $e_{ij}(t)$, задействованных на этапе i и имеющих профиль j в момент времени t ;
- 5) количество консультантов $k_i(t)$, задействованных на этапе i в момент времени t ;
- 6) выполненный объем работ для сотрудников $w_i^e(t)$ на этапе i в момент времени t ;
- 7) выполненный объем работ для консультантов $w_i^k(t)$ на этапе i в момент времени t ;
- 8) время $u_i^e(t)$, потраченное на выполнение этапа i сотрудниками в момент времени t ;
- 9) время $u_i^k(t)$, потраченное на выполнение этапа i консультантами;
- 10) общее время u_i , потраченное на выполнение этапа i .

Описание показателей модели

Итоговыми показателями работы модели, определяющими достижение целей проекта миграции, выступят следующие:

1. Длительность проекта миграции будет определяться как модельное время на момент выхода из последнего состояния.
2. Совокупные затраты на консультантов рассчитываются как совокупное время, затраченное консультантами во всех состояниях, умноженное на стоимость часа.
3. Совокупное время простоя рассчитывается как сумма отклонений между временем, затраченным сотрудниками, и временем, затраченным консультантами в каждом состоянии.
4. Коэффициент равномерности загрузки консультантов определяется как сумма отношений между загрузкой консультантов и средней загрузкой в каждый момент времени.

4. Алгоритмизация инкрементной модели миграции данных

Алгоритмизация – это процесс создания четкого, последовательного описания действий или шагов, необходимых для решения определенной задачи с использованием модели. Предложенная нами инкрементная модель будет выполняться следующим образом (рис. 3):

1. Переходим к стартовому моменту времени $t = 1$.
2. Выполненный объем работ для сотрудников и консультантов во всех состояниях задаем равным 0:
 $w_i^e(t) = 0, i = \overline{1, N}$;
 $w_i^k(t) = 0, i = \overline{1, N}$.
3. Попадаем во множество начальных состояний $S(1)$. Для $s_i \in S(1)$ выполняется условие $r_{ij} = 0, j = \overline{1, N}$, то есть состояния не имеют предшественников.
4. Время, потраченное на выполнение этапов множества $S(t)$ сотрудниками и консультантами, задаем равным 0:
 $u_i^e(t) = 0, \forall i : s_i \in S(t)$;
 $u_i^k(t) = 0, \forall i : s_i \in S(t)$.
5. Происходит распределение сотрудников на этапы работ по проекту:
 - 5.1. Переходим к состоянию $s_i \in S(t)$.
 - 5.2. Количество сотрудников, задействованных на этапе s_i , задается равным 0:
 $e_{ij}(t) = 0$.
 - 5.3. Проверяем, выполнен ли объем работ сотрудников для данного состояния: $v_i^e \leq w_i^e(t)$. Если объем не выполнен, то увеличиваем время выполнения работ сотрудниками на данном этапе на единицу и переходим к 5.4, если выполнен, то возвращаемся к 5.1 и переходим к следующему состоянию.
 - 5.4. Проверяем доступность сотрудников нужного профиля с использованием матрицы соответствия: $\sum_j e_{ij}(t) < E_j$, где $p_{ij} = 1$.
 Если сотрудники доступны, то: 1) увеличиваем загрузку сотрудников на данном этапе на 1;
 2) увеличиваем объем работ, выполненный сотрудниками на данном этапе, на 1.
 Распределение заканчивается, когда не осталось свободных сотрудников.
6. Происходит распределение консультантов на этапы работ по проекту:
 - 6.1. Переходим к состоянию $s_i \in S(t)$.
 - 6.2. Количество консультантов, задействованных на этапе s_i , задается равным 0:
 $k_i(t) = 0$.

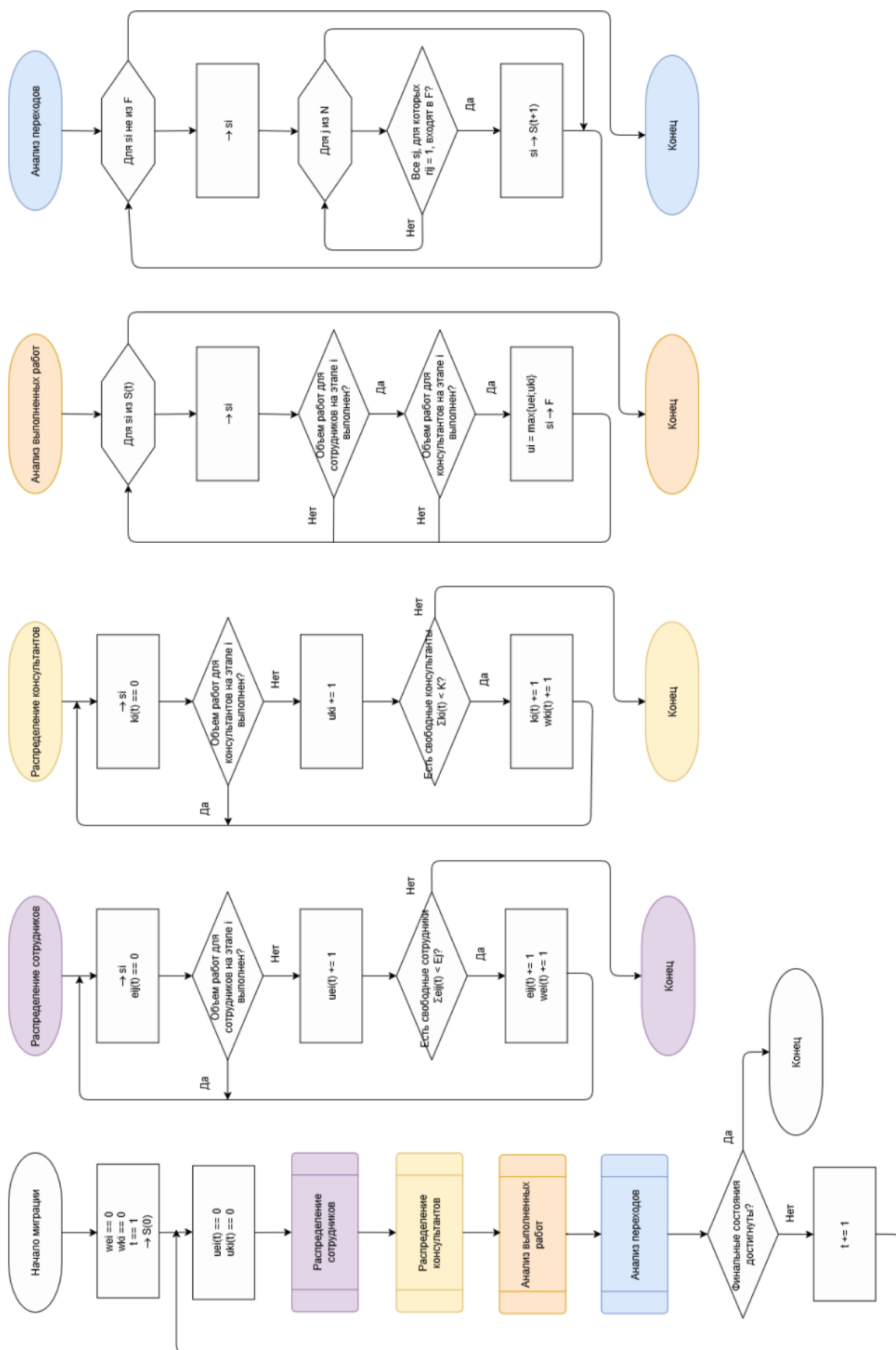


Рис. 3. Алгоритм инкрементной миграции данных
Fig. 3. The algorithm for incremental data migration

6.3. Проверяем, выполнен ли объем работ консультантов для данного состояния: $v_i^k \leq w_i^k(t)$. Если объем не выполнен, то увеличиваем время выполнения работ консультантами на данном этапе на единицу и переходим к 6.4, если выполнен, то возвращаемся к 6.1 и переходим к следующему состоянию.

6.4. Проверяем доступность консультантов нужного профиля: $\sum k_i(t) < K$. Если консультанты доступны, то: 1) увеличиваем загрузку консультантов на данном этапе на 1; 2) увеличиваем объем работ, выполненный консультантами на данном этапе, на 1.

Распределение заканчивается, когда не осталось свободных консультантов.

7. Происходит анализ выполненных работ в каждом состоянии $s_i \in S(t)$. Если запланированные работы выполнены как сотрудниками, так и консультантами, то находим итоговое время выполнения работ как максимум среди этих двух значений:

$$u_i = \max\{u_i^e(t); u_i^k(t)\}.$$

Также переводим такое состояние во множество завершенных F .

8. Для всех незавершенных состояний $s_i \notin S(t)$ просматриваем матрицу переходов и для $r_{ij} = 1$ проверяем, входит ли предшествующее состояние в множество завершенных $s_j \in F$. Если все предшествующие состояния завершены, добавляем s_i в множество $S(t + 1)$.

9. Проверяем, достигли ли мы финальных состояний: для $s_i \in S(t + 1)$ выполняется условие $r_{ji} = 0, j = \overline{1, N}$, то есть состояния не имеют потомков. Если условие не выполняется, увеличиваем модельное время на единицу и переходим к пункту 4.

Заключение

Миграция данных является стратегической необходимостью для организаций, стремящихся модернизировать свои цифровые экосистемы и сохранить конкурентное преимущество. Первостепенное значение для успешной миграции в проектах внедрения ERP-систем имеет обеспечение целостности данных, поскольку нарушение взаимосвязей между данными могут нарушить бизнес-операции и подорвать доверие клиентов. Еще одной проблемой является минимизация времени простоя, так как длительные сбои в системе могут нарушить бизнес-операции и привести к потере доходов.

Реализация поэтапной миграции может значительно снизить риски нарушения целостности и влияние на непрерывность бизнеса. Инкрементный подход позволяет проводить эффективный мониторинг достигнутого прогресса, затраченное время, ресурсы и усилия.

Разработанная в данной статье инкрементная модель миграции данных предлагает систематизированный подход к управлению этим сложным процессом, учитывая взаимосвязь между данными и бизнес-процессами.

Модель позволяет произвести более четкую и структурированную оценку ресурсов, необходимых для каждого этапа миграции, а также способствует более эффективному планированию и реализации проекта. Применение предложенной инкрементной стратегии не только минимизирует риски, но и обеспечивает более высокую степень надежности и целостности мигрируемых данных, что, в конечном счете, ведет к повышению операционной эффективности компании.

Таким образом, внедрение разработанной модели может стать важным инструментом для организаций, стремящихся оптимально организовать процессы миграции данных в рамках внедрения ERP-системы. Это, в свою очередь, создаст предпосылки для снижения затрат, повышения качества данных и улучшения взаимодействия между бизнес-процессами, что является необходимым условием для успешного функционирования в условиях современного бизнеса.

Список литературы

1. Chen I.J. Planning for ERP systems: Analysis and future trend // Business Process Management Journal. 2001. Vol. 7 (5). P. 374–386. DOI: 10.1108/14637150110406768
2. Логиновский О.В., Максимов А.А. Корпоративное управление: науч. изд. М.: Машиностроение-1, 2007. Т. 2. 624 с.
3. Sarmah S.S. Data Migration. *Science and Technology*. 2018. Vol. 8 (1). P. 1–10. DOI: 10.5923/j.scit.20180801.01

4. Kulkarni N., Bansal S. Defining Data Migration Strategies for Seamless ERP Transformation-Case Study // *Journal of Economics & Management Research*. 2023. Vol. 4 (3). P. 1–7. DOI: 10.47363/JESMR/2023(4)210
5. Gierszal O. Data Migration Strategy for a Legacy App: Step-by-Step Guide // Brainhub. 2024. URL: <https://brainhub.eu/library/data-migration-strategy-legacy-app> (дата обращения: 10.05.2025).
6. Miyamoto N., Higuchi K., Tsuji T. Incremental Data Migration for Multi-database Systems Based on MySQL with Spider Storage Engine // *IIAI 3rd International Conference on Advanced Applied Informatics*. 2014. P. 745–750.
7. Hussain Sh. Beyond Theory: Practical Approaches to Modern Data Migration Challenges. 2025. URL: <https://www.researchgate.net/> (дата обращения: 10.05.2025).
8. Khatri D. Data Migration Strategies in SAP S4 HANA: Key Insights // *International Journal of Novel Research and Development*. 2023. Vol. 8 (5).
9. Laxman V. The Science of Data Migration: Bridging Theory and Practice in Real-World Scenarios. 2025. URL: <https://www.researchgate.net/> (дата обращения: 10.05.2025).
10. Kunduru A.R. Data conversion strategies for ERP implementation projects // *Central Asian journal of mathematical theory and computer sciences*. 2023. Vol. 4 (9). P. 1–6.
11. Thalheim B., Wang Q. Data migration: A theoretical perspective // *Data & Knowledge Engineering*. 2013. Vol. 87. P. 260–278. DOI: 10.1016/j.datak.2012.12.003
12. Manjunath T.N., Hegadi R.S. Data Quality Assessment Model for Data Migration Business Enterprise // *International Journal of Engineering and Technology*. 2013. Vol. 5 (1). P. 101–109.
13. Alotaibi O.E., 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
14. Hanine M., Bendarag A., Boutkhoul 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, X. Zhao, Z. Wang et al. // 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 // *Informing Science & IT Education Conference (InSITE)*. 2015. P. 259–268. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2016.16
17. 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
18. 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.
19. Логиновский, О.В. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. (Научная мысль). DOI: 10.12737/1087996
20. Bahssas D.M., AlBar A.M., Hoque R. Enterprise Resource Planning (ERP) Systems: Design, Trends and Deployment // *The International Technology Management Review*. 2015. Vol. 5. P. 72–81. DOI: 10.2991/itmr.2015.5.2.2

References

1. Chen I.J. Planning for ERP systems: Analysis and future trend // *Business Process Management Journal*. 2001;7(5):374–386. DOI: 10.1108/14637150110406768
2. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Korporativnoye upravleniye: nauch. izd.* [Corporate Management: Sci. Publ.]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ.; 2007. Vol. 2. 624 p. (In Russ.)
3. Sarmah S.S. Data Migration. *Science and Technology*. 2018;8(1):1–10. DOI: 10.5923/j.scit.20180801.01
4. Kulkarni N., Bansal S. Defining Data Migration Strategies for Seamless ERP Trans-

- formation-Case Study. *Journal of Economics & Management Research*. 2023;4(3):1–7. DOI: 10.47363/JESMR/2023(4)210
5. Gierszal O. Data Migration Strategy for a Legacy App: Step-by-Step Guide. *Brainhub*. 2024. Available at: <https://brainhub.eu/library/data-migration-strategy-legacy-app> (accessed 10 May 2025).
6. Miyamoto N., Higuchi K., Tsuji T. Incremental Data Migration for Multi-database Systems Based on MySQL with Spider Storage Engine. In: *IIAI 3rd International Conference on Advanced Applied Informatics*. 2014. p. 745–750.
7. Hussain Sh. Beyond Theory: Practical Approaches to Modern Data Migration Challenges. 2025. Available at: <https://www.researchgate.net/> (accessed 10 May 2025).
8. Khatri D. Data Migration Strategies in SAP S4 HANA: Key Insights. *International Journal of Novel Research and Development*. 2023;8(5).
9. Laxman V. The Science of Data Migration: Bridging Theory and Practice in Real-World Scenarios. 2025. Available at: <https://www.researchgate.net/> (accessed 10 May 2025).
10. Kunduru A.R. Data conversion strategies for ERP implementation projects. *Central Asian journal of mathematical theory and computer sciences*. 2023;4(9):1–6.
11. Thalheim B., Wang Q. Data migration: A theoretical perspective. *Data & Knowledge Engineering*. 2013;87:260–278. DOI: 10.1016/j.datak.2012.12.003
12. Manjunath T.N., Hegadi R.S. Data Quality Assessment Model for Data Migration Business Enterprise. *International Journal of Engineering and Technology*. 2013;5(1):101–109.
13. Alotaibi O.E., Pardede E. Transformation of Schema from Relational Database (RDB) to NoSQL Databases. *Data. MDPI*. 2019;4(4):148–159. DOI: 10.3390/data4040148
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., Zhao X., Wang Z., Gong D., Ding G. Model Transformation and Data Migration from Relational Database to MongoDB. In: *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: *Informing Science & IT Education Conference (InSITE)*. 2015. P. 259–268. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2016.16
17. 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
18. 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: monogr.* [Industrial Enterprise Management: Strategies, Mechanisms, Systems. Monograph]. Moscow: Infra-M Publ.; 2018. 410 p. (In Russ.)
19. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ.; 2020. 456 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
20. Bahssas D.M., AlBar A.M., Hoque R. Enterprise Resource Planning (ERP) Systems: Design, Trends and Deployment. *The International Technology Management Review*. 2015;5:72–81. DOI: 10.2991/itmtr.2015.5.2.2

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; loginovskii@yus.ru.

Голубева Ольга Леонидовна, старший преподаватель кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; golubeva.ol@mail.ru.

Information about the authors

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

Olga L. Golubeva, Senior Lecturer 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.

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 12.05.2025

The article was submitted 12.05.2025

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ИТ-ПРОЕКТАХ

С.А. Баркалов, bsa610@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

А.В. Белоусов, alexbelousov19@yandex.ru

Е.О. Пужанова, pujanova@icloud.com

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В данной работе рассматриваются основные подходы к управлению проектами ИТ-профиля в оперативном режиме, особенно при внесении корректировок в состав проектов, который несомненно имеет свои специфические особенности. Главное отличие от этапа формирования программы управления проектами заключается в том, что исключение из нее может привести к дополнительным расходам, связанным с прекращением уже начатых работ, следовательно, возрастают риски невыполнения указанных проектов в установленные сроки. К таким расходам относятся, например, компенсации исполнителям, штрафы за расторжение контрактов и другие подобные убытки. Анализ задач оперативного управления программой и портфелем ИТ-проектов с учетом этих дополнительных расходов представлен во многих работах. Однако для решения подобных задач не всегда возможно применение какого-либо единственного метода, что ставит задачу разработки комплексного подхода к оценкам рисков ИТ-проектов для выбора наименее рискованного, что требует исследований в области механизмов комплексного оценивания. **Цель исследования** заключается в формировании экспертной системы поддержки принятия решений при оценке рисков ИТ-проектов с учетом противоречий знаний экспертов и формировании компромисса в задачах комплексного оценивания и парных сравнений. **Методы исследования.** Для решения задачи оперативного планирования ИТ-проектами с учетом рисков применяются: метод сетевого программирования и метод, основанный на таблице допустимых решений. При оценке рисков формируется квалитетическая шкала, формирующая три группы: низких рисков, средних рисков и высоких рисков. При этом каждой группе рисков присваивается своя система баллов, что позволяет экспертам формировать достаточно уверенные оценки. **Результаты.** Предложенный эффективный алгоритм получения экспертных оценок позволил упростить процедуру построения таблиц допустимых решений. Если размер таблицы (число рассматриваемых решений) превышает заданное ограничение, производится «сжатие» таблицы до требуемого размера путем «склеивания» решений. Склеивание решений происходит таким образом, что ни одно допустимое решение не теряется (однако могут появиться недопустимые решения). В результате получаем верхнюю оценку для исходной задачи оценки рисков ИТ-проектов. Таким образом, благодаря использованию методов сетевого программирования можно исключить вероятность получения некорректных оценок и несогласованных мнений экспертов при отборе ИТ-проектов в общий портфель компании разработчика. **Заключение.** Для того чтобы получить от экспертов исчерпывающие и непротиворечивые результаты, которые будут основаны на простых и понятных действиях, необходимо применить предложенный подход к решению комплексного оценивания рисков ИТ-проектов. Первый способ учета рисков (ограничение на финансирование проектов с высоким и средним рисками) является эффективным, если величина растет с ростом n полиномиально. Второй и третий способы в общем случае приводят к экспоненциальному росту сложности. Однако если число проектов с высоким и средним рисками ограничено сверху некоторым числом K (не зависящим от n), то оба эти способа являются эффективными.

Ключевые слова: алгоритм, парные сравнения, граф, сетевое программирование, таблица истинности

Для цитирования: Баркалов С.А., Белоусов А.В., Пужанова Е.О. Алгоритмы управления рисками в ИТ-проектах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 77–86. DOI: 10.14529/ctcr250307

CONTROL ALGORITHMS RISKS IN IT PROJECTS

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

A.V. Belousov, alexbelousov19@yandex.ru

E.O. Puzhanova, pujanova@icloud.com

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. In this work basic approaches to project management of IT of a profile in a foreground mode are considered, especially when entering adjustments into structure of projects which undoubtedly has the specific features. The main difference from a stage of forming of the program of project management is that the exception of it can lead to the additional expenses connected with the termination of already begun works, therefore, risks of failure to follow the specified projects increase at the scheduled time. Compensations to performers, penalties for cancellation of contracts and other similar losses belong to such expenses, for example. Task analysis of operational management of the program and a portfolio of IT of projects taking into account these additional expenses is presented in many works. However, for a solution of similar tasks application of any only method is not always possible that sets a task of development of an integrated approach to risk assessment of IT of projects for the choice of the least risky that demands researches in the field of mechanisms of complex estimation. The research objective consists in forming of expert system of support of decision-making at risk assessment of IT of projects taking into account contradictions of knowledge of experts and forming of a compromise in problems of complex estimation and paired comparisons. **Research methods.** Are applied by projects taking into account risks to a solution of a problem of operational planning of IT: the method of network programming and a method based on the table of admissible solutions. At risk assessment the qualimetric scale creating three groups forms: low risks, average risks and high risks. At the same time the system of points is appropriated to each group of risks that allows experts to create rather sure estimates. **Results.** The offered effective algorithm of receiving expert estimates allowed to simplify the procedure of creation of tables of admissible solutions. If the table size (number of the considered solutions) exceeds the set restriction, “compression” of the table to the required size by “pasting” of solutions is made. Pasting of solutions happens in such a way that any admissible solution is not lost (however, inadmissible solutions can appear). As a result we receive upper assessment for an initial problem of risk assessment of IT of projects. Thus, thanks to it is applicable methods of network programming it is possible to exclude the probability of receiving incorrect estimates and uncoordinated opinions of experts at selection of IT of projects in total portfolio of the company of the developer. **Conclusion.** To receive from experts exhaustive and not contradictory results which will be based on simple and clear actions it is necessary to apply the offered approach to a solution of complex estimation of risks of IT of projects. The first way of accounting of risks (restriction for financing of projects with high and average risks) is effective if value grows with growth of n is polynomial. The second and third ways generally lead to the exponential growth of complexity. However, if the number of projects with high and average risks is limited on top to some number K (which is not depending from n), then both of these ways are effective.

Keywords: algorithm, paired comparisons, graph, network programming, truth diagram

For citation: Barkalov S.A., Belousov A.V., Puzhanova E.O. Control algorithms risks in IT projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):77–86. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250307

Введение

Управление программой в оперативном режиме, особенно при внесении корректировок в состав ИТ-проектов, имеет свои специфические особенности. Главное отличие от этапа формирования программы заключается в том, что исключение проектов из нее может привести к дополнительным расходам, связанным с прекращением уже начатых работ. К таким расходам относятся, например, компенсации исполнителям, штрафы за расторжение контрактов и другие подобные убытки.

Анализ задач оперативного управления программой и портфелем проектов с учетом этих дополнительных расходов представлен в работах [1, 2].

В данной работе исследуется актуальная проблема оперативного планирования программ, учитывающего риски. Для ее решения авторы предлагают два подхода [3, 4]: метод сетевого программирования и метод, основанный на таблице допустимых решений.

Постановка задачи

Представим задачу, где необходимо интегрировать в существующую программу, состоящую из n проектов, новые идеи. Для этого доступно p новых проектов, которые претендуют на место в программе [5].

Пусть эффективность i -го проекта будет обозначена как a_i , а затраты на его реализацию – как c_i , если проект новый, и как d_i , если он уже входит в программу. Дополнительные затраты, связанные с исключением i -го проекта из программы, также будут обозначены b_i . Будем считать, что проект i входит в программу, если $x_i = 1$, и не входит, если $x_i = 0$. Проекты в программе будут нумерованы $i = \overline{1, n}$, $i = \overline{n+1, m}$, где $m = n + p$ – новые проекты. Вначале мы рассмотрим задачу, не учитывая риски [6].

Цель: найти оптимальное решение $x_i, i = \overline{1, m}$, которое обеспечит максимальный результат.

$$A(x) = \sum_i a_i x_i \quad (1)$$

в случае если

$$\sum_{i=1}^n d_i x_i + \sum_{i=n+1}^m c_i x_i + \sum_{i=1}^n b_i (1 - x_i) \leq P.$$

В данном контексте P обозначает размер финансовой поддержки, выделяемой программе.

Рассмотрим обозначение $c_i = d_i - b_i, i = \overline{1, n}$. Простейшие вычисления приведут к следующему виду ограничения:

$$\sum_{i=1}^m c_i x_i \leq P - \sum_{i=1}^n b_i = R. \quad (2)$$

Проанализируем подходы к идентификации и управлению рисками, присущими проектам программы [6, 7].

Определение уровня риска будет осуществляться с использованием качественных шкал влияния [8]:

- 1 балл будет соответствовать низкому риску (малозначительное влияние);
- 2 балла – среднему риску (умеренное влияние);
- 3 балла – высокому риску (значительное влияние).

Для минимизации рисков можно прибегнуть к ограничению финансовой поддержки проектов, классифицируемых как средне- и высокорисковые.

Пусть Q_n будет обозначено как множество проектов, характеризующихся низким уровнем риска, Q_c – как множество проектов со средним уровнем риска, а Q_b – как множество проектов с высоким уровнем риска.

В качестве соответствующих ограничений установлены [9]:

$$\sum_{i \in Q_c} c_i x_i \leq R_c; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in Q_b} c_i x_i \leq R_b. \quad (4)$$

Финансирование проектов, сопряженных со средним и высоким уровнем риска, подлежит особым ограничениям R_c, R_b .

Одним из подходов к управлению рисками является снижение количества проектов, классифицируемых как высоко- и среднерисковые.

Реализации этого подхода соответствуют определенные ограничения:

$$\sum_{i \in Q_c} x_i \leq N_c; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in Q_b} x_i \leq N_b. \quad (6)$$

Ограничения на количество проектов N_c, N_b установлены в зависимости от их уровня риска: для проектов со средним риском и для проектов с высоким риском [10].

Чтобы найти решение для задач (1)–(4), мы воспользуемся методом сетевого программирования.

Рассмотрим алгоритмическую последовательность решения указанных задач [10].

В рамках первого этапа три параметрические задачи будут разрабатываться и решаться по отдельности, с фокусом на сценариях с низким, средним и высоким уровнями риска [11, 12].

Шаг 1. Состоит в следующем: определить $x_i, i \in Q_n$, повышающие, оптимизирующие:

$$\sum_{i \in Q_n} a_i x_i \quad (7)$$

в случае установления ограничений

$$\sum_{i \in Q_n} c_i x_i \leq Y_n. \quad (8)$$

В данном контексте рассматривается параметр Y_n , значение которого устанавливается в диапазоне $0 \leq Y_n \leq R_n$.

Решение классической задачи: $R_n = \min \left(R; \sum_{i \in Q_n} c_i \right)$, где параметры $c_i, i \in Q_n$ являются целыми

числами, эффективно осуществляется с помощью динамического или дихотомического программирования. Достаточно найти оптимальное решение для одного конкретного набора параметров $Y_n = R_n$, так как это позволит получить оптимальные решения для всех остальных $Y_n \leq R_n$. Обозначим $A_n(Y_n)$ величину (7), которая принимает наилучшее значение в оптимальном решении задачи [13], при заданном значении параметра Y_n .

Шаг 2. Необходимо рассчитать $x_i, i \in Q_c$ – повышающие, оптимизирующие:

$$\sum_{i \in Q_c} a_i x_i \quad (9)$$

в случае установления ограничений

$$\sum_{i \in Q_c} c_i x_i \leq Y_c. \quad (10)$$

Рассмотрим значение $0 \leq Y_c \leq R_c$, которое достигает своего наилучшего результата $A_c(Y_c)$ при решении задачи при различных значениях параметра Y_c .

Шаг 3. Необходимо рассчитать $x_i, i \in Q_b$ – повышающие:

$$\sum_{i \in Q_b} a_i x_i \quad (11)$$

в случае установления ограничений

$$\sum_{i \in Q_b} c_i x_i \leq Y_b. \quad (12)$$

Рассмотрим зависимость значения $A_b(Y_b)$ (11), являющегося оптимальным для данной задачи $0 \leq Y_b \leq R_b$, от изменения параметра Y_b .

Шаг 4. Заключается в решении задачи, направленной на поиск оптимального решения Y_n, Y_c, Y_b , которое обеспечивает максимальный результат [14]:

$$A_n(Y_n) + A_c(Y_c) + A_b(Y_b) \quad (13)$$

в условиях ограничений

$$0 \leq Y_n \leq R_n; 0 \leq Y_c \leq R_c; 0 \leq Y_b \leq R_b; Y_n + Y_c + Y_b \leq R. \quad (14)$$

Оптимальный результат, найденный с помощью метода обратного хода для задач (13) и (14), позволяет сформировать список проектов, вошедших в программу, а также список проектов, которые не были включены.

Для пояснения работы алгоритма рассмотрим пример. Представлена группа из семи ИТ-проектов, среди которых два являются новыми.

Подробная информация о проектах представлена в табл. 1.

Таблица 1
 Подробная информация о ИТ-проектах
 Table 1
 Detailed information on IT projects

i	1	2	3	4	5	6	7
a_i	6	9	10	12	14	15	18
d_i	7	8	6	10	7		
b_i	5	4	3	6	3		
c_i	2	4	3	4	5	3	7
r_i	1	1	1	2	2	3	3

Уровень рисков распределен следующим образом: проекты 1, 2 и 3 относятся к категории с наименьшей вероятностью негативных исходов [15], проекты 4 и 5 характеризуются средним уровнем риска, в то время как проекты 6 и 7 имеют высокий потенциал рисков.

Установим $R = 15$, $R_c = 7$, $R_b = 9$.

Первый этап

1. Начнем с задачи номер один: добиться максимального результата:

$$6x_1 + 9x_2 + 10x_3$$

в случае установления ограничений

$$2x_1 + 4x_2 + 3x_3 \leq 9.$$

Данные о зависимости $A_n(Y_n)$, $0 \leq (Y_n) \leq 9$ представлены в табл. 2.

Таблица 2
 Данные о зависимости $A_n(Y_n)$, $0 \leq (Y_n) \leq 9$
 Table 2
 Data on dependence of $A_n(Y_n)$, $0 \leq (Y_n) \leq 9$

Вариант	0	1	2	3	4	5
A_n	0	6	10	16	19	25
Y_n	0	2	3	5	7	9

2. Теперь мы сосредоточимся на решении задачи номер два: достижение максимального результата [12]:

$$12x_4 + 14x_5$$

в случае установления ограничений

$$4x_4 + 4x_5 \leq 7.$$

В табл. 3 представлена информация о зависимости.

Таблица 3
 Данные о зависимости $12x_4 + 14x_5$
 Table 3
 Data on dependence $12x_4 + 14x_5$

Вариант	0	1	2
A_c	0	12	14
Y_c	0	4	5

3. Теперь мы переходим к решению задачи номер три: поиск максимального значения [12]:

$$15x_6 + 18x_7$$

в случае установления ограничений

$$3x_6 + 7x_7 \leq 9.$$

В табл. 4 представлена информация о зависимости $A_B(Y_B)$, $0 \leq Y_B \leq 7$.

Таблица 4

Информация о зависимости $A_B(Y_B)$, $0 \leq Y_B \leq 7$

Table 4

Data on dependence $A_B(Y_B)$, $0 \leq Y_B \leq 7$

Вариант	0	1	2
A_B	0	15	18
Y_B	0	3	4

Для задач (13) и (14) мы воспользуемся методом дихотомического подхода к программированию [5, 7, 9].

На первом этапе мы анализируем взаимосвязи $A_C(Y_C)$ и $A_B(Y_B)$ – ставим перед собой задачу достижения максимального результата [12]:

$$A_C(Y_C) + A_B(Y_B)$$

в случае установления ограничения

$$Y_C + Y_B \leq Y_{CB}.$$

Параметр Y_{CB} находится в пределах: $Y_C \leq 7, Y_B \leq 9$.

Результат представлен в табл. 5.

Таблица 5

Результаты

Table 5

Results

2	18; 7	30; 11	32; 12
1	15; 3	27; 7	29; 8
0	0	12; 4	14; 5
Y_B Y_C	0	0	0

Полученные параметры сведены в табл. 6.

Таблица 6

Рассчитанные риски проектов

Table 6

The calculated risks of projects

Вариант	0	1	2	3	4	5
A_{CB}	0	15	27	29	30	32
Y_{CB}	0	3	7	8	11	12

Коэффициент A_{CB} , определяющий значение оптимального решения, зависит от Y_{CB} .

Второй этап работы заключается в анализе зависимостей $A_H(Y_H)$ и агрегированных зависимостей $A_{CB}(Y_{CB})$.

В рамках этого этапа мы ставим перед собой задачу оптимизации:

$$A_H(Y_H) + A_{CB}(Y_{CB})$$

в условиях ограничения

$$Y_H + Y_{CB} \leq 15.$$

Результат представлен в табл. 7.

Таблица 7
Суммарная оценка рисков проектов
Table 7
Total score of risks of projects

5	32; 12	38; 14	42; 15	–	–	–
4	30; 11	36; 13	40; 14	–	–	–
3	29; 8	35; 10	39; 11	45; 13	48; 15	–
2	27; 7	33; 9	37; 10	43; 12	46; 14	–
1	15; 3	21; 5	25; 6	31; 8	34; 10	40; 12
0	0	6; 2	10; 3	16; 5	19; 7	25; 9
$\begin{matrix} Y_{св} \\ Y_{н} \end{matrix}$	0	1	2	3	4	5

Наилучший результат обнаруживается в ячейке с координатами (48; 15).

Для его достижения используется метод обратного прослеживания.

Ячейка (48;15) ассоциируется с вариантом 4 табл. 2 и вариантом 3 табл. 6.

Вариант 4 табл. 2 предполагает реализацию проектов 2 и 3, тогда как вариант 3 табл. 6 подразумевает включение в программу проекта 5 с умеренной степенью риска и проекта, характеризующегося высоким уровнем риска, как указано в варианте 2 табл. 3 и варианте 1 табл. 4.

В результате финальной редакции в программу вошли проекты с номерами 2, 3 и 5, а проекты 1 и 4 были отменены, при этом добавлен новый проект под номером 6.

Другой подход к управлению рисками заключается в установлении ограничения на суммарный уровень влияния проектов, классифицируемых как средне- и высокорисковые.

Данное ограничение формулируется в виде

$$\sum_{i \in Q_c} 2x_i + \sum_{i \in Q_b} 3x_i \leq S. \quad (15)$$

Лимит S устанавливается для контроля общей величины влияния проектов, классифицированных как высокорисковые и среднерисковые.

Чтобы решить поставленную задачу, мы воспользуемся двухступенчатым алгоритмом, который будет основан на ранее рассмотренном подходе к ограничению финансирования проектов с высоким и средним уровнем риска.

Пояснение работы алгоритма

Шаг I – это фокусировка на решении задачи, заключающейся в поиске максимального значения:

$$\sum_{i \in Q_c} a_i x_i + \sum_{i \in Q_b} a_i x_i \leq S \quad (16)$$

с учетом ограничений (15):

$$\sum_{i \in Q_c} c_i x_i + \leq Y \quad (17)$$

$$\text{при } 0 \leq Y \leq \min \left(R; \sum_{i \in Q_c} c_i + \sum_{i \in Q_b} c_i \right).$$

Пусть значение $A(Y)$, соответствующее оптимальному решению задачи, будет обозначено как (16).

Стремление к оптимальному результату:

$$\sum_{i \in Q_n} a_i x_i \quad (18)$$

в случае установления ограничения

$$\sum_{i \in Q_n} c_i x_i \leq Y_n \quad (19)$$

при $0 \leq Y_n \leq R$.

Определим наилучший $A_n(Y_n)$ вариант для решения поставленной задачи.

Для решения задачи 1 мы прибегнем к табличному методу поиска допустимых решений, а для задачи 2 – к методу дихотомического программирования.

Шаг II сосредоточен на решении задачи, заключающейся в поиске максимального значения:

$$A(Y) + A_n(Y_n) \quad (20)$$

в случае установления ограничения

$$Y + Y_n \leq R. \quad (21)$$

Выводы

Предложенный эффективный алгоритм получения экспертных оценок позволил упростить процедуру построения таблиц допустимых решений. Если размер таблицы (число рассматриваемых решений) превышает заданное ограничение, производится «сжатие» таблицы до требуемого размера путем «склеивания» решений. Склеивание решений происходит таким образом, что ни одно допустимое решение не теряется (однако могут появиться недопустимые решения). В результате получаем верхнюю оценку для исходной задачи оценки рисков ИТ-проектов. Таким образом, благодаря использованию методов сетевого программирования можно исключить вероятность получения некорректных оценок и несогласованных мнений экспертов при отборе ИТ-проектов в общий портфель компании разработчика.

Для того чтобы получить от экспертов исчерпывающие и непротиворечивые результаты, которые будут основаны на простых и понятных действиях, необходимо применить предложенный подход к решению комплексного оценивания рисков ИТ-проектов. Первый способ учета рисков (ограничение на финансирование проектов с высоким и средним рисками) является эффективным, если величина растет с ростом n полиномиально. Второй и третий способы в общем случае приводят к экспоненциальному росту сложности. Однако если число проектов с высоким и средним рисками ограничено сверху некоторым числом K (не зависящим от n), то оба эти способа являются эффективными.

Список литературы

1. Россихина Л.В. Задачи и методы оперативного управления программой // Экономика и менеджмент систем управления. 2015, № 1.2 (15). С. 260–266.
2. Аверина Т.А., Половинкина А.И., Шумарин В.В. Управление рисками в условиях инновационного развития организации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 5. С. 87–89.
3. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Порядина В.Л. Механизмы активной экспертизы в задачах комплексного оценивания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 6. С. 64–66.
4. Белоусов В.Е., Баркалов С.А., Нижегородов К.А. Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий // Материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2019. Т. 1. С. 98–101.
5. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 2004. 341 с.
6. Галинская А.А. Модульные нейронные сети: обзор современного состояния разработок // Математические машины и системы. 2003. № 3-4. С. 87–102.
7. Логиновский, О.В. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10/12737/1087996
8. Вапник В.Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 295 с.
9. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
10. Белоусов В.Е., Абросимов И.П., Губина О.В. Алгоритм идентификации состояний многоуровневой технической системы с использованием расплывчатых категорий модели представления знаний // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 3. С. 124–129.

11. Белоусов В.Е., Нижегородов К.И., Соха И.С. Алгоритмы получения упорядоченных правил предпочтения в задачах принятия решений при планировании производственных программ // Управление строительством. 2019. № 1 (14). С. 105–110.
12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine // The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.
13. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. М.: Финансы и статистика, 2001. С. 203–211.
14. Губко М.В., Караваев А.П. Согласование интересов в матричных структурах управления // Автоматика и телемеханика. 2001. № 10. С. 132–146.
15. Hart O., Holmstrom B. The Theory of Contracts // Advances in Economic Theory – 5th World Congress. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. P. 71–155.

References

1. Rossikhina L.V. [Tasks and methods of operational management of the program]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2015;1.2(15):260–266. (In Russ.)
2. Averina T.A., Polovinkina A.I., Shymarin V.V. Management of risks in the conditions of innovative development of organization. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2009;5(5):87–89. (In Russ.)
3. Barkalov S.A., Burkov V.N., Porjadina V.L. Mechanisms of active examination in problems complex estimation. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2009;5(6):64–66. (In Russ.)
4. Belousov V.E., Barkalov S.A., Nizhegorodov K.A. [Resource timing analysis in problems of scheduling of the construction enterprises]. In: *Materials of the XVI All-Russian school conference of young scientists "Management of big systems"*. Tambov: Tambov State Technical University Publ. 2019. Vol. 1. P. 98–101. (In Russ.)
5. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 341 p. (In Russ.)
6. Galinskaya A.A. [Modular neural networks: review of the current state of developments]. *Mathematical machines and systems*. 2003;(3-4):87–102. (In Russ.)
7. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ., 2020. 456 p. (In Russ.) ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10.12737/1087996
8. Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimosti po empiricheskim dannym* [Recovery of dependence according to empirical data]. Moscow: Nauka, 1979. 295 p. (In Russ.)
9. Cormen T., Leiserson Ch., Rivest R., Stein C. *Introduction to Algorithms*. Transl. from Engl. 2nd ed. Moscow: Williams, 2005. 1296 p. (In Russ.)
10. Belousov V.E., Abrosimov I.P., Gubina O.V. [An algorithm of identification of conditions of a multilevel technical system with use of indistinct categories of model of representation of knowledge]. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Systems analysis and information technologies*. 2017;(3):124–129. (In Russ.)
11. Belousov V.E., Nizhegorodov K.I., Soha I.S. Algorithms of obtaining the ordered rules of preference in problems of decision-making when planning production programs. *Upravleniye stroitel'stvom*. 2019;1(14):105–110. (In Russ.)
12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine. In: *The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.
13. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye: uchebnik* [Analysis of time series and forecasting. Textbook]. Moscow: Finansy i statistika, 2001. P. 203–211. (In Russ.)
14. Gubko M.V., Karavaev A.P. Interest reconciliation in matrix control structures. *Automation and Remote Control*. 2001;62(10):1658–1672. DOI: 10.1023/A:1012414500272
15. Hart O., Holmstrom B. The Theory of Contracts. In: *Advances in Economic Theory – 5th World Congress*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. P. 71–155.

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Белоусов Алексей Вадимович, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; alexbelousov19@yandex.ru.

Пужанова Екатерина Олеговна, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; pujanova@icloud.com.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Alexey V. Belousov, Postgraduate student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; alexbelousov19@yandex.ru.

Ekaterina O. Puzhanova, Postgraduate student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; pujanova@icloud.com.

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 10.02.2025

The article was submitted 10.02.2025

СИНТЕЗ ЦЕНТРОВ КОМПЕТЕНЦИЙ МЧС РОССИИ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А.А. Козлов¹, dkac77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0582-4688>
М.В. Шевцов², shevtsovmv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5537-2392>
А.Н. Денисов², dan_aleks@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2594-9389>

¹ Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России, Москва, Россия

² Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы формирования более эффективной структуры Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий при осуществлении планирования и реализации мер по обеспечению пожарной безопасности на объектах экономики посредством создания наукоемких организационных структур, способных соответствовать интересам государства, специалистов предметной области и бизнес-сообществ в выборе высокопрофессиональных альтернатив предлагаемых на рынке работ и услуг. **Цель.** Основной целью работы является построение механизма, способствующего решению поставленных перед контрольно-надзорными органами чрезвычайного ведомства задач по снижению потенциальных угроз и ущерба от возможных пожаров на объектах различного назначения. Для разработки указанного механизма авторами предлагается рассмотрение возможности синтеза специализированной структуры в органах управления и территориальных подразделениях федерального государственного пожарного надзора – центров компетенций МЧС России в области обеспечения пожарной безопасности. **Методы.** В исследовании представлен системный подход при реализации принципов организационного проектирования структурных подразделений территориальных органов МЧС России, позволяющий создать новые качественные механизмы обеспечения пожарной безопасности объектов капитального строительства с учетом предоставления комплекса вариативных решений правообладателям указанных объектов на принципах клиентоориентированности и системности. **Результаты.** Проведен анализ необходимости внедрения центров компетенций МЧС России, перечень стоящих перед ними задач и основные функции предлагаемых структур. Также представлено математическое описание, упрощенный алгоритм взаимодействия элементов системы поддержки принятия решений в вопросах обеспечения пожарной безопасности с использованием центров компетенций и архитектура предлагаемого информационного программного продукта. Авторами предложен подход к улучшению процесса формирования организационного построения указанных подразделений посредством модернизации инструментов управления для обеспечения пожарной безопасности, а также проектного управления посредством формирования центров компетенций МЧС России в сфере противопожарной защиты хозяйствующих субъектов. **Заключение.** Синтез центров компетенций МЧС России в области обеспечения пожарной безопасности может стать важным шагом на пути к формированию более эффективной системы обеспечения пожарной безопасности в конкретных регионах и в целом в Российской Федерации.

Ключевые слова: центр компетенций, управление, взаимодействие, МЧС России, федеральный государственный пожарный надзор, пожарная безопасность, клиентоцентричность, алгоритм, информационный программный продукт

Для цитирования: Козлов А.А., Шевцов М.В., Денисов А.Н. Синтез центров компетенций МЧС России в области обеспечения пожарной безопасности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 87–98. DOI: 10.14529/ctcr250308

Original article
DOI: 10.14529/ctcr250308

SYNTHESIS OF COMPETENCE CENTERS OF THE RUSSIAN FEDERATION EMERCOM IN THE FIELD OF FIRE SAFETY

A.A. Kozlov¹, dkac77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0582-4688>
M.V. Shevtsov², shevtsovmv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5537-2392>
A.N. Denisov², dan_aleks@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2594-9389>

¹ Department of Supervision and Preventive Work of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

² Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

Abstract. The article considers the issues of forming a more effective structure of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters in planning and implementing measures to ensure fire safety at economic facilities by creating knowledge-intensive organizational structures capable of meeting the interests of the state, specialists in the subject area and business communities in choosing highly professional alternatives to the works and services offered on the market. **Objective.** The main objective of the work is to build a mechanism that facilitates the solution of the tasks set before the control and supervisory bodies of the emergency department to reduce potential threats and damage from possible fires at facilities for various purposes. To develop this mechanism, the authors propose to consider the possibility of synthesizing a specialized structure in the governing bodies and territorial divisions of the federal state fire supervision – competence centers of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the field of ensuring fire safety. **Methods.** The study presents a systematic approach to the implementation of the principles of organizational design of structural divisions of territorial bodies of the Ministry of Emergency Situations of Russia, which allows creating new high-quality mechanisms for ensuring fire safety of capital construction projects, taking into account the provision of a set of variable solutions to the copyright holders of these objects on the principles of customer focus and consistency. **Results.** The analysis of the need to implement competence centers of the Ministry of Emergency Situations of Russia, a list of tasks facing them and the main functions of the proposed structures is carried out. A mathematical description, a simplified algorithm for the interaction of elements of the decision-making support system in matters of ensuring fire safety using competence centers and the architecture of the proposed information software product are also presented. The authors propose an approach to improving the process of forming the organizational structure of these divisions by modernizing management tools for ensuring fire safety, as well as project management by forming competence centers of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the field of fire protection of economic entities. **Conclusion.** The synthesis of competence centers of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the field of ensuring fire safety can be an important step towards forming a more effective system of ensuring fire safety in specific regions and in the Russian Federation as a whole.

Keywords: competence center, management, interaction, Ministry of Emergency Situations of Russia, federal state fire supervision, fire safety, client-centricity, algorithm, information software product

For citation: Kozlov A.A., Shevtsov M.V., Denisov A.N. Synthesis of competence centers of the Russian Federation EMERCOM in the field of fire safety. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):87–98. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250308

Введение

Современные инновационные процессы, протекающие в обществе, побуждают участников этих процессов задуматься над созданием наукоемких организационных структур, способных соответствовать интересам потребителей в выборе высокопрофессиональных альтернатив предлагаемых на рынке услуг. Указанные альтернативы должны быть нацелены на максимально эффективный и вместе с тем конкурентоспособный продукт, являющийся своего рода знаком качества в различных отраслях экономики, промышленности, бизнеса и безопасности жизнедеятельности.

Качество данного продукта напрямую зависит от наращивания новых знаний и мотивационной составляющей. Идеальным, на взгляд авторов, вариантом, сочетающим в себе интеллекту-

альный капитал, креативность и способность к саморазвитию, можно считать формирующиеся в разных областях человеческого труда центры компетенций. Их выгодная особенность заключается в классическом варианте построения оргструктур, междисциплинарном подходе в реализации поступающих задач и постоянном самообновлении поступающей и трансформирующейся информации.

Центры компетенций активно создаются в таких секторах, как энергетическая, космическая, образовательная и медицинская отрасли, машиностроение и инфокоммуникационные технологии. То есть именно там, где государственные интересы плотно пересекаются с предпринимательской средой [1].

Системная стабильность центров компетенций позволяет качественно и профессионально решать многие масштабные интеллектуальные задачи, а участие многопрофильных специалистов способствует их перманентному росту и объективному рассмотрению сложных нестандартных вопросов.

Приоритетные задачи, решаемые центрами компетенций, представлены на рис. 1.



Рис. 1. Основные задачи центров компетенций
Fig. 1. Main tasks of competence centers

В настоящее время у предпринимателя отсутствует возможность обратиться в какое-либо уполномоченное подразделение МЧС России, которое, в свою очередь, будет нести ответственность за предоставленную консультацию. Бизнес-сообществу это приносит большие убытки, так как оно предоставлено самому себе и вынуждено поддаваться маркетинговым уловкам некомпетентных специалистов [2].

Кроме того, сейчас на рынке в области пожарной безопасности работает большое количество различных организаций, в том числе государственных, которые одни и те же требования пожарной безопасности реализуют разными техническими способами без клиентоцентричного подхода. От качества их услуг зависят объемы капиталовложений в пожарную безопасность имеющегося объекта. Предприниматели вынуждены обращаться с одинаковыми запросами к разным исполнителям, которые оказывают услугу разными организационно-техническими решениями, чтобы затем выбирать оптимальный для себя вариант [3, 4].

Создание центров компетенций позволит реализовать для всех заинтересованных лиц компетентное государственное подразделение, в результате взаимодействия с которым заявитель на выходе получит конкретный документ, который будет согласован в том числе с заявителем [5].

Впоследствии предполагается контроль реализации решений, изложенных в полученном заявителем документе, обеспечить в рамках осуществления мероприятий федерального государственного пожарного надзора (ФГПН) [6, 7].

Создание центров компетенций (ЦК) – это не просто веяние времени, а насущная потребность, которая обусловлена целым рядом факторов.

Причины создания центров компетенций МЧС России в области обеспечения пожарной безопасности и последующий комплекс реализуемых перед ними задач [8] изложены в таблице, а взаимосвязи причин синтеза и приоритетов задач центров компетенций МЧС России – на рис. 2.

Перечень причин создания и основных задач, направленных на реализацию центров компетенций
List of reasons for the creation and main tasks aimed at the implementation of competence centers

№ п/п	Причины создания центров компетенций МЧС России	№ п/п	Основные задачи центров компетенций МЧС России
1	Накопленный опыт $O_{ЭФ}$ эффективного применения центров компетенций в различных областях	1	Применение основных научных открытий и идей в практических исследованиях и разработках для создания конкретных решений $P_{ПБ}$ в области обеспечения пожарной безопасности
2	Наличие в Российской Федерации специализированных образовательных и научных учреждений $У_{ОН}$, обладающих высоким потенциалом при подготовке высококвалифицированных специалистов, а также необходимой материально-технической базой	2	Установление партнерских отношений $П_{ОТ}$ между заказчиками, научными и образовательными учреждениями, производителями, эксплуатирующими организациями для постановки задач производителям пожарно-технического оборудования
3	Опыт реализации исследований $O_{РИ}$ в данном направлении	3	Внедрение новых перспективных технологий $T_{НП}$
4	Понимание $П_{ЗЦ}$ задач, для решения которых необходимо внедрение центров компетенций	4	Развитие института наставничества и преемственности $И_{НП}$
5	Развитие механизмов реализации требований пожарной безопасности $P_{МТ}$, в рамках которых технические требования сопрягаются с правоприменением	5	Формирование авторитета, доверия и признания экспертности среди граждан, организаций и бизнес-сообщества в целом $A_{ОБ}$
6	Вопросы обеспечения пожарной безопасности в современных условиях находятся на стыке различных научных и технологических областей $C_{НТ}$		

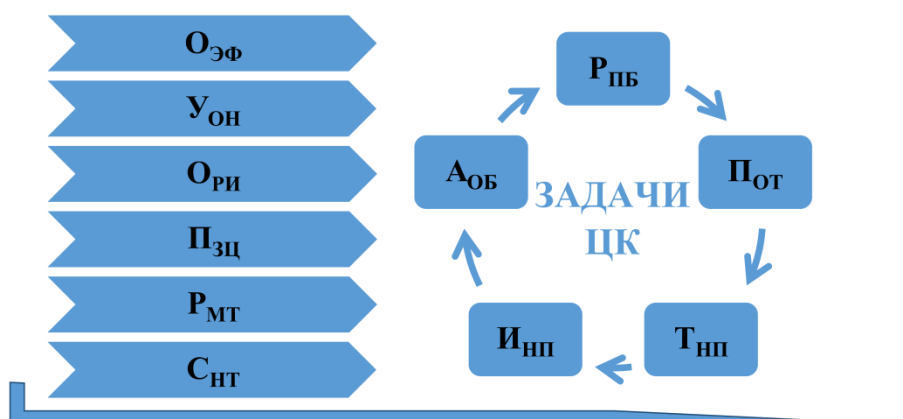


Рис. 2. Схема взаимосвязи причин синтеза и приоритетов задач центров компетенций МЧС России

Fig. 2. Scheme of the relationship between the reasons for the synthesis and priorities of the tasks of the competence centers of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Проведенный анализ существующих причин привел к пониманию необходимости более глубокого осмысления и оценки сложившейся ситуации, организации повышения экономической эффективности применения требований пожарной безопасности посредством развития системы их единообразного применения [9].

Данный подход реализован с помощью языка программирования PHP ввиду его совместимости со всеми основными операционными системами (Windows, MacOS, Linux), а также поддержки любой из существующих библиотек и систем управления базами данных. Кроме того, ключевая положительная особенность PHP – это работа с файлами, позволяющая осуществлять хранение данных посредством вызовов функций скриптов.

Средой разработки данного проекта авторами предложена моделирующая согласованная платформа IDE PHPStorm с умным корректором, обеспечивающим дополнение кода в автоматическом режиме с целью исключения потенциальных несоответствий в процессе сплетения других языков.

Материалы и методы

Центры компетенций должны стать специализированными подразделениями, обеспечивающими координацию применения наборов требований пожарной безопасности и их синтеза на конкретных объектах защиты федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления, учреждениями и организациями, а также гражданами при эксплуатации, управлении и распоряжении объектами экономики [10].

Основными функциями центров компетенций МЧС России должны стать:

- разработка и реализация программ и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности;
- организация и проведение обучения и повышения квалификации специалистов в области обеспечения пожарной безопасности;
- выработка единых подходов к применению требований пожарной безопасности;
- консультирование по применению требований пожарной безопасности;
- распределение запросов заинтересованных субъектов на соответствующие ЦК с учетом специализации;
- агитация и пропаганда культуры пожарной безопасности [11, 12].

На рис. 3 приведены основные функции центров компетенций МЧС России.

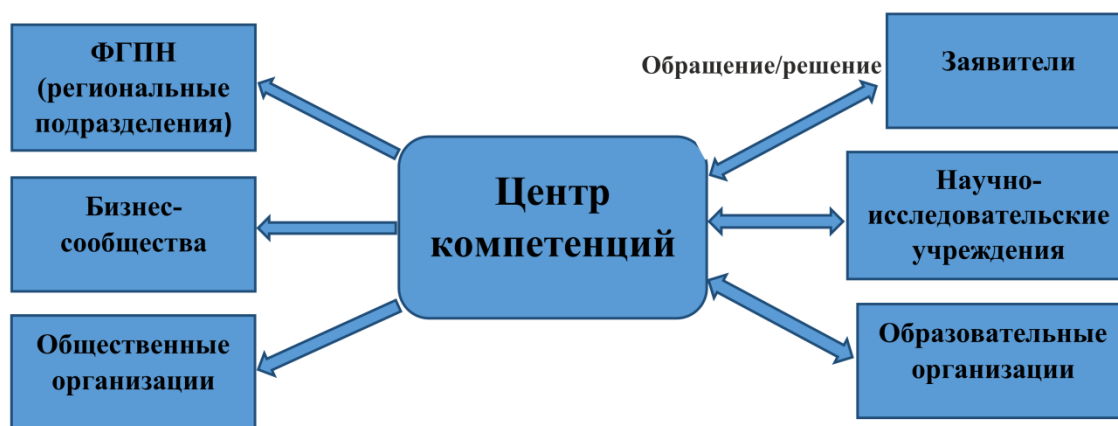


Рис. 3. Обобщенный набор функций центра компетенций МЧС России
Fig. 3. Generalized set of functions of the competence center
of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Указанные функции (см. рис. 3) могут быть реализованы, по мнению авторов, путем разработки системы поддержки процессов отбора корректных вариантов решений в рамках рассмотрения документации при обращении заявителя в центр компетенций для получения консультации по применению требований пожарной безопасности на основе информации, аккумулируемой в базах данных центра компетенций, которая создана посредством многократной реализации алгоритма модели, позволяющего формализовать процесс принятия решений при анализе и выборе объективного предложения по внедрению конкретных наборов организационно-технических решений в рамках концепции обеспечения пожарной безопасности объекта, принадлежащего хозяйствующему субъекту [13].

Создание центра компетенций предполагает модернизацию существующих инструментов управления обеспечением пожарной безопасности и внедрение новых технологий и подходов к решению задач в данной сфере.

Это может включать использование современных информационных технологий, автоматизированных систем мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций, а также разработку и реализацию проектов по созданию и развитию систем пожарной безопасности на предприятиях и в организациях различных форм собственности. При этом ключевыми остаются принципы профессионализации, междисциплинарности и инновационности решаемых задач, исходя из особенностей и специфики хозяйствующих субъектов и сфер экономики [14].

Безусловным критерием, лежащим в основе функционирования центров компетенций МЧС России, должен оставаться фактор общечеловеческой культуры безопасности, главенствующий над вопросами минимизации финансовых издержек принимаемых решений и интересов третьих лиц.

Математическую модель опишем следующей последовательностью скалярных величин:

$$M_{\text{отб}} = \langle C_{\text{прав}}, O^{\text{внеш}}, B_{\text{ДЦК}}, I^{\text{внут}} \rangle, \quad (1)$$

где $M_{\text{отб}}$ – модель отбора решений, предлагаемых центром компетенций;

$C_{\text{прав}}$ – взаимосвязанные субъекты правоотношений;

$O^{\text{внеш}}$ – поступающие внешние обращения (заявки);

$B_{\text{ДЦК}}$ – сформированная база данных центра компетенций;

$I^{\text{внут}}$ – комплекс инструментов (меры, методы, алгоритмы), предлагаемый заявителям на поступающий запрос, формирующийся на основании отклика на $O^{\text{внеш}}$ и содержащийся в базе данных прецедентов $B_{\text{ДЦК}}$.

Субъекты правоотношений [15] формализуем в виде совокупности значений согласно формуле

$$C_{\text{прав}} = \langle Z^{\text{внеш}}, P^{\text{ГПН}}, D^{\text{ЦК}}, \Xi^{\text{внеш}}, O_0, O_N \rangle, \quad (2)$$

где $Z^{\text{внеш}}$ – заявители;

$P^{\text{ГПН}}$ – работники (сотрудники) ФГПН;

$D^{\text{ЦК}}$ – должностное лицо центра компетенций;

$\Xi^{\text{внеш}}$ – бизнес-сообщества и эксперты, участвующие в подготовке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности на возмездной основе;

O_0 – образовательные организации;

O_N – научно-исследовательские учреждения.

Обращения (заявки) представляют собой потоки информации, трансформирующиеся в блок знаний (прецедентов) при их переработке специалистами центра компетенций совместно с научно-образовательным сообществом, в регламентированные по структуре, содержанию, финансовой целесообразности и научной обоснованности продукты, готовые к применению [16, 17].

Их представим в следующем виде:

$$O^{\text{внеш}} = \langle I^{\text{НД}}, G'_I, T^{\text{внеш}}_I, \Phi_{\text{оц}} \rangle, \quad (3)$$

где $I^{\text{НД}}$ – нормативные правовые акты обязательного применения и нормативные документы;

G'_I – множество готовых решений, при этом $G'_I \supset B_{\text{ДЦК}}$;

$T^{\text{внеш}}_I$ – требования нормативных правовых актов и нормативных документов, описанных в $I^{\text{НД}}$, при этом $G'_I \supseteq T^{\text{внеш}}_I$;

$\Phi_{\text{оц}}$ – формы оценки соответствия объектов защиты (продукции) требованиям пожарной безопасности.

В связи с тем, что многие наборы решений являются уникальными, с нестандартными характеристиками, целесообразно формулировать G'_I в виде вектора с множеством элементов, представленного формулой

$$G'_I = \{G^I_1, G^I_2, \dots, G^I_{n-1}, G^I_n\}, \quad (4)$$

где $G^I_i = \langle V^{\text{обяз}}, V^{\text{добр}}, V^{\text{расч}}, V^{\text{эксп}} \rangle$;

$V^{\text{обяз}}$ – вектор обязательных требований пожарной безопасности;

$V_{\text{добр}}$ – вектор положений добровольного применения;

$V_{\text{расч}}$ – вектор, отражающий численные методы моделирования или результаты исследований (испытаний);

$V_{\text{эксп}}$ – вектор, отражающий экспертный анализ возможности применения решения.

Следует отметить, что для готовых предлагаемых решений центра компетенций $\Gamma_i^{\text{И}}$ должно соблюдаться следующее условие:

$$V_{\text{эксп}} \gg V_{\text{расч}} \gg V_{\text{добр}} \gg V_{\text{обяз}}. \quad (5)$$

Данное неравенство подтверждает, что инструментарий подбора готового эффективного решения по обращениям сторонних заявителей $O^{\text{внеш}}$ предполагает извлечение достоверной, ценной и объективной информации из больших объемов данных в БД^{ЦК}, связанных в автоматизированном режиме с внешней средой.

Концептуально порядок взаимодействия центров компетенций и заинтересованных лиц с учетом клиентоцентрического подхода может быть представлен в следующей форме (рис. 4):

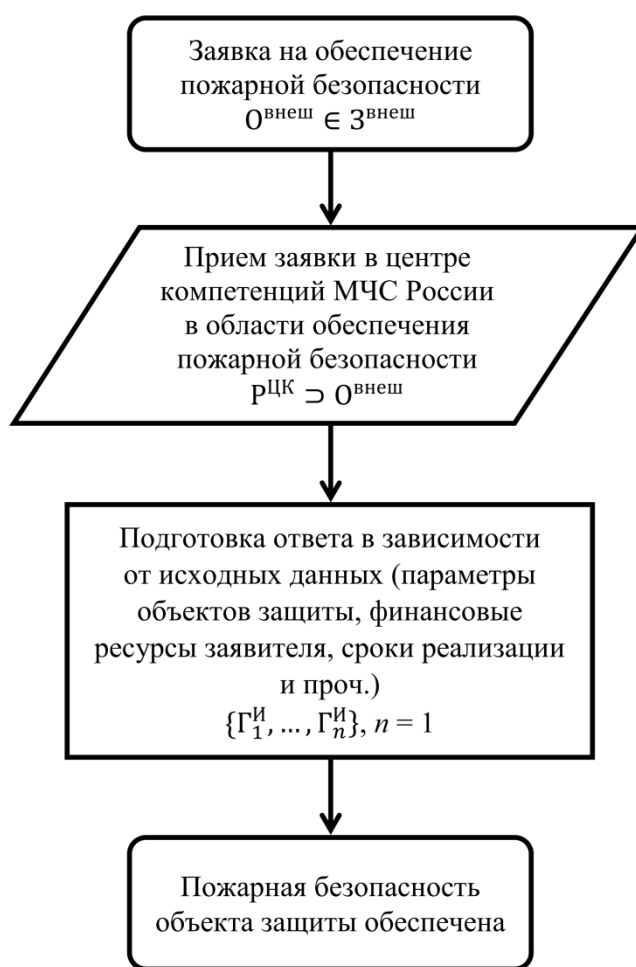


Рис. 4. Упрощенная блок-схема алгоритма взаимодействия заявителя по вопросам обеспечения пожарной безопасности с внедренной организационно-функциональной структурой (центром компетенций)

Fig. 4. Simplified flow chart of the algorithm for interaction between the applicant on issues of ensuring fire safety with the implemented organizational and functional structure (competence center)

Программная реализация указанного алгоритма (рис. 5) представляет собой продукт, выполненный с использованием объектно-ориентированного графического языка моделирования UML, предназначенного для визуальной работы с файлами различного формата. Эффективность данной системы заключается в высокой степени информационной безопасности (использование протокола HTTPS), а также удобной функциональности в процессе эксплуатации.

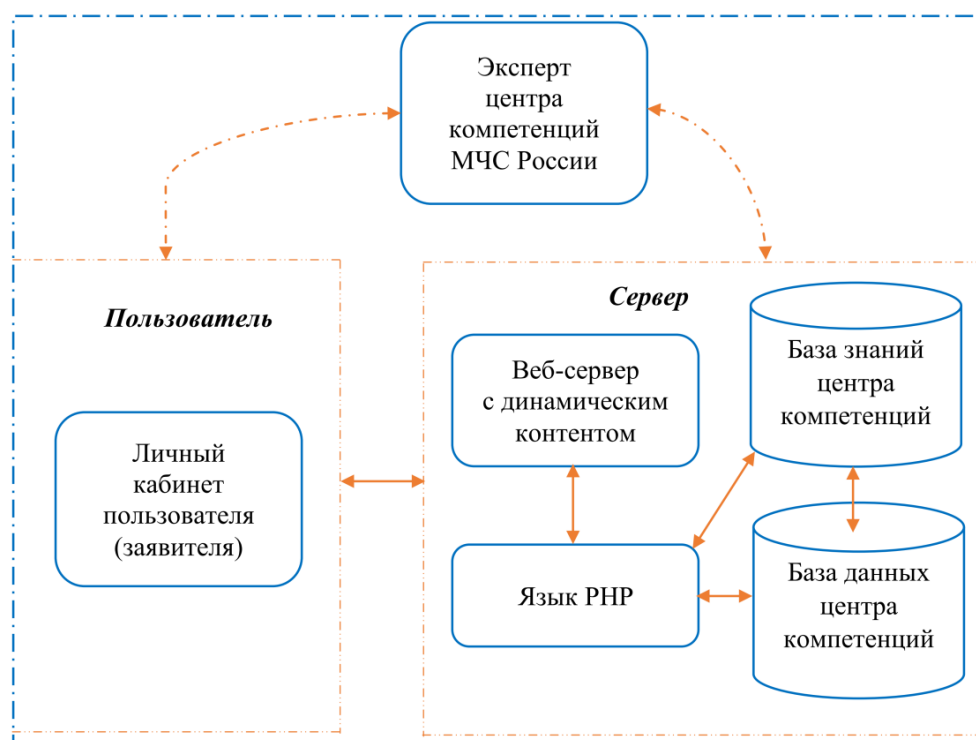


Рис. 5. Архитектура информационного программного продукта центра компетенций МЧС России, реализованного на языке PHP

Fig. 5. Architecture of the information software product of the competence center of the Ministry of Emergency Situations of Russia, implemented in PHP

Результаты

Организация центров компетенций позволит исключить различное трактование требований пожарной безопасности, что позволит снизить издержки бизнеса, а также количество разбирательств в различных инстанциях, в том числе судебных. Эта концепция позволит выработать единый стандарт к применению требований пожарной безопасности, что способствует единому пониманию и применению требований.

Создание центров компетенций повысит защищенность объектов надзора за счет сбалансированного применения требований пожарной безопасности, а обучение и последующее повышение квалификации специалистов в области противопожарной защиты позволит им стать центрами притяжения для членов сообщества данной сферы, обеспечивая передачу знаний и опыта, а впоследствии алгоритмизацию и машинную обработку накопленных массивов решений, а также их унификацию для системного правового оформления.

Разработка и реализация программ и мероприятий по обеспечению пожарной безопасности позволит центру стать основным источником современной практики в данной области, что поспособствует повышению эффективности действий по предотвращению пожаров и минимизации последствий.

В результате установления партнерских отношений между различными заинтересованными сторонами, такими как научно-образовательные учреждения, заказчики, производители, эксплуатирующие организации, в целях создания технических заданий для производств с учетом современных тенденций технологического развития повысится пожарная безопасность промышленных и гражданских объектов. Взаимодействие между различными субъектами позволит эффективно сочетать потребности заказчиков с инновационными разработками научных и производственных организаций, что в целом простимулирует развитие отрасли обеспечения пожарной безопасности.

Полномочия по разъяснению требований пожарной безопасности делают центры авторитетными источниками информации, способствующими повышению степени осведомленности граждан и организаций, и способствуют соблюдению требований пожарной безопасности. При этом

одновременно с полномочиями на них ложится ответственность за принимаемые решения, что, в свою очередь, дает гарантии для развития благоприятного экономического климата.

Сотрудничество со СМИ в рамках деятельности центров компетенций приведет к повышению осведомленности общественности о важности предотвращения пожаров и соблюдения необходимых мер безопасности. Результаты данной работы будут проявляться в укреплении имиджа центров как авторитетных и компетентных органов, способных предоставлять профессиональные комментарии и аналитические материалы по данной тематике. Это также способствует повышению доверия общественности к деятельности центров и улучшению сотрудничества с различными заинтересованными сторонами в целях обеспечения комплексной безопасности.

Исключение цикличности из процесса поиска предпринимателями наилучшего технического решения для конкретного запроса среди множества вариантов реализации поможет избежать повторных обращений к разным исполнителям и ускорит процесс обеспечения качественными решениями при реализации концепции пожарной безопасности объекта защиты.

Выводы

Таким образом, создание центров компетенций МЧС России в области обеспечения пожарной безопасности может стать важным шагом на пути к формированию более эффективной системы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации.

Список литературы

1. Хохлов Ю.Е. Центры компетенций в сфере цифровой экономики // Плехановский научный бюллетень. 2018. № 1 (13). С. 110–117. EDN: YMULAC.
2. Кебадзе О.Г., Ляшенко С.М. Проблемы взаимодействия органов государственного пожарного надзора и правоохранительных органов при производстве по делам о правонарушениях в области пожарной безопасности // Проблемы и перспективы пожарно-технической экспертизы и надзора в области пожарной безопасности: сб. тр. I Междунар. науч.-практ. конф., Химки, 29 мая 2017 года. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2017. С. 39–46. EDN: ZCAFBV.
3. Клиентоцентричный подход в государственном управлении: Навигатор цифровой трансформации / под ред. О.В. Линник, А.В. Ожаровского, М.С. Шклярук. М.: РАНХиГС при Президенте РФ, 2020. 180 с.
4. Указ Президента Российской Федерации от 11.07.2004 № 868 «Вопросы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».
5. Аксенова М.А. Центр компетенций как образовательный ресурс подготовки высококвалифицированных специалистов // Профессиональное образование и рынок труда. 2017. № 4. С. 18–24.
6. Лобаев И.А., Плешаков В.В. Особенности применения требований пожарной безопасности в условиях риск-ориентированной модели деятельности // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2023. № 2. С. 121–130. DOI: 10.25257/FE.2023.2.121-130. EDN: HQVEST.
7. Панов А.А., Козлов А.А., Журавлев Ю.Ю. Алгоритм выбора сценариев пожара в зданиях, сооружениях и строениях классов функциональной пожарной опасности Ф 1.3 и Ф 1.2 // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 1. С. 17–26. EDN: HTAZUC.
8. Дмитриев И.В., Малова А.А. Стратегическое и оперативное планирование бизнеса по продвижению товаров и услуг в области обеспечения пожарной безопасности в условиях конкуренции // Теоретическая экономика. 2014. № 3 (21). С. 53–57. EDN: SZTCCD.
9. К вопросу о применении риск-ориентированного подхода при осуществлении федерального государственного пожарного надзора / В.Ю. Емелин, А.К. Кокурин, А.М. Мочалов и др. // Пожарная и аварийная безопасность: сб. материалов XI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Году пожарной охраны, Иваново, 24–25 ноября 2016 года. Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2016. С. 50–54. EDN: YQCXLX.

10. Савенкова А.Е., Завьялов Д.Е., Шимов Д.Р. Применение цифровых технологий при обеспечении пожарной безопасности в работе надзорных органов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 4. С. 6–11. EDN: RNNQFR.

11. Организация деятельности дружин юных пожарных: инструктивно-методическое издание для руководителей, организаторов и кураторов дружин юных пожарных / О.Е. Мельник, А.М. Голубев, А.В. Макаров и др. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. 164 с.

12. Козлов А.А. О проектировании организационных структур надзорных органов в области пожарной безопасности с учетом автоматизации бизнес-процессов // Проблемы техносферной безопасности – 2019: материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов. 2019. С. 202–206. EDN: TRFUXE.

13. Ефремова О.В., Ефремов И.С. Система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты с применением системы поддержки принятия управленческих решений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 36–42. EDN: VAWEMF.

14. Мокшанцев А.В., Тимофеев А.И. Информационная модель поддержки управления пожарной безопасностью на региональном уровне // Социально-экономические аспекты принятия управленческих решений: материалы шестого научного семинара, Москва, 28 февраля 2022 года. М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. С. 193–196. EDN: OETDDU.

15. Заряева Н.П., Малышева И.С. Нормативно-правовое регулирование в области пожарной безопасности // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXVIII междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч., Ногинск, 19–20 мая 2016 года. Ч. 2. Ногинск: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2016. С. 300–306. EDN: YGQFKX.

16. Ботвинко А.В., Данилов М.М., Денисов А.Н. Модель регистрации информационного обмена в области пожарной безопасности (на примере ГУ МЧС России по Тульской области) // Академия Государственной противопожарной службы МЧС России: Теория. Инновации. Практика: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России: в 5 ч., Москва, 19 октября 2023 года. М.: Академия Государственной противопожарной службы, 2024. С. 14–19. EDN: BRVNGQ.

17. Шевцов М.В., Денисов А.Н., Горбачев И.Н. Интегральная оценка руководства тушением пожара с использованием экспертной информации // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч., Москва, 17–18 марта 2022 года. Ч. 1. М.: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 237–242. EDN: YUZRDК.

References

1. Khokhlov Yu.E. Digital economy centers of excellence. *Plekhanov Scientific Bulletin*. 2018;1(13):110–117. (In Russ.) EDN: YMULAC.

2. Kebabze O.G., Lyashenko S.M. Problems of interaction of state fire supervisory bodies and law enforcement bodies in the field of fire provisions on fire safety. In: *Problems and prospects of fire-technical expertise and supervision in the field of fire safety: collection of works of the I International scientific and practical conference*, Khimki, May 29, 2017. Khimki: Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. P. 39–46. (In Russ.) EDN: ZCAFBV.

3. Linnik O.V., Ozharovsky A.V., Shklyaruk M.S. (Eds.). *Klientotsentrichnyy podkhod v gosudarstvennom upravlenii: Navigator tsifrovoy transformatsii* [Client-centric approach in public administration: Navigator of digital transformation]. Moscow: RANEPА under the President of the Russian Federation, 2020. 180 p. (In Russ.)

4. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 11.07.2004 No. 868 “Voprosy Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiy-

nykh bedstviy” [Decree of the President of the Russian Federation of July 11, 2004 No. 868 “Issues of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”]. (In Russ.)

5. Aksenova M.A. [Competence center as an educational resource for training highly qualified specialists]. *Vocational education & Labour market*. 2017;(4):18–24. (In Russ.)

6. Lobaev I.A., Pleshakov V.V. Peculiarities of fire safety requirements application under the conditions of a risk-based activity model. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2023;(2):121–130. (In Russ.) DOI: 10.25257/FE.2023.2.121-130. EDN: HQVECT.

7. Panov A.A., Kozlov A.A., Zhuravlev Yu.Yu. Algorithm for selecting fire scenarios in buildings, structures and buildings functional fire hazard classes F 1.3 and F 1.2. *Scientific and analytical journal “Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia”*. 2021;(1):17–26. (In Russ.) EDN: HTAZUC.

8. Dmitriev I.V., Malova A.A. [Strategic and operational planning of business on promotion of goods and services in the field of fire safety in the conditions of competition]. *Theoretical economics*. 2014;3(21):53–57. (In Russ.) EDN: SZTCCD.

9. Emelin W.Y., Kokurin A.K., Mochalow A.M., Murtayljakowa A.M., Shadrinow R.A. On application of a risk-based approach in the federal state fire supervision. In: *Fire and emergency safety: collection of materials of the XI International scientific and practical conference dedicated to the Year of Fire Protection, Ivanovo, November 24–25, 2016*. Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”, 2016. P. 50–54. (In Russ.) EDN: YQCXLX.

10. Savenkova A.E., Zavvalov D.E., Shimov D.R. Application of digital technologies in ensuring fire safety in the work of supervisory authorities. *Scientific and analytical journal “Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia”*. 2020;(4):6–11. (In Russ.) EDN: RNNQFR.

11. Melnik O.E., Golubev A.M., Makarov A.V., Melnik A.A., Zobkov D.V., Nestrugin A.N. *Organizatsiya deyatelnosti druzhin yunikh pozharnykh: instrukтивно-metodicheskoe izdanie dlya rukovoditeley, organizatorov i kuratorov druzhin yunikh pozharnykh* [Organization of the activities of young firefighters' teams: an instructional and methodological publication for leaders, organizers and curators of young firefighters' teams]. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. 164 p. (In Russ.)

12. Kozlov A.A. [On the design of organizational structures of supervisory authorities in the field of fire safety, taking into account the automation of business processes]. In: *Problems of technosphere safety – 2019: materials of the VIII international scientific and practical conference of young scientists and specialists*. 2019. P. 202–206. (In Russ.) EDN: TRFUXE.

13. Efremova O.V., Efremov I.S. System of ensuring fire safety of object of protection with application of system of support of adoption of administrative decisions. *Proceedings of the Southwest state university. Series: Control, computer engineering, information science. Madical instruments engineering*. 2015;3(16):36–42. (In Russ.) EDN: VAWEMF.

14. Mokshantsev A.V., Timofeyev A.I. Information model of fire safety management support at the regional level. In: *Social and economic aspects of decision-making: Proceedings of the sixth scientific seminar, Moscow, February 28, 2022*. Moscow: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. P. 193–196. (In Russ.) EDN: OETDDU.

15. Zaryaeva N.P., Malysheva I.S. [Normative-legal regulation in the field of fire safety]. In: *Actual problems of fire safety: materials of the XXVIII international scientific-practical conference: in 2 parts, Noginsk, May 19–20, 2016. Part 2*. Noginsk: All-Russian Order of the Badge of Honor Research Institute of Fire Defense of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2016. P. 300–306. (In Russ.) EDN: YGQFKX.

16. Botvinko A.V., Danilov M.M., Denisov A.N. [Model for registering information exchange in the field of fire safety (using the example of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Tula Region)]. In: *Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia: Theory. Innovations. Practice: Proceedings of the scientific and practical conference with international participation dedicated to the 90th anniversary of the foundation of the Aca-*

demy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia: in 5 parts, Moscow, October 19, 2023. Moscow: Academy of the State Fire Service, 2024. P. 14–19. (In Russ.) EDN: BRVNGQ.

17. Shevtsov M.V., Denisov A.N., Gorbachev I.N. [Integral assessment of fire extinguishing management using expert information]. In: *Fire extinguishing: problems, technologies, innovations: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference: in 2 parts, Moscow, March 17–18, 2022. Part 1.* Moscow: Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2022. P. 237–242. (In Russ.) EDN: YUZRDK.

Информация об авторах

Козлов Александр Александрович, начальник отдела организации предоставления государственных услуг и межведомственного взаимодействия, Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России, Москва, Россия; dkac77@gmail.com.

Шевцов Максим Викторович, канд. техн. наук, начальник учебно-методического центра, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия; shevtsovmv@mail.ru.

Денисов Алексей Николаевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры пожарной тактики и службы (в составе учебно-научного комплекса пожаротушения), Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия; dan_aleks@mail.ru.

Information about the authors

Alexander A. Kozlov, Head of the Department for the Organization of the Provision of Public Services and Interdepartmental Interaction, Department of Supervision and Preventive Work of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia; dkac77@gmail.com.

Maxim V. Shevtsov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Educational and Methodological Center, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia; shevtsovmv@mail.ru.

Alexey N. Denisov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Fire Tactics and Service (as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing), Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia; dan_aleks@mail.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 20.06.2025

The article was submitted 20.06.2025

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение

УДК 330.322

DOI: 10.14529/ctcr250309

МОСТ «МАТЕРИК – САХАЛИН»: ПРОБЛЕМЫ СООРУЖЕНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Е.Б. Кибалов¹, kibalovE@mail.ru

Я.Д. Гельруд², gelrud@mail.ru

¹ Институт экономики и организации промышленного производства
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель исследования. В связи со стремительной эскалацией конфликта между Россией и Западом Россия закономерно сближается с Востоком. В связи с этим актуальной проблемой является улучшение транспортной доступности отдаленных территорий, таких как Сахалин, который является крупнейшим островом России и обладает значительными природными ресурсами. В связи с этим Президент России В.В. Путин поддержал инициативу по строительству моста, соединяющего Сахалин с материком, считая, что это поможет ускорить развитие региона. **Материалы и методы.** В ходе исследования была приведена ретроспектива крупномасштабного инвестиционного железнодорожного проекта (КИП-ж.д.) «Материк – Сахалин», а также выделены основные элементы транспортной развязки. Анализ показал, что отсутствие прямой мостовой связи с материком существенно затрудняет развитие экономики «восточного вектора». Подобные примеры успешного развития регионов с мостовыми переходами, такие как Крым или Камчатка, свидетельствуют о том, что строительство моста между Сахалином и материком может стимулировать экономический рост, улучшить инвестиционный климат и повысить качество жизни местного населения. **Результаты.** Перед заказчиком встает нелегкий выбор в части коалиции элементов транспортной развязки (далее проектов) «материк – Сахалин». Для снижения неопределенности в данной статье использовался специальный программный продукт ASPRER. С помощью программы были получены экспертные ранжировки в порядковой шкале в числовом формате в виде коэффициентов относительной важности (КОВ). Для объединения проектов в различные коалиции с помощью метода Шепли достигается устойчивость и надежность реализации проектов. Произведенные расчеты демонстрируют работы комплекса инструментов, необходимых заказчику для прозрачности и обоснованности собственных решений. **Заключение.** Предложенный заказчику инструментарий позволяет на предынвестиционном этапе оценки КИП-ж.д. структурировать имеющую место неопределенность и избежать катастрофических ошибок на предынвестиционном этапе оценки проектов.

Ключевые слова: коэффициент относительной важности, крупномасштабные инвестиционные железнодорожные проекты, вектор Шепли, кооперативные игры, коалиции, ASPER, материк – Сахалин, неопределенность, распределения выигрыша, ОАО «РЖД»

Для цитирования: Кибалов Е.Б., Гельруд Я.Д. Мост «материк – Сахалин»: проблемы сооружения на современном этапе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 99–107. DOI: 10.14529/ctcr250309

BRIDGE “MAINLAND – SAKHALIN”: PROBLEMS OF CONSTRUCTION AT THE PRESENT STAGE

E.B. Kibalov¹, kibalovE@mail.ru
Ya.D. Gelrud², gelrud@mail.ru

¹ Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Purpose of the study. Due to the rapid escalation of the conflict between Russia and the West, as a result of which Russia is naturally moving closer to the East. In this regard, an urgent problem is to improve the transport accessibility of remote areas, such as Sakhalin, which is the largest island in Russia and has significant natural resources. In this regard, Russian President Vladimir Putin supported the initiative to build a bridge connecting Sakhalin with the mainland, believing that this would help accelerate the development of the region. **Materials and methods.** In the course of the study, a retrospective of the large-scale investment railway project (KIP-railway) “mainland – Sakhalin” was given, and the main elements of the transport interchange were highlighted. The analysis showed that the lack of a direct bridge connection with the mainland significantly hinders the development of the economy of the “eastern vector”. Similar examples of successful development of regions with bridges, such as Crimea or Kamchatka, indicate that the construction of a bridge between Sakhalin and the mainland can stimulate economic growth, improve the investment climate and improve the quality of life of the local population. **Results.** The customer faces a difficult choice in terms of the coalition of elements of the transport interchange (hereinafter referred to as projects) “mainland – Sakhalin”. To reduce uncertainty, a special software product ASPRER was used in this article. With the help of the program, expert rankings were obtained on an ordinal scale in numerical format, in the form of coefficients of relative importance (COV). To combine projects into various coalitions using the Shapley method, sustainability and reliability of project implementation are achieved. The calculations performed demonstrate the work of a set of tools necessary for the customer to ensure transparency and validity of their own decisions. **Conclusion.** The tools offered to the customer also allow for the pre-investment stage of the KIP-railway assessment to structure the existing uncertainty and avoid catastrophic errors at the pre-investment stage of project evaluation.

Keywords: relative importance factor, large-scale investment railway projects, Shapley vector, cooperative games, coalition, ASPER, mainland – Sakhalin, uncertainty, distribution of winnings, JSC “RZD”

For citation: Kibalov E.B., Gelrud Ya.D. Bridge “mainland – Sakhalin”: Problems of construction at the present stage. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):99–107. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250309

Введение

«Нужно связать мостовым переходом Сахалин с материком, и развитие пойдет там (в регионе, где строится мост – *Авт.*) другими темпами. Уверен абсолютно» [1], – сказал Президент России В.В. Путин во время видеосоветания с главой Сахалинской области В. Лимаренко 27.02.23. Это было не первое обращение Президента к проблеме связи «по сушу» материковой России с о. Сахалин.

За прошедшее с тех пор время ситуация, обозначенная Президентом по состоянию на начало 2023 года, радикально обострилась, и проект интересующего нас моста на фоне полномасштабной гибридной войны против нашей страны, развязанной коллективным Западом, превратился, на наш взгляд, из важного в ряду других важных в стратегически важный и первоочередной. Впрочем, ситуация изменилась не одномоментно, но эволюционно с вековым лагом.

Историческая справка

Следуя эволюционному подходу, покажем, что осознание российским обществом проблемы, волнующей Президента В.В. Путина «здесь и сейчас», началось еще в царской России.

Впервые идея о соединении материка и острова Сахалин насыпной дамбой через пролив Невельского была высказана харьковским купцом Гудковым в 1892 г. Автор идеи предложил амурскому губернатору проложить по дамбе железнодорожную конку. Проект остался без внимания.

С той же идеей отсыпки дамбы в 1915 г. выступил штурман дальнего плавания Н. Осташевский, предложивший для прохода судов через дамбу построить судоходный канал со шлюзами. И этот проектный замысел уже новым амурским губернатором не был поддержан¹.

Обратим внимание не только на стратегическую недалекость царской бюрократии, недооценившей роль острова как форпоста России в Тихом океане, но и на огромные риски предпринимательской деятельности на изолированном от материка острове, что и пугало русских толстосумов тех лет. «Их не прельщали ни рыба сахалинских вод, ни леса, ни почти не тронутые запасы угля, ни феноменальные зарождения нефти, явные признаки которых по всему восточному побережью видны в виде нефтяных озер и целых полей, покрытых кироу...»².

Однако идея сооружения дамбы со шлюзами через пролив Невельского, превращавшей остров Сахалин в полуостров, а Татарский пролив в залив, забыта не была, и во второй половине 1920-х годов советское правительство намерялось приступить к реализации штурманского проекта, но помешала война. После войны идею транспортного коридора на Сахалин реанимировал лично И.В. Сталин, он же и указал на железнодорожный подводный тоннель под проливом Невельского протяженностью 10 км как на наиболее предпочтительный вариант. Стройку начали незамедлительно силами заключенных и вольнонаемных специалистов, однако после смерти вождя проект, несмотря на значительный объем проделанной работы, в мае 1953 г. закрыли.

В 2000 г. по техническому заданию, подписанному тогдашним министром МПС России Н.Е. Аксененко, ИЗОПИ СО РАН в качестве субподрядчика СОПС принял участие в разработке технико-экономического доклада «Оценка экономической эффективности инвестиций в строительство железнодорожной линии между материком и о. Сахалин с тоннельным (мостовым) переходом пролива Невельского» [2]. Приводимый ниже рис. 1 заимствован из этого доклада и далее используется для иллюстрации суждений авторов в настоящей статье. Доклад был одобрен и принят заказчиком с высокой оценкой. Центральным методологическим элементом доклада явился учет фактора неопределенности при оценке экономической эффективности проекта (что никогда не делалось в советских ТЭО). Практический вывод состоял в следующем.

Если проект, как он представлен на рис. 1, завершается реконструкцией Сахалинской железной дороги, построенной еще японцами, то создается очередная тупиковая линия Селихин – Корсаков, так как ни при каких траекториях развития промышленности и социальной сферы острова не возникает грузовая база, достаточная для окупаемости проекта в приемлемые сроки [3]. Следовательно, экономическая цель проекта недостижима. Иное дело цели неэкономические – геополитическая, военно-стратегическая и социальная, – понимаемые как заданные ограничения, зафиксированные в техническом задании на проект и, к сожалению, не имеющие денежной меры. Тогда, как гласит теория принятия сложных решений при многих целях [4], лица, принимающие решения, естественно с помощью экспертов, должны упорядочить по степени важности все (экономические и неэкономические) цели проекта и решить, какой курс действий следует выбрать, чтобы максимизировать степень их достижения. На практике в большинстве известных нам случаев при жестко фиксированном векторе неэкономических целей дело сводится к выбору проекта (или варианта проекта), обеспечивающего минимум прямых и косвенных затрат на его реализацию [5–11].

Если же проект дополняется строительством моста или тоннеля через пролив Лаперуза, что дает возможность выйти через Хоккайдо на железнодорожную сеть Японии, то поток контейнерных грузов через Россию в Европу, по предположению, создаст устойчивую грузовую базу не только для Сахалинской железной дороги, но и для Транссиба³. Такое понимание проекта сделает его экономически эффективным при разумно сформулированных неэкономических целях.

¹ См.: Тоннели, дамбы и мосты: о том, как хотели построить железную дорогу на Сахалин и почему это пока не получилось [Эл. ресурс]. URL: <https://dv.land/spec/tonneli-damby-i-mosty> (дата обращения: 15.04.2024).

² Богатство Сахалина [Эл. ресурс]. URL: <https://sakhalin-war.livejournal.com/17585.html> (дата обращения: 15.04.2024).

³ Депутаты парламента Японии, а также представители японского бизнеса неоднократно поднимали перед правительством своей страны вопрос о транспортном соединении о. Хоккайдо и о. Сахалин. Более того, в Японии уже существует проект уникального железнодорожного моста между островами, но он не имеет экономического смысла до тех пор, пока Сахалин не соединен с материком [9, 13].

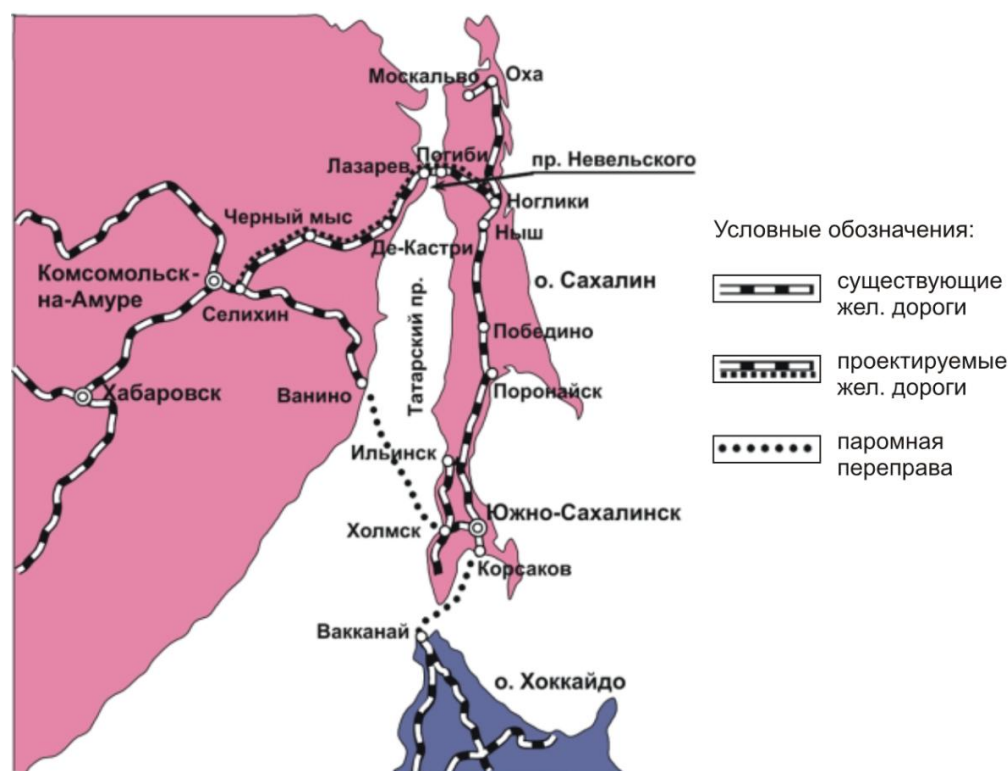


Рис. 1. Варианты транспортной связи материка с о. Сахалин
Fig. 1. Options for transport links between the mainland and Sakhalin Island

Примечание к рис. 1: *Существующие элементы:* 1) железнодорожная ветка от Комсомольска-на-Амуре до порта Ванино; 2) паромная переправа и морской путь от Ванино до Холмска и других морских портов о. Сахалин. *Проектируемые элементы:* 3) железнодорожная ветка от Комсомольска-на-Амуре через Селихин, Мыс Лазарева; 4) искусственное сооружение (мост или тоннель) через пр. Невельского; 5) железнодорожная ветка Погиби – Нogliки.

Подчеркнем: выводы и рекомендации, приведенные выше, были сделаны четверть века тому назад, и уже тогда было понятно, что вопрос требует политического решения. Причем годы с 2002-го по 2014-й были «тучными», т. е. цены на нефть устойчиво росли, «пробивая» в отдельные годы уровень в 100 долл. США за баррель, западных санкций не было и сооружение моста или тоннеля через пролив Невельского могло обойтись значительно дешевле, чем сегодня.

Теперь же РЖД оценило строительство моста с учетом однопутной неэлектрифицированной колеи в 640 млрд руб., писала газета «Ведомости» со ссылкой на документы РЖД. А «Ъ» (со ссылкой на гендиректора ОАО «РЖД») [12] утверждала, что строительство и ввод моста отодвигается за 2025 год.

Наши предложения

Анализ вышеизложенного позволяет заключить, что осуществление намерений Президента построить мост на Сахалин через пролив Невельского требует решить две проблемы: тактическую и стратегическую [13]. Как решать последнюю, обеспечивая так называемый стратегический синергизм реализованного проекта, в настоящее время «скрыто завесой неопределенности», характерной для гибридной войны. Однако тактическая проблема решается, и далее предлагается подход, опирающийся на теорию некооперативных игр.

Как следует из исторической справки, проект моста на Сахалин существовал как концепция несколько десятков лет. К его обсуждению вернулись в 2017 году, когда о нем в ходе прямой линии упомянул В.В. Путин. Стоимость моста и подходов к нему, связывающих станции Селихин на материке и Nysh на Сахалине, в 2017 году оценивалась в 540,7 млрд руб.

Сегодня ОАО «РЖД» готовит стратегию своего развития до 2030 года – возможно, до 2035 года – и мост на Сахалин (с подходами) будет учтен в ней», – сообщил на встрече с журналистами

гендиректор компании Олег Белозеров [12]. О том, сколько проект будет стоить теперь, умалчивается.

Далее мы предполагаем, что ОАО «РЖД» от лица государства исполняет функции заказчика проекта и принимает решения о режиме финансирования на всех этапах его реализации. В частности, устанавливает для подрядчиков-мостостроителей продолжительность строительного цикла в 6 лет.

Наш подход, излагаемый далее, позволяет искать коалиции проектов 1, 2, 3, 4, 5 (см. рис. 1, где элементы – это проекты) по критерию надежности соблюдения сроков завершения строительства моста и соблюдения финансовых ограничений.

Результаты расчетов

Рассматриваемую проблему представим как кооперативную игру, где игроками являются элементы (проекты, см. рис. 1) вариантов транспортной связи материка с о. Сахалин. Оптимальное распределение выигрыша между игроками в задачах теории кооперативных игр определяет вектор Шепли [14]. Выигрыш каждого игрока при этом равен его среднему вкладу в благосостояние тотальной коалиции при фиксированном механизме ее образования. Введем обозначения:

Проект 1 (игрок 1) – Пр1.

Проект 2 (игрок 2) – Пр2.

Проект 3 (игрок 3) – Пр3.

Проект 4 (игрок 4) – Пр4.

Проект 5 (игрок 5) – Пр5.

Экспертное упорядочение (проектов в группе):

Пр1 и Пр2 и Пр3 и Пр4 > Пр1 и Пр2 и Пр3 и Пр5 >

> Пр1 и Пр3 и Пр4 и Пр5 > Пр1 и Пр2 и Пр4 и Пр5 >

> Пр2 и Пр3 и Пр4 и Пр5.

Далее полученное экспертное упорядочение вводим в программу ASPER [15], где на выходе получаем коэффициенты относительной важности (результаты см. в таблице).

Результаты обработки экспертной ранжировки программой ASPER
Results of processing expert ranking by the ASPER program

№	Проекты	Коэффициенты относительной важности
1	Пр1 и Пр2 и Пр3 и Пр4	$\approx 0,37$
2	Пр1 и Пр2 и Пр3 и Пр5	$\approx 0,08$
3	Пр1 и Пр3 и Пр4 и Пр5	$\approx 0,12$
4	Пр1 и Пр2 и Пр4 и Пр5	$\approx 0,25$
5	Пр2 и Пр3 и Пр4 и Пр5	$\approx 0,18$

Распределения коэффициентов относительной важности $v(\cdot)$ приводим, как принято в кооперативной игре.

Проект 1 = $v(1)$

Проект 2 = $v(2)$

Проект 3 = $v(3)$

Проект 4 = $v(4)$

Проект 5 = $v(5)$

$v(1) = 0$

$v(12) = 0$

$v(123) = 0$

$v(1234) = 0,37$

$v(2) = 0$

$v(13) = 0$

$v(124) = 0$

$v(1235) = 0,08$

$v(3) = 0$

$v(14) = 0$

$v(125) = 0$

$v(1345) = 0,12$

$v(4) = 0$

$v(15) = 0$

$v(134) = 0$

$v(1245) = 0,25$

$v(5) = 0$

$v(23) = 0$

$v(135) = 0$

$v(2345) = 0,18$

$v(24) = 0$

$v(145) = 0$

$v(25) = 0$

$v(234) = 0$

$v(34) = 0$

$v(235) = 0$

$v(35) = 0$

$v(245) = 0$

$v(45) = 0$

$v(345) = 0$

Из приведенной выше записи следует, что мы определили полностью $v(\cdot)$, задав ее значения для всех возможных коалиций. Проверим характеристическую функцию на супераддитивность [14]:

$$\begin{aligned}v(2345) + v(1) &= 0,18 + 0 = 0,18 < 1 = v(12345) \\v(1345) + v(2) &= 0,12 + 0 = 0,12 < 1 = v(12345) \\v(1245) + v(3) &= 0,25 + 0 = 0,25 < 1 = v(12345) \\v(1235) + v(4) &= 0,08 + 0 = 0,08 < 1 = v(12345) \\v(1234) + v(5) &= 0,18 + 0 = 0,18 < 1 = v(12345) \\v(123) + v(5) &= 0 + 0 = 0 < 0,08 = v(1235) \\v(124) + v(3) &= 0 + 0 = 0 < 0,37 = v(1234) \\v(125) + v(4) &= 0 + 0 = 0 < 0,25 = v(1245) \\v(134) + v(2) &= 0 + 0 = 0 < 0,37 = v(1234) \\v(135) + v(4) &= 0 + 0 = 0 < 0,12 = v(1345) \\v(145) + v(2) &= 0 + 0 = 0 < 0,25 = v(1245) \\v(234) + v(5) &= 0 + 0 = 0 < 0,18 = v(2345) \\v(235) + v(1) &= 0 + 0 = 0 < 0,08 = v(1235) \\v(245) + v(3) &= 0 + 0 = 0 < 0,18 = v(2345) \\v(345) + v(1) &= 0 + 0 = 0 < 0,12 = v(1345)\end{aligned}$$

Теперь найдем вектор Шепли. По определению, для каждого игрока $a = 1, 2, 3, 4, 5$:

$$\varphi_a = \sum_{K: a \in K} \frac{(|K|-1)! \cdot (|A|-|K|)!}{|A|!} (v(K) - v(K \setminus \{a\})).$$

Элементы вектора Шепли⁴ для каждого игрока представляют собой математическое ожидание вклада игрока в коалиции с его участием, когда произвольная коалиция A образуется в результате следующего случайного процесса. Сначала с вероятностью $1/|A|$ выбирается игрок a_1 , затем из оставшихся $|A| - 1$ игроков с вероятностью $1/(|A| - 1)$ выбирается игрок a_2 и присоединяется к игроку a_1 и т. д. На каждом шаге процесса образуется коалиция вида $\{a_1 a_2 \dots a_k\}$. В результате с вероятностью $1/|A|!$ будет выбрана перестановка игроков $a_1, \dots, a_{|A|}$. При таком процессе образования коалиций вероятность образования коалиции вида $A \setminus \{a\}$ для любого игрока составляет $\frac{(|K|-1)! \cdot (|A|-|K|)!}{|A|!}$, а его вклад в эту коалицию – $v(K) - v(K \setminus \{a\})$. Таким образом, вклад игрока представляет собой случайную величину с указанным законом распределения, а ее математическое ожидание и задает элемент вектора Шепли рассматриваемой игры, соответствующий игроку [14].

Для начала определим вклады игроков в каждую из коалиций, куда он может войти. Для первого игрока имеем 14 коалиций, куда он может войти: $\{12345\}$, $\{1234\}$, $\{1235\}$, $\{1345\}$, $\{1245\}$, $\{123\}$, $\{124\}$, $\{125\}$, $\{134\}$, $\{135\}$, $\{145\}$, $\{12\}$, $\{13\}$, $\{14\}$, $\{15\}$ и «одионочная» коалиция $\{1\}$. Имеем:

$$\begin{aligned}v(12345) - v(2345) &= 1 - 0,175509 = 0,824491 \\v(1234) - v(234) &= 0,365404 - 0 = 0,365404 \\v(1235) - v(235) &= 0,084325 - 0 = 0,084325 \\v(1345) - v(345) &= 0,121655 - 0 = 0,121655 \\v(1245) - v(245) &= 0,253207 - 0 = 0,253207 \\v(123) - v(23) &= 0 - 0 = 0 \\v(124) - v(24) &= 0 - 0 = 0 \\v(125) - v(25) &= 0 - 0 = 0 \\v(134) - v(34) &= 0 - 0 = 0 \\v(135) - v(35) &= 0 - 0 = 0 \\v(145) - v(45) &= 0 - 0 = 0 \\v(12) - v(2) &= 0 - 0 = 0 \\v(13) - v(3) &= 0 - 0 = 0 \\v(14) - v(4) &= 0 - 0 = 0 \\v(15) - v(5) &= 0 - 0 = 0 \text{ и } v(1) - v(\emptyset) = 0.\end{aligned}$$

⁴ Вектором Шепли кооперативной игры $\mathcal{K} = \langle A, v \rangle$ называется вектор $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_{|A|})$, где φ_a определяется по правилу [14].

Тогда элемент вектора Шепли для первого игрока равен:

$$\begin{aligned} \varphi^1 = & \frac{(5-1)! \cdot (5-5)!}{5!} \cdot 0,824491 + \frac{(4-1)! \cdot (5-4)!}{5!} \cdot 0,365404 + \frac{(4-1)! \cdot (5-4)!}{5!} \cdot 0,084325 + \\ & + \frac{(4-1)! \cdot (5-4)!}{5!} \cdot 0,121655 + \frac{(4-1)! \cdot (5-4)!}{5!} \cdot 0,253207 + \frac{(3-1)! \cdot (5-3)!}{5!} \cdot 0 + \frac{(3-1)! \cdot (5-3)!}{5!} \cdot 0 + \\ & + \frac{(3-1)! \cdot (5-3)!}{5!} \cdot 0 + \frac{(3-1)! \cdot (5-3)!}{5!} \cdot 0 + \frac{(3-1)! \cdot (5-3)!}{5!} \cdot 0 + \frac{(2-1)! \cdot (5-2)!}{5!} \cdot 0 + \\ & + \frac{(2-1)! \cdot (5-2)!}{5!} \cdot 0 + \frac{(2-1)! \cdot (5-2)!}{5!} \cdot 0 + \frac{(2-1)! \cdot (5-2)!}{5!} \cdot 0 + \frac{(1-1)! \cdot (5-1)!}{5!} \cdot 0 \approx 0,21. \end{aligned}$$

Для второго игрока равен:

$$\varphi^2 \approx 0,22.$$

Для третьего игрока равен:

$$\varphi^3 \approx 0,19.$$

Для четвертого игрока равен:

$$\varphi^4 \approx 0,23.$$

Для пятого игрока равен:

$$\varphi^5 \approx 0,16.$$

Результат распределения выигрыша каждого игрока по Шепли между проектами получился следующим:

Проект 1 (игрок 1) – 0,21

Проект 2 (игрок 2) – 0,22

Проект 3 (игрок 3) – 0,18

Проект 4 (игрок 4) – 0,23

Проект 5 (игрок 5) – 0,16

Сумма вкладов всех проектов ($0,21 + 0,22 + 0,18 + 0,23 + 0,16 \approx 1$) равна единице. Полученные коэффициенты могут быть использованы для распределения объемов инвестиций между проектами.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что строительство моста между о. Сахалин и материком имеет большое значение для РФ на фоне противостояния нашей страны против коллективного Запада. Таким образом, реализация данного проекта находится в высокой степени актуализации, несмотря на неопределенность будущего развития России.

Практическая ценность данной статьи заключается в предоставлении заказчику упакованного решения относительно распределения объема инвестиций между проектами, что закрепляет и стабилизирует реализацию проектов и достижение генеральной цели.

Список литературы

1. Горошилова А. Путин считает нужным вернуться к вопросу строительства моста на Сахалин [Эл. ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6616723#comments> (дата обращения: 15.04.2024).
2. Оценка экономической эффективности инвестиционного проекта строительства постоянного железнодорожного сообщения материк – о. Сахалин. Методология и результаты [Эл. ресурс] / В.Н. Разбегин, Е.Б. Кибалов, М.А. Ягольницер и др. URL: <http://vff-s.narod.ru/sakh/tp/p1/p09.htm> (дата обращения: 15.04.2024).
3. Кемпбелл Э., Саммерс Лачс К. Стратегический синергизм: пер. с англ. 2-изд. СПб.: Питер, 2004. 516 с.
4. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: пер с англ. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
5. Kin A.A. The regional transport megaproject of the Baikal–Amur mainline: Lessons of development // Regional Research of Russia. 2015. Vol. 5, iss. 4. P. 316–322.
6. Чаркина Е.С. Развитие проектного подхода в системе государственного управления: методология, опыт, проблемы. М.: ИЭ РАН, 2017. 54 с.
7. URL: <https://нацпроектэкология.рф/v-gosdume-obsudili-v-kakoy-byudzhnet-napravlyat-vyplaty-zaushcherb-ekologii/> (дата обращения: 18.08.2020).
8. Паспорт национального проекта «Экология», утвержденный президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам

(протокол от 24 декабря 2018 г. № 16). URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/fbad8a780cfe43d0d4e807eb166ae5fb/NP_EKO_241218.pdf.

9. Умное управление проектами: учеб. пособие / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд и др.; под ред. Д.А. Новикова. Челябинск: Издат. Центр ЮУрГУ, 2019. 188 с.

10. Системное моделирование и анализ мезо- и микроэкономических объектов / отв. ред. В.В. Кулешов и Н.И. Суслов. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2014. 488 с.

11. Комплексный подход к оценке общественной эффективности крупномасштабных железнодорожных проектов / Е.Б. Кибалов, И.А. Беспалов, В.Ф. Бузулуцков и др. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015. 160 с.

12. Скорлыгина, Н. Сахалинский мост сдвинется за 2025 год [Эл. ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4142462> (дата обращения: 15.04.2024).

13. Кин А.А., Михеева Н.Н. Экономика восточного анклава России: состояние и перспективы развития // Регион: экономика и социология. 2001. № 3. С. 54–74.

14. Вартанов С.А., Ивин Е.А. Прикладная теория игр для экономистов. Вологда: ВолНЦ РАН, 2020. 283 с.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663089 Российской Федерация. ASPER 3 – программное обеспечение для принятия многокритериальных решений в условиях неопределённости / М.В. Пятаев, И.А. Беспалов, Е.Б. Кибалов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения». № 2023662242: заявл. 13.06.2023; опубли. 19.06.2023. EDN CLCJAG.

References

1. Goroshilova A. [Putin considers it necessary to return to the issue of building a bridge to Sakhalin] [Electronic resource]. (In Russ.) Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/6616723#comments> (accessed 15.04.2024).

2. Razbegin V.N., Kibalov E.B., Yagolnitser M.A. et al. [Assessment of the economic efficiency of the investment project for the construction of a permanent railway link between the mainland and Sakhalin Island. Methodology and results] [Electronic resource]. (In Russ.) Available at: <http://vff-s.narod.ru/sakh/tp/p1/p09.htm> (accessed 15.04.2024).

3. Campbell A., Sommers Luchs K. *Strategic Synergy*. Transl. from Engl. 2nd ed. St. Petersburg: Piter, 2004. 516 p. (In Russ.)

4. Keeney R.L., Raiffa H. *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. Transl. from Engl. Moscow: Radio i svyaz', 1981. 560 p. (In Russ.)

5. Kin A.A. The regional transport megaproject of the Baikal–Amur mainline: Lessons of development. *Regional Research of Russia*. 2015;5(4):316–322.

6. Charkina E.S. *Razvitie proektnogo podkhoda v sisteme gosudarstvennogo upravleniya: metodologiya, opyt, problemy* [Development of the project approach in the public administration system: methodology, experience, problems]. Moscow: Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences, 2017. 54 p. (In Russ.)

7. Available at: <https://нацпроектэкология.рф/v-gosdume-obsudili-v-kakoy-byudzheth-napravlyatvyplaty-za-ushcherb-ekologii/> (accessed 08.18.2020). (In Russ.)

8. *Pasport natsional'nogo proekta "Ekologiya"*, utverzhdenyy prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nyim proektam (protokol ot 24 dekabrya 2018 g. No. 16) [Passport of the national project "Ecology", approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects (protocol of December 24, 2018 No. 16)]. (In Russ.) Available at: https://www.economy.gov.ru/material/file/fbad8a780cfe43d0d4e807eb166ae5fb/NP_EKO_241218.pdf.

9. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gel'rud Ya.D. et al.; edited by Novikov D.A. *Umnoe upravlenie proektami: ucheb. posobie* [Smart project management. Textbook]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2019. 188 p. (In Russ.)

10. Kuleshov V.V., Suslov N.I. (Eds.). *System modeling and analysis of mezo- and microeconomic objects*. Novosibirsk: Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014. 488 p. (In Russ.)

11. Kibalov E.B., Beshpalov I.A., Buzulutskov V.F. et al. *Kompleksnyy podkhod k otsenke obshchestvennoy effektivnosti krupnomasshtabnykh zheleznodorozhnykh projektov* [An integrated approach to assessing the social efficiency of large-scale railway projects]. Novosibirsk: Siberian Transport University Publ., 2015. 160 p. (In Russ.)
12. Skorlygina N. [Sakhalin Bridge to Move by 2025] [Electronic Resource]. (In Russ.) Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4142462> (accessed 15.04.2024).
13. Kin A.A., Mikheeva N.N. The economy of Russia's eastern enclave: stance and prospects. *Region: Economics and Sociology*. 2001;(3):54–74. (In Russ.)
14. Vartanov S.A., Ivin E.A. *Prikladnaya teoriya igr dlya ekonomistov* [Applied Game Theory for Economists]. Vologda: Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2020. 283 p. (In Russ.)
15. Pyataev M.V., Beshpalov I.A., Kibalov E.B. *ASPER 3 – software for making multi-criteria decisions under uncertainty*. Certificate of state registration of the computer program no. 2023663089 Russian Federation; no. 2023662242; decl. 13.06.2023; publ. 19.06.2023. (In Russ.) EDN CLCJAG.

Информация об авторах

Кибалов Евгений Борисович, д-р экон. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия; kibalovE@mail.ru.

Гельруд Яков Давидович, д-р техн. наук, проф. кафедры международных отношений, политологии и регионоведения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gelrud@mail.ru.

Information about the authors

Evgeny B. Kibalov, Dr. Sci. (Econ.), Prof., Chief Researcher, Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; kibalovE@mail.ru.

Yakov D. Gelrud, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of International Relations, Political Science and Regional Studies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gelrud@mail.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 20.02.2025

The article was submitted 20.02.2025

ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИЕЙ В ЦЕЛЯХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ

В.Н. Максимова, maksimovavn@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9197-5599>
Т.А. Макаровских, makarovskikh.t.a@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3656-9632>
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цифровая трансформация агропромышленной отрасли началась еще в начале 2000-х годов. За это время разработано немало подходов для контроля состояния сельскохозяйственных угодий, автоматизации ухода за культурами, высокоточного внесения удобрений, мониторинга здоровья животных и оптимизации работы сельскохозяйственной техники. Тем не менее инвентаризация сельскохозяйственных угодий не проводилась более 30 лет, и, следовательно, актуальна разработка методов оценки проблемных объектов природопользования с целью определения направлений их дальнейшего применения. Основной целью внедрения технологий точного земледелия является изменение процесса принятия решения и, как следствие, получение существенного повышения эффективности управления агротехническими предприятиями, уменьшения загрязнения окружающей среды, роста доходов сельхозпроизводителей и улучшения качества продукции. **Цель исследования:** разработать универсальный интеллектуальный модуль для информационной системы «УралГИС-Агро», который позволяли бы детектировать проблемные объекты природопользования на основе спутниковых снимков. **Материалы и методы.** Для детекции проблемных объектов природопользования использованы методы анализа изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования земли (спутниковые снимки). В частности, разработанная методика позволяет анализировать индексы (вегетационный, водный), и на основе полученных значений осуществляется принятие решения о состоянии объекта. **Результаты.** Полученный модуль является универсальным. В зависимости от получаемых входных данных о контурах объектов и вычисляемых индексах он позволяет получить анализ объекта в требуемом контексте. Обоснована экономическая эффективность разработанной системы. **Заключение.** По результатам работы модуля были определены проблемные объекты природопользования в Челябинской области, определена выгода для региона в случае передачи обнаруженных объектов другим собственникам, а также возможные расходы на восстановление данных земель как сельскохозяйственных. Рассмотренный в статье интеллектуальный модуль, являющийся частью технологии определения оптимального использования проблемных объектов природопользования, позволяет в дальнейшем решить проблему сбалансированного развития территории на основе геопространственного анализа и алгоритмов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: интеллектуальная система, комплекс программ, точное земледелие, принятие решений, мониторинг

Для цитирования: Максимова В.Н., Макаровских Т.А. Технология определения оптимального использования проблемных объектов природопользования на основе управления геоинформацией в целях пространственного развития территории // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 108–115. DOI: 10.14529/ctcr250310

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr250310

TECHNOLOGY FOR DETERMINING THE OPTIMAL USE OF PROBLEMATIC NATURAL RESOURCE MANAGEMENT OBJECTS BASED ON GEOINFORMATION MANAGEMENT FOR THE PURPOSE OF SPATIAL DEVELOPMENT OF THE TERRITORY

V.N. Maksimova, maksimovavn@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9197-5599>**T.A. Makarovskikh**, makarovskikh.t.a@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3656-9632>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The digital transformation of the agro-industrial sector began in the early 2000s. During this time, many approaches have been developed to monitor the condition of agricultural land, automate crop care, high-precision fertilization, monitor animal health, and optimize the operation of agricultural machinery. Nevertheless, the inventory of agricultural land has not been carried out for more than 30 years and, therefore, it is relevant to develop methods for assessing problematic environmental management facilities in order to determine the directions of their further application. The main goal of introducing precision farming technologies is to change the decision-making process and, as a result, to significantly improve the management efficiency of agricultural enterprises, reduce environmental pollution, increase agricultural producers' incomes and improve product quality. **Aim.** To develop a universal intelligent module for the UralGIS-Agro information system, which would allow detecting problematic environmental management objects based on satellite images. **Materials and methods.** Methods of analyzing images obtained using remote sensing of the Earth (satellite images) were used to detect problematic environmental management objects. In particular, the developed methodology makes it possible to analyze the indices (vegetation, water) and, based on the values obtained, a decision is made on the condition of the facility. **Results.** The resulting module is universal. Depending on the input data about the contours of the objects and the calculated indexes, it allows you to get an analysis of the object in the required context. The economic efficiency of the developed system is calculated. **Conclusion.** Based on the results of the module, problematic environmental management facilities in the Chelyabinsk region were identified, the benefits for the region were determined if the discovered facilities were transferred to other owners, as well as the possible costs of restoring these lands as agricultural. The intelligent module considered in this article is part of the technology for determining the optimal use of problematic environmental management facilities, it allows us to further solve the problem of balanced development of the territory based on geospatial analysis and artificial intelligence algorithms.

Keywords: intellectual system, software, precision farming, decision making, monitoring

For citation: Maksimova V.N., Makarovskikh T.A. Technology for determining the optimal use of problematic natural resource management objects based on geoinformation management for the purpose of spatial development of the territory. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3): 108–115. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250310

Введение

Цифровая трансформация агропромышленной отрасли началась еще в начале 2000-х годов и наблюдается в течение 10–15 лет в агропромышленном комплексе (АПК) по всему миру. Современные технологии точного земледелия включают в себя использование не только GPS, ГИС, но и технологий оценки урожайности, систем автопилотирования, дистанционного зондирования земли и других инструментов. За это время разработано немало подходов для контроля состояния сельскохозяйственных угодий, автоматизации ухода за культурами, высокоточного внесения удобрений, мониторинга здоровья животных и оптимизации работы сельскохозяйственной техники.

Тем не менее инвентаризация сельскохозяйственных угодий не проводилась более 30 лет, и, следовательно, актуальна разработка методов оценки проблемных объектов природопользования с целью определения направлений их дальнейшего применения, поскольку ресурсосберегающее земледелие предполагает оптимизацию процессов и внедрение инноваций для улучшения эффек-

тивности вариантов ведения хозяйства [1]. Основной целью внедрения технологий точного земледелия является изменение процесса принятия решения и, как следствие, получение существенного повышения эффективности управления агротехническими предприятиями, уменьшения загрязнения окружающей среды, роста доходов сельхозпроизводителей и улучшения качества продукции [2].

Можно много говорить о преимуществах внедрения технологий точного земледелия, но в настоящее время в России накоплен сравнительно небольшой опыт применения таких технологий, большинство агропроизводителей используют иностранные решения, доступ к которым во многом зависит от текущей политической ситуации в государстве. Следовательно, развитие отечественных решений в области ТЗ является перспективной задачей. Определенные наработки в области точного земледелия начали появляться в РФ в 2010-х годах. Большинство таких разработок являются академическими и посвящены методологии формирования технологий точного земледелия [3]. Если подойти с другой стороны, то появился и ряд компаний по продвижению на отечественный рынок технических средств точного земледелия, а также созданию отечественных технических средств и программного обеспечения [4–6].

Несмотря на наличие внушительных успехов в цифровизации отрасли, системная инвентаризация сельскохозяйственных угодий не проводилась более 30 лет и, следовательно, актуальна разработка методов оценки проблемных объектов природопользования с целью определения направлений их дальнейшего применения. Поэтому разработка технологии автоматизированного определения оптимального использования проблемных объектов природопользования в целях рационального пространственного развития территории является актуальной задачей. Ее решение позволит снизить экологическую нагрузку на природу внедрением энергосберегающей экологически безопасной технологии производства товаров и обеспечить промышленность или население новым видом информационных услуг и т. п.

1. Описание общей идеи интеллектуального модуля

Рассмотрим технологию автоматизированного определения наиболее эффективного использования проблемных объектов природопользования в целях пространственного развития территории с использованием инструментов ландшафтного планирования и искусственного интеллекта.

Сущность технологии состоит в разработке автоматизированных подсистем (модулей) оценки экономической привлекательности брошенных объектов природопользования (земли сельскохозяйственного назначения, земли лесного фонда, водных объектов). Выявление брошенных объектов основано на обработке структурированной базы данных. Оценка экономической привлекательности брошенных объектов природопользования основана на применении алгоритмов искусственного интеллекта и геопространственного анализа. Данные методы лежат в основе инструментария ландшафтно-рекреационного подхода.

Предложенная технология [7] включает в себя разработку и применение итоговой геоинформационной системы пространственного развития территории с учетом рекомендуемого использования проблемных объектов природопользования на основе ландшафтно-рекреационного подхода и алгоритмов искусственного интеллекта. Благодаря оценке экономической привлекательности проблемных объектов природопользования система позволяет рассчитать доходы региона от рационального использования брошенных объектов природопользования (сдача в аренду, передача в другие категории земель, привлечение инвестиционных проектов и т. д.).

Суть технологии основана:

- на разработке автоматизированных подсистем обработки данных по оценке состояния объектов природопользования;
- разработке автоматизированной подсистемы учета больших данных оценки рекреационного использования объектов природопользования и социально-экономической составляющей в целях пространственного развития территории;
- разработке автоматизированных подсистем оценки ландшафтных свойств объектов природопользования: земель, водных объектов, лесов;
- разработке автоматизированных подсистем оценки экономической привлекательности: земель, водных объектов, лесов.

Полный цикл анализа объектов землепользования состоит из трех этапов.

1. Анализ спутникового снимка [8] и выявление потенциальных проблемных объектов [9–12].
2. Уточнение результатов, полученных на первом этапе путем съемки с использованием БПЛА либо проведения экспертной оценки [13, 14].
3. Формирование рекомендаций по дальнейшему использованию выявленных проблемных объектов.

Потенциальные проблемы участков землепользования можно подразделить на следующие категории: поля, заросшие хвойной либо лиственной растительностью; заболоченные водоемы; лесные массивы после пожара.

Для выявления всех типов объектов достаточно использовать нормализованные индексы NDVI (для работы с данными по полям и лесам) и NDWI (для анализа данных о водных объектах).

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является одним из наиболее важных и значимых индексов при исследовании качества вегетации, он описывает плотность растительности на территории на основе спутниковых либо мультиспектральных снимков. Значение индекса варьируется от -1 до 1 . Причем чем выше значение индекса, тем более развитой растительности он соответствует. Для анализа растительности индекс NDVI всегда имеет положительные значения от $0,2$ до 1 [15].

Нормализованный разностный водный индекс (NDWI, Normalized Difference Water Index) используется для мониторинга лесных пожаров, поиска полезных ископаемых и так далее. Значения индекса также находятся в диапазоне от -1 до 1 . Обычный диапазон для зеленой растительности составляет от $-0,1$ до $0,4$. Считается, что водные объекты принимают значения от $0,2$ до 1 , объекты, не содержащие влагу, принимают значения меньше 0 .

2. Исходные данные для функционирования интеллектуального модуля

Как было отмечено в предыдущем разделе, система использует геопространственные данные, находящиеся в открытом доступе: мультиспектральные снимки из космоса со спутника Sentinel. Изображения со спутника хранятся в формате GeoTIFF, который представляет собой многослойное растровое изображение, состоящее из миллионов пикселей. Каждый слой этого изображения соответствует одному из каналов съемки. Снимок представляет собой бесшовное мозаичное цветосинтезирующее изображение, в ряде случаев часть пикселей этого изображения перекрыта облаками, что может привести к получению ряда погрешностей анализа. С целью снижения погрешности используются снимки с характеристиками, приведенными в [9]. В частности, используются снимки, охватывающие только вегетационный период в Уральском регионе (с мая по сентябрь), периодичность съемки – $1-5$ суток (зависит от количества и качества снимков, получаемых со спутника), диапазон углов Солнца – $20-90$ градусов; угол визирования – $40/40$; допустимый процент облачности – 15% (данное ограничение резко уменьшает количество пригодных для анализа снимков для исследуемого региона).

Информация о контурах объектов интереса (сельскохозяйственных угодьях, принадлежащих определенному муниципальному образованию) хранится в базе данных системы «Урал ГИС-Агро» в бинарном формате [12].

После извлечения пикселей снимка, лежащих внутри контура исследуемого полигона, получим матрицу значений вегетационного индекса для каждого диапазона, используя формулу для вычисления индексов NDVI либо NDWI. Выбор индекса зависит от детектируемой проблемы.

Для детекции проблемы потребуются пороговые значения, находящиеся в диапазоне $[a, b]$, где a – нижнее пороговое значение для исследуемой проблемы, a b – верхнее пороговое значение. Значения a и b определяются опытным путем с помощью той же технологии, которая описывается для детекции проблемных объектов.

3. Описание модуля для детектирования проблемных участков природопользования с использованием ДЗЗ

Общая структура модуля детекции проблемных объектов [7, 12] природопользования и определения пороговых значений приведена на рисунке.



Структура интеллектуального модуля для детекции проблемных объектов природопользования
The structure of an intelligent module for detecting problematic environmental management objects

Входными данными являются бесшовные снимки за период, контуры объектов, для которых необходимо рассчитать показатель, исследуемый индекс (номера каналов спутникового снимка для проведения расчетов), диапазон пороговых значений, вне которого объект не считается проблемным.

Интеллектуальный модуль позволяет разбить по пикселям обрезанное по контуру объекта интереса спутниковое изображение, рассчитать индекс для каждого пикселя, определить процент пикселей, попавших в проблемный диапазон (без учета пустых значений). В результате будет сформирован список попавших в проблемный диапазон объектов и каждому проблемному объекту будет присвоен класс проблемы: заросшее хвоей либо лиственными лесами, заболоченный объект либо лес после пожара.

Описанный модуль [12] разработан на языке Python 3, в котором имеется инструментальный для работы с геоинформацией. В частности, имеются библиотеки, обеспечивающие возможность получения из мультиспектрального снимка фрагмента, соответствующего полигону, заданному в бинарном формате. В частности, использована библиотека Shupely, которая преобразует данные из бинарного формата во внутренние объекты (полигоны либо линии) и использует их для обрезки изображений. На выходе получим изображение в матричном представлении для каждого полигона, хранящегося в базе данных.

Данные значения являются приблизительными. Для точного понимания, что означают те или иные данные, следует учитывать конкретный сезон, тип растительности, сорт сельскохозяйственной культуры и даже региональные особенности произрастания растения, а также особенности проведения съемки. Последнее не всегда представляется возможным, что влечет повышение погрешности проводимых вычислений.

Несмотря на простоту выполняемых действий, данная процедура при отсутствии автоматизации определения вегетационного индекса и анализа имеющихся в базе данных полигонов практически не выполнима для региона, поскольку объем анализируемых данных велик и составляет порядка 10^7 объектов. По той же причине невозможен и осмотр всех сельскохозяйственных, лесных и водных угодий. Помимо всего прочего, при осмотре невозможно количественно оценить степень заросленности либо заболоченности отдельно взятого участка.

Заключение

Рассмотренный в статье интеллектуальный модуль, являющийся частью технологии определения оптимального использования проблемных объектов природопользования, позволяет в дальнейшем решить проблему сбалансированного развития территории на основе геопространственного анализа и алгоритмов искусственного интеллекта. Сущность данных подходов заключается в применении уникальной технологии автоматизированного определения наиболее эффективного использования проблемных объектов природопользования в целях пространственного развития территории. Применение данной технологии позволит решить проблему, связанную с обеспечением устойчивого и сбалансированного пространственного развития, являющимся одной из стратегических целей России, что следует из Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года.

Список литературы

1. Погоньшев В.А., Погоньшева Д.А., Ториков В.Е. Нейронные сети в цифровом сельском хозяйстве // Вестник Брянской ГСХА. 2021. № 5 (87). С. 68–71. DOI: 10.52691/2500-2651-2021-87-5-68-71
2. Якушев В.П., Якушев В.В., Матвеев Д.А. Роль и задачи точного земледелия в реализации национальной технологической инициативы // Агрофизика. 2017. № 1. С. 51–65.
3. Якушев В.П. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета «Умное сельское хозяйство» России // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 2. С. 11–15. DOI: 10.30850/vrsn/2019/2/11-15
4. Рубцов С.А., Голованов И.Н., Каштанов А.Н. Аэрокосмические средства и технологии для точного земледелия. М.: МСХА, 2008. 330 с.
5. Анализ экономической эффективности возделывания яровой пшеницы в системе точного земледелия / В.П. Якушев, П.В. Лекомцев, Т.С. Первак, В.В. Воропаев // Агрофизика. 2016. № 1. С. 43–52.
6. Якушев В.П., Якушев В.В. Информационное обеспечение точного земледелия. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2007. 384 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024683613 / В.Н. Максимова, Т.А. Макаровских, А.Э. Жулев, Н.Е. Левченко; УралГИС-Агро. Заявл. 26.09.2024; опубл. 14.10.2024.
8. EarthExplorer: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 16.01.2025).
9. Автоматизация идентификации залесенных территорий на основе ДЗЗ / Т.А. Макаровских, А.Э. Жулев, В.Н. Максимова, О.А. Дернова // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024): сб. науч. тр., 17–20 июня 2024 г., Москва / под общ. ред. Д.А. Новикова. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 2156–2160.
10. Интеллектуальная система мониторинга сельскохозяйственных земель региона (УралГис Агро) / В.Н. Максимова, Т.А. Макаровских, А.Э. Жулев, А.С. Макаровских // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (памяти проф. Н.И. Юсуповой) ITIDS'2024: тр. X Междунар. науч. конф. В 2 т. Уфа, 2024. Т. 1. С. 134–140.
11. Макаровских Т.А., Жулев А.Э., Максимова В.Н. Инструменты искусственного интеллекта как средство повышения качества мониторинга сельскохозяйственных угодий // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XXIV Междунар. науч.-практ. конф. М., 2024. С. 339–341.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023682961. Программный модуль для автоматизации идентификации залесенных территорий на основе ДЗЗ / В.Н. Максимова, Т.А. Макаровских, А.Э. Жулев, О.А. Дернова. № 2023682145; заявл. 26.10.2023; опубл. 01.11.2023.
13. Построение маршрута дрона для мониторинга урожайности сельскохозяйственных культур / Т.А. Макаровских, А.В. Панюков, Е.В. Ращупкин и др. // Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2023 (ЦИСП'2023): сб. науч. ст. Челябинск, 2024. С. 313–325.
14. Построение маршрута дрона для мониторинга урожайности сельскохозяйственных культур / Т.А. Макаровских, А.В. Панюков, Е.В. Ращупкин и др. // Приборы. 2024. № 8 (290). С. 1–11.
15. Кусяинова М.Д., Таменов Т.Б., Тойшиманов М.Р., Сыздық Ә.Б., Исакова Г., Нұрғали Н.Д. Динамический мониторинг NDVI в агрономических испытаниях агрокультур с использованием беспилотного летательного аппарата // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. 2023. № 2 (117). С. 148–161. DOI: 10.51452/kazatu.2023.2(117).1386

References

1. Pogonyshv V.A., Pogonysheva D.A., Torikov V.E. Neural networks in digital agriculture. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2021;5(87):68–71. (In Russ.) DOI: 10.52691/2500-2651-2021-87-5-68-71
2. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Matveenkov D.A. Objectives and goals of precision agriculture for national technology initiative implementation. *Agrofizika*. 2017;(1):51–65. (In Russ.)
3. Yakushev V.P. Digital technologies of precision farming in implementation of smart farming priority of Russian. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2019;(2):11–15. DOI: 10.30850/vrsn/2019/2/11-15
4. Rubtsov S.A., Golovanov I.N., Kashtanov A.N. *Aerokosmicheskie sredstva i tekhnologii dlya tochnogo zemledeliya* [Aerospace tools and technologies for precision farming]. Moscow: Moscow Agricultural Academy, 2008. 330 p. (In Russ.)
5. Yakushev V.P., Lekomcev P.V., Pervak T.S., Voropaev V.V. Analysis of the economic efficiency of spring wheat cultivation in the system of precision agriculture. *Agrofizika*. 2016;(1):43–52. (In Russ.)
6. Yakushev V.P., Yakushev V.V. *Informatsionnoe obespechenie tochnogo zemledeliya* [Information support for precision agriculture]. St. Petersburg: Petersburg Nuclear Physics Institute of the Russian Academy of Sciences Publ., 2007. 384 p. (In Russ.)
7. Maksimova V.N., Makarovskikh T.A., Zhulev A.E., Levchenko N.E.; UralGIS-Agro. Certificate of state registration of a computer program RU 2024683613, 10/14/2024. Application dated 09/26/2024. (In Russ.)
8. EarthExplorer: official website [Electronic resource]. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 16.01.2025).
9. Makarovskikh T.A., Zhulev A.E., Maksimova V.N., Dernova O.A. [Automation of identification of wooded territories based on remote sensing]. In: *XIV All-Russian Meeting on Management Problems (VSPU-2024): collection of scientific papers, June 17–20, 2024, Moscow*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2024. P. 2156–2160. (In Russ.)
10. Maksimova V.N., Makarovskikh T.A., Zhulev A.E., Makarovskikh A.S. Intelligent monitoring system for agricultural lands in the region (UralGIS Agro). In: *Information technologies for intellectual decision support (in memory of prof. N.I. Yusupova) ITIDS'2024. Proceedings of the X International Scientific Conference. In 2 volumes. Vol. 1*. Ufa, 2024. p. 134–140. (In Russ.)
11. Makarovskikh T.A., Zhulev A.E., Maksimova V.N. Artificial intelligence tools as a means of improving the quality of monitoring agricultural land. In: *New information technologies in education. Collection of scientific papers of the XXIV International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2024. P. 339–341. (In Russ.)
12. Maksimova V.N., Makarovskikh T.A., Zhulev A.E., Dernova O.A. *A software module for automating identification of wooded territories based on remote sensing*. Certificate of state registration of a computer program RU 2023682961, no. 2023682145; decl. 10/26/2023; publ. 11/01/2023. (In Russ.)
13. Makarovskikh T.A., Panyukov A.V., Rashchupkin E.V., Maksimova V.N., Dernova O.A. Building a drone route for crop yield monitoring. In: *Digital Industry: The State and Prospects of Development in 2023 (CISP'2023). Collection of scientific articles*. Chelyabinsk, 2024. P. 313–325. (In Russ.)
14. Makarovskikh T.A., Panyukov A.V., Raschupkin E.V., Maksimova V.N., Dernova O.A. [Building a drone route for crop yield monitoring]. *Devices*. 2024;8(290):1–11. (In Russ.)
15. Kusainova M.D., Tamenov T.B., Toishimanov M.R., Syzdyk A.B., Iskakova G., Nurgali N.D. Dynamic monitoring of NDVI in agronomic testing of agro crops using an unmanned aerial vehicle. *Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agro Technical University*. 2023;2(117):148–161. (In Russ.) DOI: 10.51452/kazatu.2023.2(117).1386

Информация об авторах

Максимова Валентина Николаевна, канд. пед. наук, доц., директор Научно-образовательного центра «Геоинформационные системы», доц. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, maksimovavn@susu.ru.

Макаровских Татьяна Анатольевна, д-р физ.-мат. наук, доц., проф. кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, makarovskikh.t.a@susu.ru.

Information about the authors

Valentina N. Maksimova, Cand. Sci. (Education), Ass. Prof., Director of Scientific and Educational Center “Geoinformation Systems”, Ass. Prof. of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, maksimovavn@susu.ru.

Tatiana A. Makarovskikh, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, makarovskikh.t.a@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 27.04.2025

The article was submitted 27.04.2025

ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА НИКОЛАЕВИЧА БУРКОВА

IN MEMORY OF VLADIMIR NIKOLAEVICH BURKOV



24 апреля 2025 года ушел из жизни Владимир Николаевич Бурков, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, почётный член и один из основателей СОВНЕТ, всемирно известный ученый, создатель теории активных систем, основатель Лаборатории активных систем Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, первый ассессор IPMA, автор более 500 публикаций в различных российских и зарубежных изданиях на темы теории активных систем, управления проектами, дискретной оптимизации, менеджмента.

Владимир Николаевич на протяжении многих лет плодотворно работал в качестве заместителя главного редактора журнала «Вестник Южно-Уральского государственного

университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника», принимал участие в работе созданного на базе ЮУрГУ диссертационного совета 24.2.437.02, участвовал в открытии на базе Южно-Уральского государственного университета научно-образовательного центра Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.

Редакция журнала выражает искренние соболезнования родным и близким. Светлая память о Владимире Николаевиче навсегда останется в сердцах тех, кто знал его, работал и общался с ним.

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 подраз рубрики. 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 ВИНТИ. 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 диссертаций 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»
2025. Том 25, № 3

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.07.2025. Дата выхода в свет 25.08.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,95. Тираж 500 экз. Заказ 180/188. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.