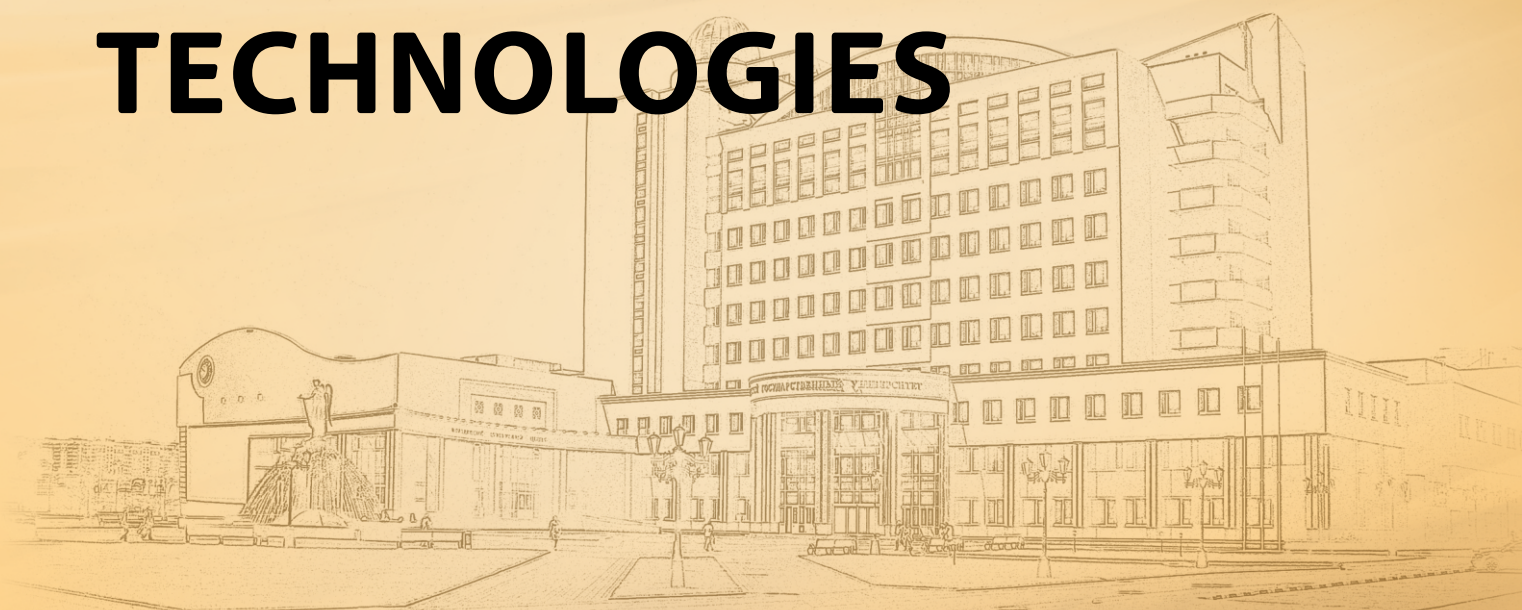


НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ЭКОНОМИКА. ИНФОРМАТИКА

SCIENTIFIC JOURNAL

ECONOMICS. INFORMATION TECHNOLOGIES



2025. Том 52, № 3



ЭКОНОМИКА. ИНФОРМАТИКА

2025. Том 52, № 3

До 2020 г. журнал издавался под названием «Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика».

Основан в 1995 г.

Журнал включен в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.4. Управление в организационных системах; 2.3.8. Информатика и информационные процессы; 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика; 5.2.4. Финансы; 5.2.6. Менеджмент). Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Издатель: НИУ «БелГУ». Адрес издателя: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

Е.Г. Желяков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий института инженерных и цифровых технологий (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Заместитель главного редактора

Е.А. Стрякова, доктор экономических наук, доцент, заведующая кафедрой прикладной экономики и экономической безопасности института экономики и управления (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Ответственные секретари

Ю.В. Лыщикова, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры прикладной экономики и экономической безопасности института экономики и управления (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Е.В. Болгова, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий института инженерных и цифровых технологий (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

Члены редколлегии:

А.В. Богомолов, доктор технических наук, профессор (Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Минобороны России, Москва, Россия)

О.В. Ваганова, доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой инновационной экономики и финансов института экономики и управления (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

М.В. Владыка, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры прикладной экономики и экономической безопасности, заместитель директора по научной работе института экономики и управления (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

В.П. Волчков, доктор технических наук, профессор (Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия)

В.П. Воронин, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры торгового дела и товароведения (Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия)

В.С. Голиков, доктор технических наук, профессор (Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Мексика)

О.А. Ивацук, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой информационных и робототехнических систем (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

А.В. Коськин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и цифровых технологий (Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия)

Н.А. Кулагина, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры государственного управления, экономической и информационной безопасности, директор инженерно-экономического института (Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия)

А.С. Молчан, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры бизнес-аналитики (Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия)

Т.В. Никитина, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры банков, финансовых рынков и страхования, директор Международного Центра исследований финансовых рынков (Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия)

А.А. Сирота, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий обработки и защиты информации (Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия)

В.Б. Сулимов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия)

В.М. Тумин, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента (Московский политехнический университет, Москва, Россия)

Т.Л. Тен, доктор технических наук, профессор, проректор по цифровым технологиям и инновациям (Карагандинский экономический университет Казпотребсоюза, Караганда, Казахстан)

А.А. Черноморец, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий института инженерных и цифровых технологий (НИУ «БелГУ», Белгород, Россия)

ISSN 2687-0932

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77-77834 от 31.01.2020.

Выходит 4 раза в год.

Выпускающий редактор Ю.В. Мишенина. Корректур, компьютерная верстка и оригинал-макет Ю.В. Мишенина. Редактор англоязычных текстов Е.С. Данилова. Гарнитура Times New Roman, Arial Narrow, Arial. Уч.-изд. л. 27,3. Дата выхода 30.09.2025. Оригинал-макет подготовлен центром полиграфического производства НИУ «БелГУ». Адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕГИОНАЛЬНАЯ И МУНИЦИПАЛЬНАЯ ЭКОНОМИКА

- 489 **Дмитриева Л.В.**
Городские токены как инструмент развития территорий
- 499 **Мельников В.В.**
Потенциал агломерационных процессов в регионах России: параметры и уровень
- 513 **Селезнев П.С., Вуйменков С.А., Худокормов Г.А., Белик В.Н.**
Методический инструментарий выявления приоритетов развития малых городов на основе матриц отраслевой инновационно-технологической специализации

ИНВЕСТИЦИИ И ИННОВАЦИИ

- 528 **Оборин М.С., Терентьев А.И.**
Тренды и ограничения развития инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг
- 539 **Растопчина Ю.Л., Ковалева Е.И.**
Цифровизация в странах БРИКС: сравнительный обзор и рейтинговая диагностика

ОТРАСЛЕВЫЕ РЫНКИ И РЫНОЧНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА

- 557 **Кучерявенко С.А., Тищенко Б.Ю., Жариков Р.В., Назарова А.Н.**
Российский рынок фитнес-услуг: структурные трансформации, тенденции развития, сезонная динамика и эффективные инструменты маркетинга
- 565 **Пашенцев В.Д., Старикова М.С.**
Экосистемная кластеризация авиационной промышленности: синтез моделей для обеспечения устойчивости развития
- 579 **Романюк Е.В.**
Особенности развития и поддержки малого предпринимательства в Республике Крым
- 593 **Тарасенко Э.В.**
Медицинский туризм в контексте региональной и отраслевой экономики: эволюция публикаций и прогнозирование их цитируемости методами машинного обучения

ФИНАНСЫ ГОСУДАРСТВА И ПРЕДПРИЯТИЙ

- 612 **Кириллова Н.В., Мединец О.Д.**
Новые технологии российских страховщиков в бизнес-процессах создания и дистрибуции страховых продуктов и услуг

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- 623 **Дубровин А.С., Сумин В.И., Кравченко А.С.**
Системное моделирование отталкивания с радиационным трением точечных зарядов на основе классического гармонического анализа

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ

- 642 **Зимовец О.А., Малкуш Е.В., Маторин С.И., Жихарев А.Г.**
Преобразование диаграммы BPMN в УФО-диаграмму
- 654 **Волкова О.Н., Поначугин А.В., Тимофеева Е.А.**
Организационные аспекты управления ИТ-проектами
- 665 **Маренков Я.А., Ломакин А.С., Донская А.Р., Панина А.А.**
Использование методов машинного обучения для решения задачи предсказания развития отклонений в живых системах
- 681 **Конев К.А.**
Поддержка принятия решений о качестве работы оборудования на машиностроительном предприятии на основе интеллектуальных методов
- 697 **Еремин Д.В., Польщиков К.А., Маматов А.В.**
Метод прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий на основе нечеткого логического вывода

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- 710 **Болгов Д.А., Деменков Д.В., Донская А.Р., Орлова Ю.А., Зубков А.В.**
Вычисление в видеопотоке пространственно-временных характеристик объектов посредством использования методов фотограмметрии и компьютерного зрения
- 726 **Ширяев А.А., Олейник И.И., Сидоренко И.А., Урсол Д.В.**
Применение методов представления данных образами-остатками при передаче и обработке информации в современных телекоммуникационных системах
- 735 **Кукушкин С.С., Кукушкин Л.С., Махов Ф.С., Головкин М.В.**
Инновационные методы распараллеленной передачи и обработки измерительной информации, основанные на использовании конструктивной теории конечных полей

ECONOMICS. INFORMATION TECHNOLOGIES

2025. Volume 52, No. 3

Until 2020, the journal was published with the name "Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies".

Founded in 1995

The journal is included into the List of Higher Attestation Commission of peer-reviewed scientific publications where the main scientific results of dissertations for obtaining scientific degrees of a candidate and doctor of science should be (1.2.2. Mathematical Modeling Numerical Methods and Program Complexes; 2.3.1. The System Analysis, Management and Information Processing; 2.3.3. Automation and Control of Operating Processes and Manufacturing; 2.3.4. Control in Operational Systems; 2.3.8. Informatics and Information Processes; 5.2.3. Regional and sectoral economy; 5.2.4. Finance; 5.2.6. Management). The journal is introduced in Russian Science Citation Index (RSCI).

Founder: Federal state autonomous educational establishment of higher education "Belgorod National Research University".

Publisher: Belgorod National Research University «BelSU». Address of publisher: 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia.

EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL

Editor-in-Chief

E.G. Zhilyakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Institute of Engineering and Digital Technologies (BSU, Belgorod, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

E.A. Stryabkova, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Economics and Economic Security, Institute of Economics and Management (BSU, Belgorod, Russia)

Editorial Assistants:

Y.V. Lyshchikova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Economics and Economic Security, Institute of Economics and Management (BSU, Belgorod, Russia)

E.V. Bolgova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technology, Institute of Engineering and Digital Technologies (BSU, Belgorod, Russia)

Members of Editorial Board:

A.V. Bogomolov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia)

O.V. Vaganova, doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Economy and Finance of the Institute of Economics (BSU, Belgorod, Russia)

M.V. Vladyka, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Applied Economics and Economic Security, Deputy Director for Research of the Institute of Economics and Management (BSU, Belgorod, Russia)

V.P. Volchikov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia)

V.P. Voronin, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Trade and Commodity Science (Voronezh State University of Engineering Technology, Voronezh, Russia)

V.S. Golikov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Mexico)

O.A. Ivashchuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information and Robotic Systems (BSU, Belgorod, Russia)

A.V. Koskin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies (Oryol State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia)

N.A. Kulagina, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of Department of public administration, economic and information security, Director of the Engineering and Economic Institute (Bryansk State Technological University of Engineering, Bryansk, Russia)

A.S. Molchan, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Business Analytics (Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia)

T.V. Nikitina, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of Department of banks and financial markets and insurance, Director of the International Center for Financial Market Research (Saint-Petersburg State University of Economics, Saint-Petersburg, Russia)

A.A. Sirota, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Processing and Protection of Information (Voronezh State University, Voronezh, Russia)

V.B. Sulimov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, (Lomonosov Moscow State University, Research Computer Center, Moscow, Russia)

V.M. Tumin, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of management (Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia)

T.L. Ten, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Digital Technologies and Innovations (Karaganda Economic University of Kazpotreboysuz, Karaganda, Kazakhstan)

A.A. Chernomorets, Doctor of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Applied Informatics and Information Technology, Institute of Engineering and Digital Technologies (BSU, Belgorod, Russia)

ISSN 2687-0932

The journal has been registered at the Federal service for supervision of communications information technology and mass media (Roskomnadzor). Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77-77834 dd 31.01.2020.

Publication frequency: 4 times per year

Commissioning Editor Y.V. Mishenina. Proofreading, computer imposition, page layout by Y.V. Mishenina. English text editor E.S. Danilova. Typeface Times New Roman, Arial Narrow, Arial. 27.3 publishing sheets. Date of publishing 30.09.2025. Dummy layout has been prepared by Belgorod National Research University Centre of Polygraphic Production. Address: 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia

CONTENTS

REGIONAL AND MUNICIPAL ECONOMY

- 489 **Dmitrieva L.V.**
City Tokens as a Tool for Territorial Development
- 499 **Melnikov V.V.**
The Potential of Agglomeration Processes in the Regions of Russia: Parameters and Level
- 513 **Seleznev P.S., Vuymenkov S.A., Khudokormov G.A., Belik V.N.**
Methodological Tools for Identifying Town Development Priorities Based on Matrices of Sectoral Innovation and Technological Specialization

INVESTMENTS AND INNOVATIONS

- 528 **Oborin M.S., Terentyev A.I.**
Development of the Innovative and Integration Potential of the Educational Services Market: Trends and Limitations
- 539 **Rastopchina Yu.L., Kovaleva E.I.**
Digitalization in the BRICS Countries: a Comparative Review and Rating Diagnostics

SECTORAL MARKETS AND MARKET INFRASTRUCTURE

- 557 **Kucheryavenko S.A., Tishchenko B.Yu., Zharikov R.V., Nazarova A.N.**
The Russian Market of Fitness Services: Structural Transformations, Development Trends, Seasonal Dynamics and Effective Marketing Tools
- 565 **Pashentsev V.D., Starikova M.S.**
Ecosystem Clustering of the Aviation Industry: Synthesis of Models for Sustainable Development
- 579 **Romanyuk E.V.**
Features of Development and Support of Small Business in the Republic of Crimea
- 593 **Tarasenko E.V.**
Medical Tourism in the Context of Regional and Sectoral Economies: Evolution of Publications and Prediction of their Citation Rates Using Machine Learning Methods

FINANCES OF THE STATE AND ENTERPRISES

- 612 **Kirillova N.V., Medinets O.D.**
New Technologies of Russian Insurers in the Business Processes of Creating and Distributing Insurance Products and Services

COMPUTER SIMULATION

- 623 **Dubrovin A.S., Sumin V.I., Kravchenko A.S.**
Systemic Modeling of Repulsion with Radiative Friction of Point Charges Based on Classical Harmonic Analysis

SYSTEM ANALYSIS AND MANAGEMENT

- 642 **Zimovets O.A., Malkush E.V., Matorin S.I., Zhikharev A.G.**
Converting a BPMN Diagram to a UFO Diagram
- 654 **Volkova O.N., Ponachugin A.V., Timofeeva E.A.**
Organizational Aspects of IT Project Management
- 665 **Marenkov Ya.A., Lomakin A.S., Donsckaia A.R., Panina A.A.**
Applying Machine Learning Methods to Solve the Problem of Predicting the Progression of Abnormalities in Living Systems
- 681 **Konev K.A.**
Support for Decision-Making on the Quality of Equipment Operation at a Mechanical Engineering Enterprise Based on Intelligent Methods
- 697 **Eremin D.V., Polshchikov K.A., Mamatov A.V.**
Method for Predicting the Duration of Major Repairs of Buildings Based on Fuzzy Logical Inference

INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

- 710 **Bolgov D.A., Demenkov D.V., Donsckaia A.R., Orlova Yu.A., Zubkov A.V.**
Calculation of Spatial and Temporal Characteristics of Objects in a Video Stream Using Photogrammetry and Computer Vision Methods
- 726 **Shiryayev A.A., Oleynik I.I., Sidorenko I.A., Ursol D.V.**
Application of Data Representation Methods Using Residue Images for Transmitting and Processing Information in Modern Telecommunication Systems
- 735 **Kukushkin S.S., Kukushkin L.S., Makhov F.S., Golovko M.V.**
Innovative Methods of Parallelized Transmission and Processing of Measurement Information Based on Using Constructive Finite Field Theory

РЕГИОНАЛЬНАЯ И МУНИЦИПАЛЬНАЯ ЭКОНОМИКА REGIONAL AND MUNICIPAL ECONOMY

УДК 332.14

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-489-498

EDN AEJICU

Городские токены как инструмент развития территорий

Дмитриева Л.В.

Ивановский государственный университет
Россия, 153025, Иваново, ул. Ермака, д. 39
ludmilavd@yandex.ru

Аннотация. Статья исследует потенциал блокчейн-технологий для развития территорий через цифровые активы. В фокусе анализа – функциональные возможности городских токенов как инструмента привлечения инвестиций, оптимизации управления и вовлечения населения. Рассмотрены международные (Япония, США) и российские практики, включая токенизацию арендных платежей и музейные NFT-проекты. Особое внимание уделено типам токенов и их применению в инфраструктурном финансировании, поддержке бизнеса и экологических инициативах. Результаты исследования демонстрируют широкие возможности городских токенов для повышения прозрачности управления, снижения транзакционных издержек и создания новых финансовых механизмов. В заключение подчеркивается необходимость адаптации нормативно-правовой базы и развития цифровой грамотности для масштабирования подобных практик в России.

Ключевые слова: городские токены, блокчейн, цифровая экономика, территориальное развитие, NFT-проект, инвестиции, муниципальное управление

Для цитирования: Дмитриева Л.В. 2025. Городские токены как инструмент развития территорий. *Экономика. Информатика*, 52(3): 489–498. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-489-498. EDN AEJICU

City Tokens as a Tool for Territorial Development

Lyudmila V. Dmitrieva

Ivanovo State University
39 Ermak St., Ivanovo 153025, Russia
ludmilavd@yandex.ru

Abstract. The article explores the potential of blockchain-based digital assets to stimulate socio-economic growth in cities and regions. The study examines the nature and functional features of urban tokens, their role in attracting investments, optimizing resource management, and engaging citizens in territorial development processes. The author analyzes international and Russian case studies of tokenized solutions, including examples from Miami, California and Japan as well as Russian initiatives such as the tokenization of commercial real estate rental income and museum NFT projects. Special attention is given to the classification of tokens (fungible, NFTs, security, utility) and their applications in various fields: infrastructure financing, small business support, and environmental and cultural project management. The research findings highlight the broad potential of urban tokens to enhance governance transparency, reduce transaction costs, and create new financial mechanisms. The conclusion emphasizes the need for regulatory adaptation and digital literacy development to scale such practices in Russia.



Keywords: urban tokens, blockchain, digital economy, territorial development, NFT, investments, municipal governance

For citation: Dmitrieva L.V. 2025. City Tokens as a Tool for Territorial Development. *Economics. Information technologies*, 52(3): 489–498 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-489-498. EDN AEJICU

Введение

В условиях растущей конкуренции между территориями за инвестиции, человеческий капитал и экономическую активность города вынуждены искать инновационные инструменты привлечения ресурсов и стимулирования развития. Одним из таких инструментов могут стать городские токены – цифровые активы, основанные на технологии блокчейн, которые способны трансформировать традиционные модели финансирования и управления городской экономикой. Их применение открывает новые возможности для децентрализованного привлечения инвестиций, создания локальных экономических экосистем, повышения эффективности бюджетного управления, а также снижения транзакционных издержек в целях привлечения заемных средств.

Актуальность исследования экономических аспектов городских токенов обусловлена их потенциалом в решении ключевых проблем территориального развития, таких как:

- ограниченность традиционных источников финансирования инфраструктурных проектов;

- низкая вовлеченность частного капитала в развитие городской среды;

- стимулирование внутреннего спроса и поддержка малого бизнеса.

Несмотря на растущий практический интерес к городским токенам как инструменту экономического развития территорий, их теоретическое осмысление остается фрагментарным.

Целью настоящего исследования является анализ современной российской и мировой практики использования «токенизации» и обоснование предложений по возможностям внедрения современных технологий блокчейн с выпуском токенов для привлечения инвестиций на территорию и повышения эффективности государственного и муниципального управления.

Задачами исследования являются:

- 1) определение сущности городских токенов в контексте цифровой экономики и современных технологий;

- 2) анализ зарубежного и отечественного опыта внедрения городских токенов;

- 3) исследование потенциала применения городских токенов для социально-экономического развития территорий.

Рабочая гипотеза исследования состоит в обосновании новых возможностей развития территории и финансовых источников за счет процессов токенизации.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются городские токены – цифровые активы, выпускаемые при поддержке локальных сообществ для стимулирования экономического и социального развития территорий.

Настоящее исследование подготовлено в результате изучения научных публикаций, нормативных документов и концепций цифровых валют, опыта токенизации активов с использованием методов теоретического и сравнительного анализа зарубежного и российского опыта внедрения городских токенов, метода case-study – детального разбора конкретных кейсов, а также методов системного и критического анализа, индукции, дедукции, обобщения и аналогии.

Анализ научной литературы демонстрирует выраженную технологическую направленность исследований на изучение цифровых инноваций в сфере государственного управления. В частности, рассматриваются возможности применения блокчейн-технологий для оптимизации городского управления, деятельности государственных органов, а также решения задач публичного администрирования и предоставления государственных услуг. Параллельно исследуются перспективы внедрения искусственного интеллекта в процессы принятия управленческих решений [Ходько, Никитченко, 2024], что свидетельствует о растущем интересе научного сообщества к цифровой трансформации государственного сектора. В контексте регионального развития исследуются и сопоставляются уровни цифровизации и развития цифровой среды регионов [Усков, 2024]. В рамках проведенного анализа литературы сформулирован вывод о значительном потенциале повышения эффективности государственного управления за счет внедрения современных технологических решений. Подчеркивается необходимость увеличения объемов инвестирования в развитие цифровой инфраструктуры, а также важность реализации программ по формированию цифровых компетенций среди сотрудников государственных органов.

В рамках исследований финансовых аспектов блокчейн-технологий особое внимание уделяется анализу функциональных характеристик и механизмов интеграции криптовалют в финансовую систему [Ярмоленко, Вerveйко, 2024]. Приоритетным направлением анализа выступает оценка потенциальных макроэкономических эффектов от внедрения цифрового рубля [Artemyeva et al, 2024], включая его влияние на монетарную политику и финансовую стабильность. Параллельно рассматриваются перспективные векторы влияния криптоиндустрии [Чередниченко и др., 2024] на экономический рост Российской Федерации, в частности: трансформация платежных систем; развитие финансовых технологий и формирование новых инвестиционных механизмов; использование ИИ-технологий для предотвращения мошенничеств [Бабанская и др., 2025].

Наряду с этим большое внимание уделяется исследованиям потенциала и ограничений внедрения блокчейн-технологий, криптовалют и токенизации в отдельных секторах экономики. В части процессов токенизации особое внимание уделяется анализу механизмов привлечения инвестиционных ресурсов в сельскохозяйственный сектор [Еремин, Фарманов, 2024], вопросам интеграции в экономический оборот интеллектуальных активов посредством их «упаковки» в токены [Люсева, 2024].

Отечественные ученые С.В. Кибальников, В.И. Кружалин (*МГУ имени М.В. Ломоносова*) обращали внимание на возможности использования технологий блокчейн для развития малых городов и исторических поселений начиная с 2019 года [Кибальников, Кружалин, 2019].

Мировой опыт показывает, что токенизация городских активов и сервисов способна стать драйвером экономического роста, однако в России этот механизм пока изучен недостаточно хорошо.

Цифровые валюты, такие как Bitcoin, Ethereum и другие, представляют собой форму электронной валюты, которая использует криптографию для обеспечения безопасности транзакций и контроля создания новых единиц. Они основаны на технологии блокчейн, которая является децентрализованной базой данных, хранящей информацию о всех совершенных транзакциях. Токены, в свою очередь, являются цифровыми активами, созданными на основе блокчейн-технологии. Они могут иметь различные функциональные назначения, такие как представление доли владения чем-либо (недвижимость, компания и т. д.), участие в голосованиях или даже использование в качестве внутренней валюты в децентрализованных приложениях [Салаев, 2024].

Токен представляет собой цифровой объект, характеризующийся уникальным идентификатором, набором программируемых свойств (правил) и криптографической защитой [Андрюшин, 2024]. Разработаны и действуют стандарты токенов – это набор правил, которые позволяют разрабатывать криптовалютные токены на различных протоколах блокчейн



[Каковы основные стандарты токенов Ethereum ERC? Электронный ресурс]. Эти стандарты предусматривают следующие типы токенов:

1) взаимозаменяемые токены (Fungible Tokens, FT) [ERC-20 Token Standard. Электронный ресурс] – обладают свойством взаимозаменяемости и однородности, где каждая единица идентична по стоимости и правовому статусу (например, криптовалюты);

2) невзаимозаменяемые токены (Non-Fungible Tokens, NFT) [ERC-721 Token Standard. Электронный ресурс] – уникальные цифровые активы, не подлежащие взаимозамене, представляющие индивидуальные объекты (произведения искусства, недвижимость);

3) инвестиционные токены (Security/Investment Tokens) – цифровые финансовые инструменты, которые могут включать токенизированные акции, долговые обязательства, обеспеченные активами токены, дивидендные токены;

4) утилитарные токены (Utility Tokens) – обеспечивают доступ к товарам/услугам в рамках экосистемы, имеют следующие функциональные подтипы: платежные, расчетные, управления, доступа.

Инвестиционные и утилитарные токены могут создаваться в формате первого и второго типов. При этом невзаимозаменяемые токены (NFT) представляют собой уникальное явление, не имеющее аналогов в повсеместно действующей платежной системе. Это экономический термин, описывающий такие вещи, как песни, образовательные сертификаты, произведения искусства и т. п. Существует лишь несколько публикаций о NFT, их эволюции, применении и проблемах. При этом отмечается большой потенциал использования NFT в таких сферах, как здравоохранение, подтверждение личности, сельское хозяйство, защита интеллектуальной собственности, «умные» города, благотворительность и пожертвования, а также в сфере образования [Razi, 2024].

Передача права собственности на физический или цифровой объект в виде цифрового токена называется *токенизацией активов*.

Токенизация активов – это процесс трансформации учета и управления активами, в котором каждый актив представляется в виде программируемого цифрового токена. При этом программируемые токены могут представлять собой небольшую часть (долю) любого реального актива [Андрюшин, 2024].

Городские власти могут использовать токены (цифровые активы на блокчейне) для развития города несколькими способами, сочетая технологические инновации с экономическими и социальными инициативами.

Результаты исследования

Зарубежный опыт использования токенов в развитии городов

Существуют различные международные практики использования токенов для привлечения инвестиций и финансирования проектов.

1. В 2021 году мэр Майами (США) предложил создать собственный токен для города, который будет использоваться для привлечения инвестиций и поддержки местного бизнеса. Это включает в себя возможность использования токенов для голосования по вопросам местного самоуправления [Власти Майами объявили о запуске собственной криптовалюты. Электронный ресурс]. В США действует платформа CityCoins [Общие ресурсы. Электронный ресурс], которая дает сообществам возможность улучшать свои города, одновременно предоставляя крипто-вознаграждения как отдельным вкладчикам, так и городским властям.

2. Существует мировая платформа геотокенов [О проекте GEOTOKENS. Электронный ресурс], основанная на концепции токенизации, в рамках которой осуществляется создание цифрового представления городов на блокчейне. Каждое географическое пространство делится на фиксированное количество токенов, пропорциональное численности населения данного региона, что обеспечивает уникальность и ценность каждого токена. Владение токенами предоставляет индивидам возможность ощущать себя собственниками и

устанавливать эмоциональную связь с местами, которые они ценят и которыми восхищаются. В настоящее время геотокены выпущены на 58 городов мира, включая Москву.

3. Формирование нормативно-правовой базы, регулирующей обращение криптовалютных активов в Японии, началось в 2017 году с принятия поправки к Закону о платежных услугах (Payment Services Act) [Японский рынок Web3 в 2024 году: государственная политика, корпоративные тенденции и перспективы на 2025 год. Электронный ресурс]. Данная законодательная инициатива легитимизировала криптовалюты (включая биткойн) в качестве законного платежного средства, закрепив их статус как категории цифровых активов.

В городе Митака реализуется экспериментальный проект «Родной налоговый проект токенов NFT» (Hometown Tax NFT Project), разработанный в партнерстве с футбольным клубом FC Токио. В рамках проекта донорам, вносящим целевые налоговые платежи в бюджет муниципалитета, предоставляются эксклюзивные невзаимозаменяемые токены (NFT), представляющие собой цифровые художественные произведения, созданные совместно с клубом. Данная модель стимулирует филантропическую активность граждан, сочетая механизмы краудфандинга с цифровыми технологиями.

Муниципалитет города Окутама внедряет модель краудфандинга на основе блокчейн-токенов, предназначенную для сохранения и развития туристического потенциала региона. В рамках программы эмитируются цифровые токены, средства от размещения которых направляются на реконструкцию традиционных японских домов под гостиничные и ресторанные объекты. Данный подход позволяет привлекать инвестиции в локальную экономику, обеспечивая стейкхолдерам возможность участия в проектах территориального развития.

4. Сан-Хосе (Калифорния, США) реализует пилотный проект цифровой инклюзии с использованием криптовалютных технологий. Согласно муниципальному коммюнике [Сан-Хосе хочет финансировать интернет для малообеспеченного населения с помощью Helium (HNT). Электронный ресурс], программа предусматривает:

- финансирование интернет-доступа для 1300 малоимущих домохозяйств через единовременные субсидии;
- генерацию средств посредством майнинга токенов HNT в сети Helium;
- развертывание 20 узлов сети на базе коммерческих и волонтерских площадок для майнинга.

Российский опыт и возможности использования токенизации в развитии территорий

В России на современном этапе отмечаются первые эксперименты по использованию токенов в развитии городов и регионов, а также при реализации экосистемных и инфраструктурных проектов.

Одним из примеров, реализованных в России, является токенизация арендных доходов объектов коммерческой недвижимости, в частности торгово-развлекательного центра KazanMall. Механизм данного финансового продукта предполагает доходность на уровне 14,5 % годовых без ограничения предельной доходности. Стоимость одного цифрового финансового актива (ЦФА) составляет 5 500 руб., при этом предельный объем размещения превышает 350 млн руб., а срок обращения цифрового актива установлен на один год. Защита прав инвесторов осуществляется посредством ежемесячного перечисления арендных потоков от эмитента на заложенный счет в банке, что обеспечивает целевое использование данных средств для выплат инвесторам. ЦФА доступны исключительно для квалифицированных инвесторов [На платформе А-Токен впервые токенизировали квадратные метры коммерческой недвижимости. Электронный ресурс]. На конец I квартала 2025 года в России обращалось 998 ЦФА и иных цифровых прав на 293,5 млрд руб. [Рынок ЦФА может вырасти до 1,7 трлн руб. к 2028 году. Электронный ресурс].



«Санкт-Петербург Heritage NFT» – это первый музейный NFT-проект в России, реализуемый Эрмитажем. Средства от продажи токенов направляются на реставрацию картин [Вы инвестируете? Эрмитаж реставрирует: как работает первый музейный NFT проект в России. Электронный ресурс]. Это пример краудфандингового проекта на социально значимые цели. Проект может быть тиражирован для реконструкции или реставрации объектов культурного наследия, музеев, значимых для развития малых городов территорий.

В России на момент проведения исследования практика токенизации только начала использоваться хозяйствующими субъектами.

Обсуждение результатов

По результатам анализа зарубежного и российского опыта реализации проектов токенизации в целях развития территорий, а также обширного изучения материалов о запуске таких проектов в средствах массовой информации можно выделить следующие основные направления возможного использования токенов в региональном и городском развитии.

1. Финансирование коммерческих проектов:

- город объявляет и продает свои обязательства (займы) в целях финансирования инфраструктуры (метро, школы, парки), а инвесторы получают проценты;
- предлагается долевое владение в городской недвижимости или коммерческих проектах (например, выставочно-ярмарочных конструкциях, парках), позволяющее жителям инвестировать в развитие района.

Для привлечения инвестиций в городские проекты можно выделить несколько видов токенов, каждый из которых решает конкретные задачи и соответствует определенному типу инвесторов:

1) токенизированные облигации (*Security Tokens*):

- город выпускает цифровые облигации на блокчейне, представляющие долговые обязательства;
- инвесторы покупают токены и получают фиксированный доход в рублях (или в процентах от проекта);
- погашение происходит автоматически через смарт-контракты.

Преимуществами данного метода является его соответствие привычной для консервативных инвесторов модели, а также его соответствие закону «О цифровых финансовых активах» (ЦФА) [Федеральный закон РФ, 2020];

2) инвестиционные долевые токены (*Equity Tokens*):

- дают право на долю в доходе от городского проекта (например, платной парковки, выставочно-ярмарочных конструкций, электрозаправок, выставочного центра, концертного зала);
- механизм аналогичен долевого участию (владению акциями), но на блокчейне.

При этом в настоящее время в Российской Федерации существует прямой запрет на осуществление операций с акциями в цифровом формате;

3) финансирование культурных проектов:

- город выпускает NFT (например, цифровые копии памятников, билеты на эксклюзивные мероприятия);
- инвесторы покупают их как коллекционные активы или для перепродажи.

2. Стимулирование местной экономики:

- локальная система лояльности: городские токены принимаются в местных магазинах, кафе и транспорте, стимулируя малый бизнес;
- cashback для туристов: гости получают токены за посещение музеев или отелей, которые можно потратить на другие услуги.

3. Увеличение вовлеченности жителей в участие в городских проектах:

- гражданские решения: жители могут голосовать за проекты (парки, дороги, культурные мероприятия) с помощью токенов;

– поощрение активности: токены выдаются за участие в субботниках, волонтерстве или экологических инициативах, а затем обмениваются на льготы (скидки на парковку, в магазинах).

4. Управление ресурсами:

– экотокены: жители получают токены за сортировку мусора и сдачу отдельных фракций (макулатура, стекло, металл) для дальнейшей переработки, которые можно обменять на налоговые льготы, например, по транспортному или земельному налогу, либо токены на вывоз мусора;

– плата за услуги: оплата парковок, электрозаправок, аренды велосипедов / самокатов.

5. Привлечение туристов и популяризация культурного наследия:

– оцифровка памятников в виде NFT с возможностью инвестирования или коллекционирования;

– создание виртуальных двойников города: токены дают доступ к цифровым экскурсиям или участию в мероприятиях (например, профильные мастер-классы).

На наш взгляд, токенизация городских активов, например, стадионов, – это перспективное направление для городских властей, позволяющее привлекать инвестиции, повышать вовлеченность болельщиков и оптимизировать управление объектами.

В целом необходимо отметить обширный перечень направлений возможного использования токенов для развития городской экономики, инфраструктуры и вовлечения стейкхолдеров в реализацию значимых территориальных проектов. При этом потенциальными инвесторами могут быть не только местные жители и бизнес, но и, например, «выходцы» с территории, желающие помочь развитию «малой родины».

Заключение

Инструменты выпуска токенов могут стать важным источником пополнения средств городских бюджетов на реализацию мероприятий, поддерживаемых гражданами. Токены могут превратить город в «цифровой хаб», где технологии улучшают качество жизни, экономику и прозрачность управления.

Необходимыми мерами для обеспечения возможности использования токенов для развития городов в России являются масштабные образовательные программы для населения и потенциальных инвесторов в цифровые активы. Наряду с этим в целях распространения практик совместного инвестирования граждан в городскую инфраструктуру и поощрения участия граждан в реализации социально значимых городских проектов потребуются дополнительные уточнения в законодательство. Центральному банку России предстоит создать правовое регулирование выпуска муниципальных токенов, в частности правил их эмиссии, учета и обращения, регулирование для криптобирж и NFT-маркетплейсов, работающих с государственными токенами; сформировать требования к платформам выпуска и торговли токенами.

Но уже сейчас очевидно, что новые технологии создают новые возможности финансовой архитектуры, снижая транзакционные издержки, повышая прозрачность расходования средств и возможности вовлечения частного капитала в проекты городского развития. Целью дальнейших исследований является выявление успешных примеров использования токенов для трансформации этого опыта в сферу государственного и муниципального управления. При этом предстоит большая правовая работа по нормативно-правовому урегулированию этих процессов.

В контексте пространственного развития токенизация активов приобретает особую значимость, выступая катализатором экономического роста территорий. Данный механизм способствует привлечению инвестиционной ликвидности в региональные экономические системы, одновременно повышая прозрачность управления объектами недвижимости, инфраструктурными активами и другими ресурсами территориального развития.

Ключевое значение токенизации для городской и региональной экономики заключается в оптимизации транзакционных издержек при операциях с имущественными комплексами, а также в создании условий для интеграции местных активов в децентрализованные



финансовые экосистемы. Это открывает новые возможности для финансирования городских проектов через механизмы фракционного владения и комбинирования цифровых активов, что особенно актуально для реализации крупномасштабных инфраструктурных инициатив и программ территориального развития.

Список источников

- Власти Майами объявили о запуске собственной криптовалюты. 2021. URL: <https://tass.ru/ekonomika/12075959> (дата обращения: 06.08.2025).
- Вы инвестируете? Эрмитаж реставрирует: как работает первый музейный NFT проект в России. 2024. URL: <https://www.thesymbol.ru/art/iskusstvo/vy-investiruete-ermitaj-restavriuet-kak-rabotaet-pervyi-muzeinyi-nft-proekt-v-rossii/> (дата обращения: 11.06.2025).
- Каковы основные стандарты токенов Ethereum ERC? 2022. URL: <https://www.gate.com/ru/learn/articles/what-are-the-main-ethereum-erc-token-standards/53> (дата обращения: 11.06.2025).
- На платформе А-Токен впервые токенизировали квадратные метры коммерческой недвижимости. 2024. URL: <https://alfabank.ru/news/t/release/na-platforme-a-token-vpervie-tokenizirovali-kvadratnie-metri-kommercheskoi-nedvizhimosti/> (дата обращения: 11.06.2025).
- Общие ресурсы. 2024. URL: <https://docs.citycoins.co/citycoins-resources/general> (дата обращения: 11.06.2025).
- О проекте GEOTOKENS. 2024. URL: <https://geotokens.org/about/> (дата обращения: 11.06.2025).
- Рынок ЦФА может вырасти до 1,7 трлн рублей к 2028 году. 2025. URL: <https://www.vedomosti.ru/investments/articles/2025/05/22/1111778-rinok-tsfa-mozhet-virasti> (дата обращения: 11.06.2025).
- Сан-Хосе хочет финансировать интернет для малообеспеченного населения с помощью Helium (HNT). 2021. URL: <https://www.block-chain24.com/news/novosti-blokcheyna/san-hose-hochet-finansirovat-internet-dlya-maloobespechennogo-naseleniya-s> (дата обращения: 11.06.2025).
- Федеральный закон РФ от 31.07.2020 № 259-ФЗ «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». 2020.
- Японский рынок Web3 в 2024 году: государственная политика, корпоративные тенденции и перспективы на 2025 год. 2024. URL: <https://www.gateio24.best/ru/learn/articles/the-japanese-web3-market-in-2024-government-policies-corporate-trends-and-prospects-for-2025/5286> (дата обращения: 11.06.2025).
- ERC-20 Token Standard. 2024. URL: <https://ethereum.org/en/developers/docs/standards/tokens/erc-20/> (дата обращения: 11.06.2025).
- ERC-721 Token Standard. 2024. URL: <https://ethereum.org/en/developers/docs/standards/tokens/erc-721/> (дата обращения: 11.06.2025).

Список литературы

- Андрюшин С.А. 2024. Токенизация реальных активов: классификация, платформы, приложения, возможности и проблемы развития. *Russian Journal of Economics and Law*, 18(1): 88–104.
- Бабанская А.С., Ермольева Д.Р., Ефименко Н.А., Акулова С.А. 2025. Сравнительный анализ и возможности ИИ-технологий для предотвращения мошенничества в финансовом секторе. *Экономика. Информатика*, 52(1): 110–124. DOI: 10.52575/2687-0932-2025-52-1-110-124.
- Еремин С.Г., Фарманов Т.Х. 2024. Разработка блокчейн-платформ для краудфандинга и инвестирования в сельскохозяйственные проекты. *Аграрная наука*, 6: 26–27.
- Кибальников С.В., Кружалин В.И. 2019. Цифровая трансформация как инструмент развития малых городов и исторических поселений (МГИП). Поиск новых подходов к динамичному развитию малых городов и исторических поселений: Сб. статей / Под науч. ред. д.э.н. М.Ю. Шерешевой. М.: Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова: 56–61.
- Лосева О.В. 2024. Формирование модели коммерциализации цифровых интеллектуальных активов компании. *МИР (Модернизация. Инновации. Развитие)*, 15(1): 80–95.
- Салаев Р.Ш. 2024. Структура цифровых валют, токенов и криптоактивов: разбор основных принципов. *Raqamli iqtisodiyot (Цифровая экономика)*, 7: 8–15.
- Усков В.С. 2024. Развитие цифровой экономики России: факторы и региональные различия. *Проблемы развития территории*, 1: 28–41.

- Ходько С.Т., Никитченко А.А. 2024. Искусственный интеллект в управлении территориями. Региональная экономика и развитие территорий: сборник научных статей. Вып. 18. СПб.: Изд-во СПбГЭУ: 184.
- Чередниченко О.В., Бондаренко Н.Е., Сизова Т.В. 2024. Майнинг криптовалют как новый инструмент развития сетей создания стоимости в российской экономике. *ЦИТИСЭ*, 3: 498–507.
- Ярмоленко Л.И., Вервейко Д.А. 2024. Проблемы и перспективы развития криптовалюты в экономике РФ, 102 с.
- Artemyeva, Yu.D., Khasbulatova, I.M., Stepannikova, O.A. 2024. Digital ruble - a new type of money or an alternative to cryptocurrency? *Drukerovsky Vestnik*, 6(62): 45–54. – DOI 10.17213/2312-6469-2024-6-45-54. – EDN WSCZNG.
- Razi Q., Devrani A., Abhyankar H., Chalapathi G.S.S., Hassija V., Guizani M. 2024. Non-Fungible Tokens (NFTs) Survey of Current Applications, Evolution, and Future Directions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5: 2765–2791. DOI: 10.1109/OJCOMS.2023.3343926. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10363651>

References

- Andryushin S.A. 2024. Tokenizatsiya real'nykh aktivov: klassifikatsiya, platformy, prilozheniya, vozmozhnosti i problemy razvitiya [Tokenization of Real Assets: Classification, Platforms, Applications, Opportunities, and Challenges]. *Russian Journal of Economics and Law*, 18(1): 88–104.
- Babanskaya A.S., Ermolyeva D.R., Efimenko N.A., Akulova S.A. 2025. Sravnitel'nyy analiz i vozmozhnosti II-tekhnologiy dlya predotvrashcheniya moshennichestva v finansovom sektore [Comparative analysis and the potential of AI technologies to prevent fraud in the financial sector]. *Ekonomika. Informatika*, 52(1): 110–124. DOI: 10.52575/2687-0932-2025-52-1-110-124.
- Yeremin S.G., Farmanov T.Kh. 2024. Razrabotka blockchain-platform dlya kraudfandinga i investirovaniya v sel'skokhozyaystvennye proekty [Development of blockchain platforms for crowdfunding and investment in agricultural projects]. *Agrarnaya nauka*, 6: 26–27.
- Kibal'nikov S.V., Kruzhalin V.I. 2019. Tsifrovaya transformatsiya kak instrument razvitiya mal'nykh gorodov i istoricheskikh poseleniy (MGIP) Digital transformation as a tool for the development of small towns and historical settlements (MTHS)]. *Poisk novykh podhodov k dinamichnomu razvitiyu mal'nykh gorodov i istoricheskikh poseleniy: sbornik statey / Pod nauch. red. d.e.n. M.Yu. Shereshevoy. M.: Ekonomicheskiiy fakultet MGU imeni M.V. Lomonosova*: 56–61.
- Loseva O.V. 2024. Formirovanie modeli kommertsializatsii tsifrovyykh intellektual'nykh aktivov kompanii [Forming a model for the commercialization of a company's digital intellectual assets]. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie)*, 15(1): 80–95.
- Salaev R.Sh. 2024. Struktura tsifrovyykh valyut, tokenov i kriptoaktivov: razbor osnovnykh printsipov [The Structure of Digital Currencies, Tokens, and Cryptoassets: Understanding the Basic Principles]. *Raqamli iqtisodiyot (Tsifrovaya ekonomika)*, 7: 8–15.
- Uskov V.S. 2024. Development of the Digital Economy in Russia: Factors and Regional Disparities. *Problemy razvitiya territorii*, 1: 28–41.
- Khodko S.T., Nikitchenko A.A. 2024. Iskusstvennyy intellekt v upravlenii territoriyami [Artificial intelligence in territorial management]. *Regional'naya ekonomika i razvitie territoriy: sbornik nauchnykh statey*, Vyp. 18 / pod nauchnoy red. kand. ekon. nauk L.P. Sovershaevoy. SPb.: Izd-vo SPbGEU: 184.
- Cherednichenko O.V., Bondarenko N.E., Sizova T.V. 2024. Mayning kriptovalyut kak novyy instrument razvitiya setey sozdaniya stoimosti v rossiyskoy ekonomike [Cryptocurrency mining as a new tool for developing value creation networks in the Russian economy]. *TSITISE*, 3: 498–507.
- Yarmolenko L.I., Verveiko D.A. 2024. Problemy i perspektivy razvitiya kriptovalyuty v ekonomike RF [Problems and Prospects of Cryptocurrency Development in the Russian Economy]: 102 p.
- Artemyeva Yu.D., Khasbulatova I.M., Stepannikova O.A. 2024. Digital ruble – a new type of money or an alternative to cryptocurrency? *Drukerovsky Vestnik*, 6(62): 45–54. DOI: 10.17213/2312-6469-2024-6-45-54. EDN WSCZNG.
- Razi Q., Devrani A., Abhyankar H., Chalapathi G.S.S., Hassija V., Guizani M. 2024. Non-Fungible Tokens (NFTs): Survey of Current Applications, Evolution, and Future Directions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5: 2765–2791. DOI: 10.1109/OJCOMS.2023.3343926. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10363651>



Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 16.06.2025
Поступила после рецензирования 14.07.2025
Принята к публикации 23.07.2025

Received June 16, 2025
Revised July 14, 2025
Accepted July 23, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дмитриева Людмила Владиславовна, кандидат экономических наук, первый заместитель Председателя Правительства Ивановской области, доцент кафедры экономической теории, экономики и предпринимательства, Ивановский государственный университет, г. Иваново, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lyudmila V. Dmitrieva, Candidate of Economic Sciences, First Deputy Chair of the Government of Ivanovo region, Associate Professor of the Department of Economic Theory, Economics and Entrepreneurship, Ivanovo State University, Ivanovo, Russia



УДК 332.14
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-499-512
EDN FSAHEE

Потенциал агломерационных процессов в регионах России: параметры и уровень

Мельников В.В.

Научно-исследовательский институт социальных систем при МГУ имени М.В. Ломоносова
Россия, 127018, г. Москва, Октябрьский пер., д. 8, стр. 2, оф. 5
melnikov@niiss.ru

Аннотация. Актуальность исследования агломерационных процессов в современной экономике определена их ключевой ролью в пространственном развитии, повышении конкурентоспособности территорий и формировании новых точек экономического роста. Цель исследования – обосновать параметры и определить уровень потенциала агломерационных процессов в регионах Российской Федерации. Научная новизна исследования заключается в том, что с применением авторской методики будет определен уровень и динамика потенциала агломерационных процессов в российских регионах. Выборка исследования: 85 субъектов Российской Федерации. По результатам проведенных расчетов заключили, что наибольшая доля территории РФ обладает низким потенциалом агломерационных процессов. Очень высокий уровень потенциала агломерационных процессов имеет один город Москва. В ряде российских регионов выявлен негативный тренд снижения потенциала агломерационных процессов, что увеличивает социально-экономическое и пространственное неравенство. Проведенное исследование дополняет цикл работ в области теории и эмпирики агломерационных процессов.

Ключевые слова: агломерационный процесс, коэффициент локализации, регион, агломерация, неравенство, потенциал, экономика

Для цитирования: Мельников В.В. 2025. Потенциал агломерационных процессов в регионах России: параметры и уровень. *Экономика. Информатика*, 52(3): 499–512. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-499-512. EDN FSAHEE

The Potential of Agglomeration Processes in the Regions of Russia: Parameters and Level

Vadim V. Melnikov

Social Systems Research Institute at Lomonosov Moscow State University
office 5, building 2, 8 Oktyabrsky Ln., Moscow 127018, Russia
melnikov@niiss.ru

Abstract. The relevance of the study of agglomeration processes in the modern economy is determined by their key role in spatial development, increasing the competitiveness of territories, and the formation of new points of economic growth. The purpose of the study is to substantiate the parameters and determine the level of potential of agglomeration processes in the regions of the Russian Federation. The scientific novelty of the study lies in the fact that using the author's methodology, the level and dynamics of the potential of agglomeration processes in Russian regions will be determined. The research sample included 85 subjects of the Russian Federation. The calculations show that the largest share of the territory of the Russian Federation has a low potential for agglomeration processes. One city, Moscow, has a very high level of potential for agglomeration processes. In a number of Russian regions, a negative trend of decreasing potential of agglomeration processes has been identified, which increases socio-economic and spatial inequality. The study complements the cycle of works in the field of theory and empirics of agglomeration processes.

Keywords: agglomeration process, localization coefficient, region, agglomeration, inequality, potential, economy

© Мельников В.В., 2025



For citation: Melnikov V.V. 2025. The Potential of Agglomeration Processes in the Regions of Russia: Parameters and Level. *Economics. Information technologies*, 52(3): 499–512 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-499-512. EDN FSAHEE

Введение

На сегодняшний день в условиях новых экономических и геополитических реалий необходимо переосмысление регионального развития Российской Федерации. В связи с чем вопросы исследования и оценки потенциала агломерационных процессов в российских регионах приобретают особую значимость и актуальность по ряду причин. Во-первых, ускорение пространственного развития и урбанизации: двадцать крупнейших агломераций концентрируют 40 % населения и 60 % ВВП, отток трудовых ресурсов и бизнеса из малых и средних городов, неравномерность инфраструктурного развития. Во-вторых, оптимизация управления и инфраструктуры: развитие агломерационных процессов требует скоординированного планирования; инвестиции в развитие агломераций могут дать большой мультипликативный эффект; анализ агломерационной динамики позволит прогнозировать нагрузку на социальную систему. В-третьих, имеющиеся научные исследования в основном ориентированы на зарубежный опыт, требуется адаптация методических подходов под специфику российских регионов; отсутствует методика оценки потенциала агломерационных процессов для разных типов регионов.

Цель исследования – обосновать параметры и определить уровень потенциала агломерационных процессов в регионах Российской Федерации.

В число задач исследования вошли следующие:

- рассмотреть эволюцию исследования агломерационных процессов в зарубежной и российской научной литературе;
- обосновать критерии уровня потенциала агломерационного процесса в регионе;
- дать оценку социально-экономическому неравенству регионов РФ и определить уровень агломерационных процессов в регионах РФ;
- представить выводы и дать рекомендации по результатам работы.

Теоретическая и методологическая база исследования: работы отечественных и зарубежных ученых в области теории, эмпирики и анализа агломерационных процессов в территориальном пространстве, а также сфере региональной экономики.

Эволюция исследования агломерационных процессов

Французский географ М. Руже изучал агломерацию применительно к расселению. Ученый считает, что агломерация возникает, когда «концентрация городских видов деятельности выходит за пределы административных границ и распространяется на соседние населенные пункты» [Лаппо и др., 2007]. Американский экономист А. Вебер в 1909 году выделил три основные ориентации в размещении производства: «транспортную, рабочую и агломерационную. Функция агломерации определяет притягательную силу крупного производства по отношению к мелким предприятиям» [Вебер, 1926]. Ученый обосновал факторы развития агломерации: «производственная масса, ставка транспортного тарифа, штандортный вес» [Вебер, 1926].

Новая экономическая география (New Economic Geography, NEG) внесла значимый вклад в изучение агломерационных процессов, предложив теоретические модели, объясняющие концентрацию экономической активности в пространстве. Согласно концепции модели «центр-периферия» П. Кругмана агломерации возникают из-за сочетания эффекта масштаба, транспортных издержек и мобильности факторов производства [Krugman, 1991]. «При средних транспортных издержках агломерационные процессы происходят тогда, когда начальные условия

значительно разнятся между регионами» [Krugman, Venables, 1996]. Ученым выявлена закономерность возникновения агломерации в регионах – «фирмы из-за эффекта масштаба стремятся к концентрации производительных сил на территориях вблизи рынков сбыта и поставщиков, однако в это же время доступность рынков сбыта и доступ к поставщикам лучше там, где уже сосредоточены другие производители. Совокупность этих эффектов образует агломерацию, несмотря на противодействие центробежных сил, которыми являются статичность аграрного сектора и перемещение промышленных фирм в регионы с меньшим количеством конкурентов» [Krugman, 1991]. Выводы Д. Пуго отражают ключевую идею новой экономической географии, которая объясняет, как взаимодействие мобильности труда и торговых издержек влияет на пространственное распределение экономической активности – либо способствуя агломерации (концентрации производства и населения в одних регионах), либо конвергенции (выравниванию уровней развития между регионами) [Puga, 1999]. Б. Кипнис утверждал, что «городские агломерации должны были стать основными ядрами для постиндустриализации, постмодернизационного развития и образа жизни» [Kipnis, 1997].

Из числа российских ученых отметим труды С.Н. Растворцевой, в которых под агломерационным процессом понимается «концентрация экономической активности в регионе (в городе) в динамике». Ключевым фактором начала агломерационного процесса ученый определяет: «рост экономической активности в регионе возникает вокруг экспортных предприятий при благоприятных условиях внешней торговли» [Растворцева, 2013]. Коллектив авторов под руководством А.В. Шмидта утверждает, что «агломерационные процессы характеризуются не только присоединением к городу-ядру пригородных и соседних городов, но и формированием общей производственно-транспортной, энергетической, инженерно-коммуникационной инфраструктуры, расположенной на единой территории» [Шмидт и др., 2016]. А.В. Суворова пришла к выводу, что «в контексте управления агломерационным процессом необходимо учитывать значимость институционализации его объекта (т. е. агломерации), а также понимания инструментов для формирования ресурсной основы осуществления данного процесса» [Суворова, 2023]. Вывод, полученный С.А. Кожевниковым и Н.В. Ворошиловым, отражает важную закономерность пространственного развития агломераций: эффект агломерационного влияния имеет четкую дистанционную зависимость – чем ближе территория к ядру (крупному городу), тем сильнее интеграция и синхронизация социально-экономических процессов [Кожевников, Ворошилов 2024]. С.А. Соболев утверждает, что «агломерации образуются стихийно, а процессы (миграционные, экологические, производственные) происходящие в агломерациях, носят высокий риск неуправляемости и необратимости.... Усиление агломерационных процессов в пространственном развитии Российской Федерации соответствует общемировому тренду» [Соболев, 2022].

Отдельно выделим исследования, в которых рассматриваются особенности агломерационных эффектов как результаты агломерационных процессов, протекающих в регионе. Н.Н. Киселева с соавторами заключают, что «агломерационный эффект проявляется в виде концентрации производителей конечных товаров и услуг. Этот эффект влечет увеличение разнообразных услуг, поддерживает значительное число обслуживающих фирм, приводит к размещению большого числа фирм-экспортеров и более высокой эффективности их деятельности» [Киселева и др., 2016]. Д.И. Олифир выделяет два типа агломерационных эффектов: а) эффекты локализации – «локализация в отдельных очагах пространства предприятий, принадлежащих к одному или взаимосвязанному (взаимозависимому) виду экономической деятельности (отрасли) [Олифир, 2024]; б) эффект урбанизации «проявляется за счёт концентрации населения и разнообразия видов деятельности (специализаций) прежде всего в городских агломерациях» [Олифир, 2024]. П.А. Лавриненко с соавторами заключают, что «агломерационные эффекты действуют по-разному в зависимости от людности населенного пункта. В среднем по всем видам экономической деятельности наиболее чувствительны к росту численности населения крупнейшие города и их агломерации.



Наибольшие эластичности характерны для агломераций с населением более 1,5 млн чел., несколько меньшие – для агломераций с населением от 700 тыс. до 1,5 млн чел.» [Лавриненко и др., 2019]. С.Н. Растворцева и С.Д. Блохина по результатам проведенных расчетов утверждают: «агломерационные эффекты редко появляются вследствие каких-то внезапных причин, а становятся итогом проведения региональной и национальной политики... Велико влияние изначально заданных факторов развития – исторических, культурных, демографических» [Растворцева, Блохина, 2024].

Е.А. Коломак подтвердила значимость положительных агломерационных эффектов для юга Сибири, так, ученый заключает, что «размещение экономической активности юга Сибири имеет специфическую пространственную структуру, и полученные результаты, очевидно, являются следствием сочетания факторов, которые способствуют возникновению и развитию агломерационных эффектов» [Коломак, Шерубнёва, 2023]. В.В. Акимова и Ф.М. Чернецкий изучают агломерационные эффекты в промышленном развитии Республики Корея. Наибольшее положительное влияние агломерационных эффектов ученые выявили в секторе услуг. По результатам проведенных расчетов пришли к выводам, что «для услуг в целом важнее агломерация урбанизации, чем агломерация локализации. Обратная ситуация наблюдается в добывающей промышленности и сельском хозяйстве, где эффекты Джекобс оказывают негативное воздействие» [Акимова, Чернецкий, 2024]. Е.Д. Копытова и С.С. Патракова подчеркивают, что «количественная оценка агломерационного эффекта представляет собой наибольшую сложность в общей диагностике пространственной концентрации» [Копытова, Патракова, 2024].

Новая экономическая география дала мощный инструментарий для анализа агломерационных процессов, но их полное понимание требует междисциплинарного подхода (региональная экономика, урбанистика, институциональный анализ). Таким образом, теоретико-методологические исследования, объясняющие агломерационные процессы, находятся на стадии интенсивного развития и популярности, так как продолжается процесс урбанизации, а агломерации становятся ключевыми драйверами экономики.

Информационная база и методы исследования

В более раннем исследовании была предложена и апробирована методика оценки потенциала агломерационных процессов [Манаева, Мельников, 2025]. В данной работе планируется развить авторскую методику в части обоснования условий для определения уровня потенциала агломерационных процессов в регионах РФ.

$AP_j > 1$ – очень высокий уровень потенциала агломерационного процесса в регионе j ;

$0,5 < AP_j < 1$ – высокий уровень потенциала агломерационного процесса в регионе j ;

$0,25 < AP_j < 0,5$ – средний уровень потенциала агломерационного процесса в регионе j ;

$0,1 < AP_j < 0,25$ – низкий уровень потенциала агломерационного процесса в регионе j ;

$AP_j < 0,1$ – потенциал агломерационного процесса в регионе j отсутствует.

AP_j – нормированный индекс потенциала агломерационного процесса в регионе j [Манаева, Мельников, 2025].

Исследование проводилось по 85 регионам России. Данные по Архангельской и Тюменской областям принимались отдельно, без включения автономных округов. Автономные округа учитывались как отдельные субъекты Федерации. Период исследования: 2008 г., 2016 г., 2018 г., 2020 г., 2021 г., 2022 г. Информационной базой послужили данные Федеральной службы государственной статистики.

Результаты исследования и обсуждение

Факторы «первой природы» – концентрация природных ресурсов – определяют выгодное природно-географическое положение, преимущества развития субъектов РФ и,

следовательно, являются важным условием для возникновения и интенсификации агломерационных процессов.

Климатические пояса на территории России имеют существенные различия. С севера на юг последовательно сменяют друг друга арктический, субарктический, умеренный и частично субтропический климатические пояса, что определяет ведение хозяйственной деятельности, концентрацию экономической активности и качество жизни населения в целом.

На рис. 1 представлена динамика среднегодовой температуры воздуха в федеральных округах России за 2009–2023 гг.

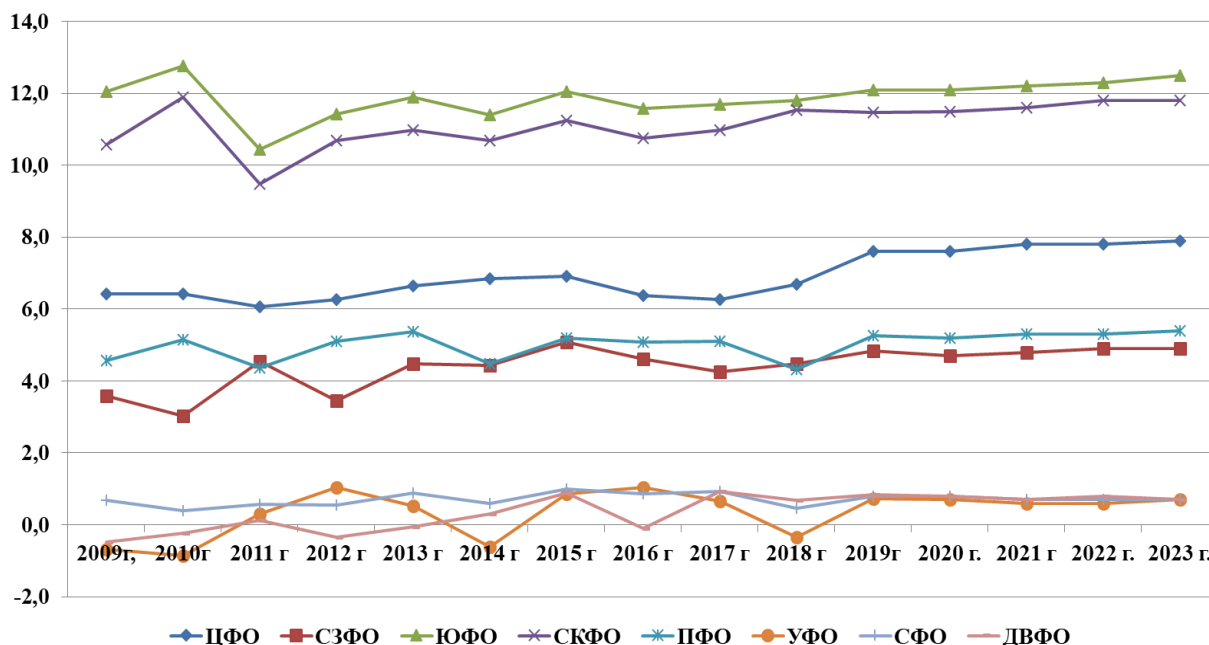


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры воздуха в федеральных округах России за 2009–2023 гг.

Fig. 1. Dynamics of average annual air temperature in federal districts of Russia 2009–2023

Примечание: рассчитано автором по данным [Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (дата обращения 23.07.2024 г.)]

Таким образом, можем сделать вывод о том, что в территориальном пространстве РФ условно существует три уровня среднегодовых температур воздуха: а) высокий (ЮФО и СКФО); б) средний (ЦФО, СЗФО, ПФО); в) низкий (СФО, УФО, ДВФО)¹. Следует подчеркнуть, что на всей территории России отмечается тенденция роста среднегодовой температуры воздуха.

Особенностью социально-экономического и пространственного развития регионов РФ является их высокий уровень дифференциации по ключевым параметрам, что создает предпосылки для развития агломерационных процессов: концентрация ресурсов в крупных городах и оголение периферии. Для того, чтобы дать общее представление о динамике социально-экономического неравенства регионов РФ, нами был рассчитан индекс Джини по отдельным показателям (рис. 2).

¹ ЦФО – Центральный федеральный округ; СЗФО – Северо-Западный федеральный округ; ЮФО – Южный федеральный округ; СКФО – Северо-Кавказский федеральный округ; ПФО – Приволжский федеральный округ; УФО – Уральский федеральный округ; СФО – Сибирский федеральный округ; ДВФО – Дальневосточный федеральный округ.

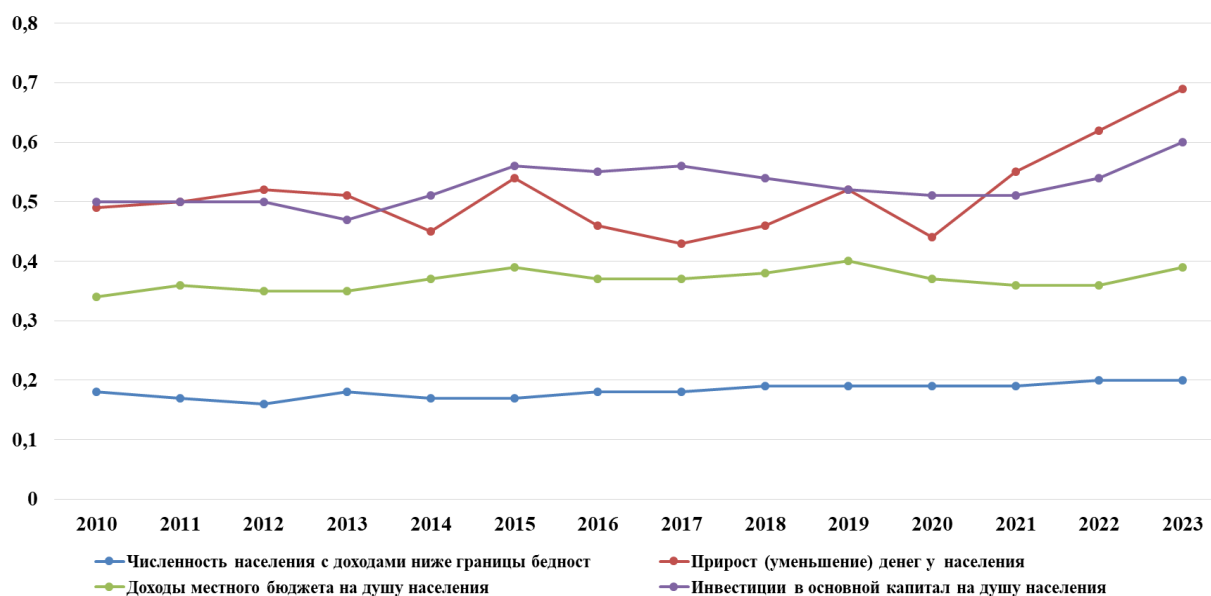


Рис. 2. Динамика социально-экономического неравенства регионов РФ в 2010–2023 гг., индекс Джини

Fig. 2. Dynamics of socio-economic inequality of regions of the Russian Federation in 2010–2023, Gini index

Примечание: рассчитано автором по данным [Регионы России. Социально-экономические показатели: [http:// rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204](http://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204) (дата обращения 23.06.2025 г.)]

Таким образом, мы можем заключить, что по показателю «численность населения с доходами ниже границы бедности» значимого неравенства регионов России не наблюдается. при этом с 2020 г. зафиксирован рост неравенства по критерию «прирост/уменьшение денег у населения», т. е. увеличивается разрыв населения по финансовым накоплениям в российских субъектах. Максимальное неравенство с тенденцией роста получено для показателя «инвестиции в основной капитал на душу населения».

Основопологающим фактором возникновения агломерационных процессов в регионах РФ является размещение на их территории отраслей промышленности, в связи с чем важным представляется анализ динамики коэффициентов локализации отдельных видов экономической деятельности в субъектах РФ (рис. 3–5).

Расчетным путем максимальные значения коэффициента локализации для вида деятельности «добыча полезных ископаемых» получены для регионов-нефтяников Северо-Западного и Уральского федеральных округов, при этом наблюдается тенденция его снижения. Низкий уровень локализации обследуемого вида экономической деятельности наблюдается в регионах Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, что логично и закономерно, так как развитие анализируемого вида экономической деятельности определено факторами «первой природы» – наличием/отсутствием полезных ископаемых.

По данным, представленным на рисунке 4, можем заключить, что высокой дифференциации значений коэффициента локализации для вида экономической деятельности «обрабатывающее производство» в регионах РФ не наблюдается, так как размещение предприятий обрабатывающей промышленности не зависит от факторов первой природы, а основывается на ряде принципов, которые учитывают экономическую эффективность, логистику, экологию и социальные факторы. Обрабатывающие предприятия (машиностроение, химическая промышленность, пищевая) могут располагаться вдали от источников сырья, если логистика позволяет эффективно его доставлять. Производители преимущественно размещаются к крупным рынкам сбыта или транспортным узлам. Программы импортозамещения способствуют появлению новых производств в регионах.

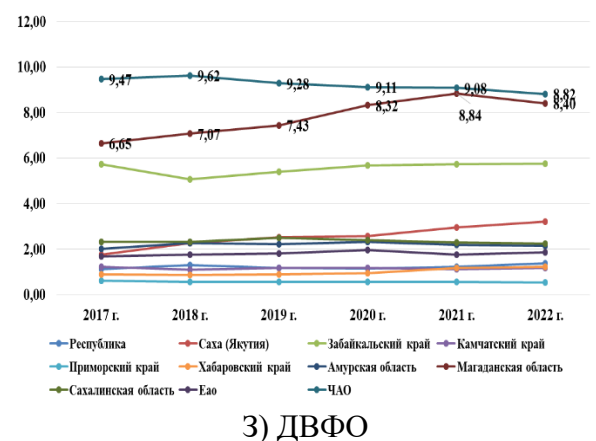
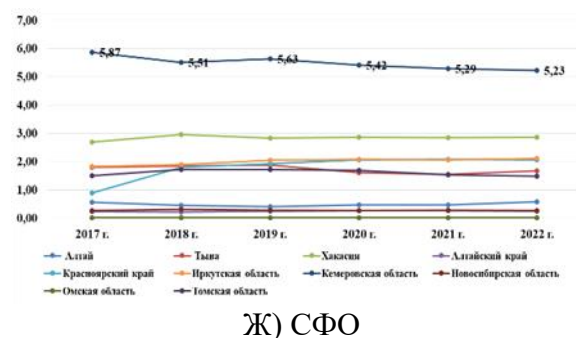
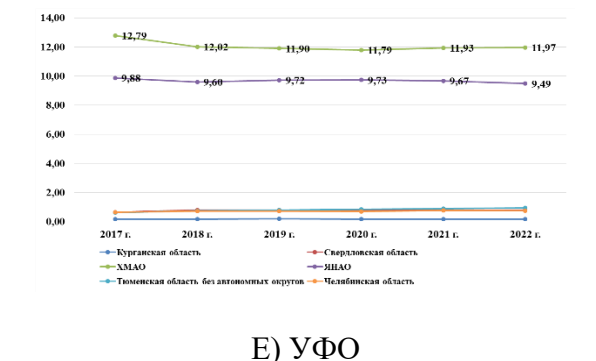
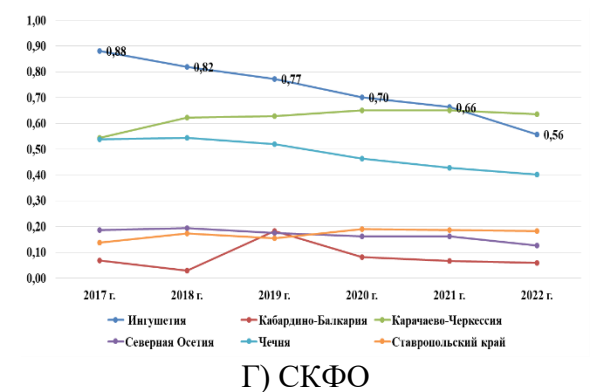
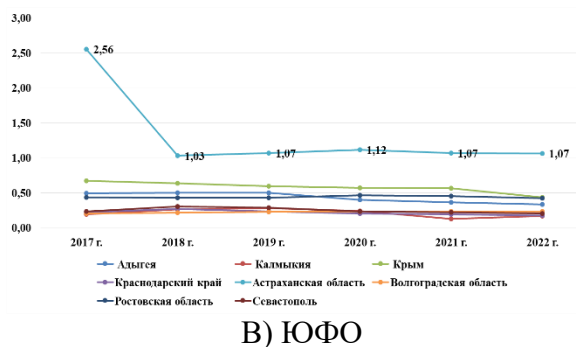
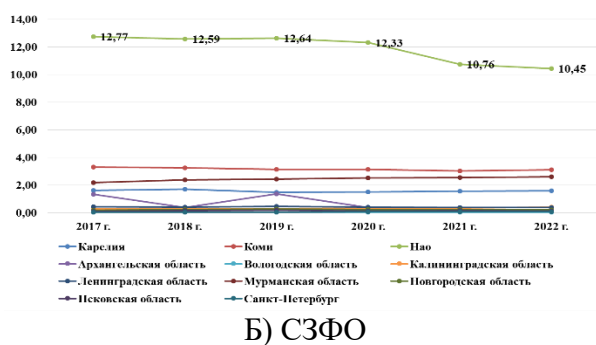
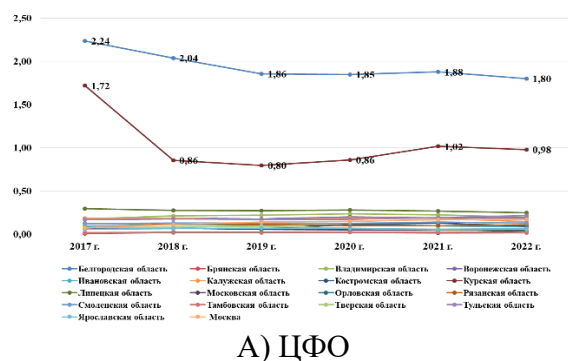


Рис. 3. Динамика коэффициента локализации (добыча полезных ископаемых) в регионах России в 2017–2022 гг.

Fig. 3. Dynamics of the localization coefficient (mineral extraction) in the regions of Russia in 2017–2022

Примечание: рассчитано автором по данным [ЕМИСС: <https://fedstat.ru/> (дата обращения 23.06.2025 г.)]

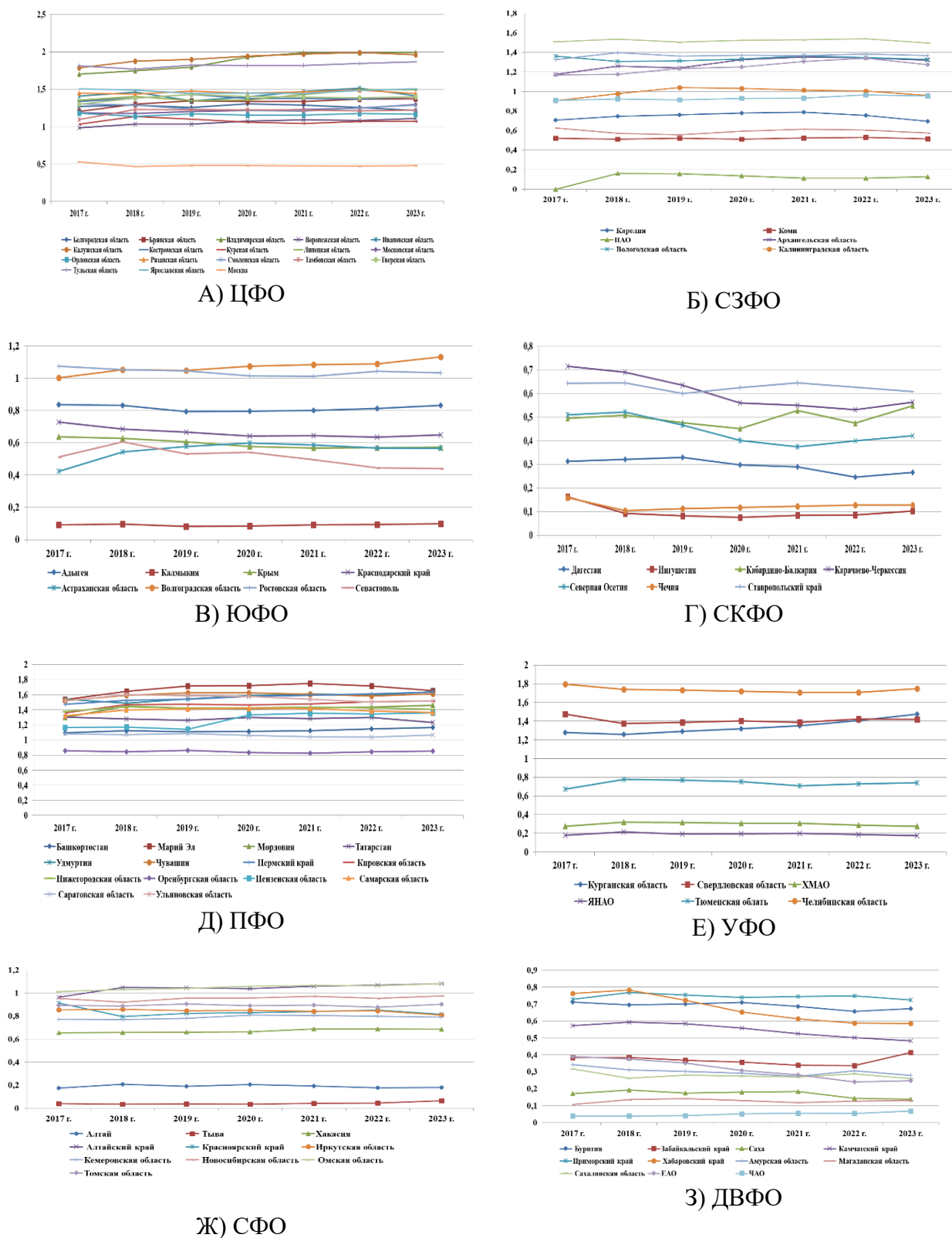
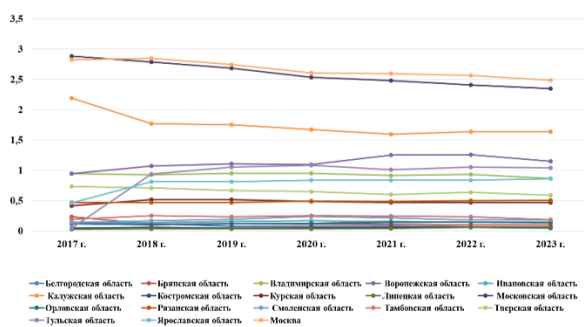


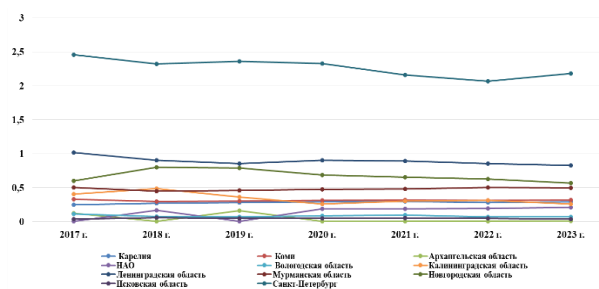
Рис. 4. Динамика коэффициента локализации (обрабатывающее производство) в регионах России в 2017–2023 гг.

Fig. 4. Dynamics of the localization coefficient (manufacturing) in the regions of Russia in 2017–2023

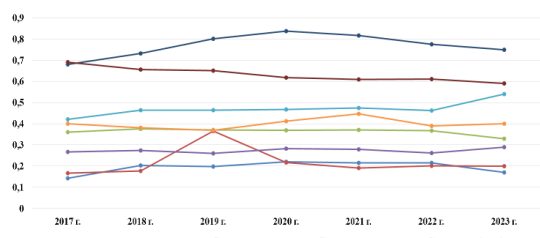
Примечание: рассчитано автором по данным [ЕМИСС: <https://fedstat.ru/> (дата обращения 23.06.2025 г.)]



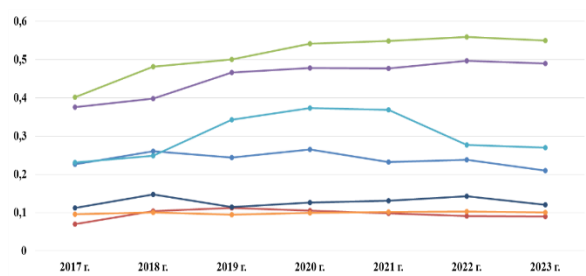
А) ЦФО



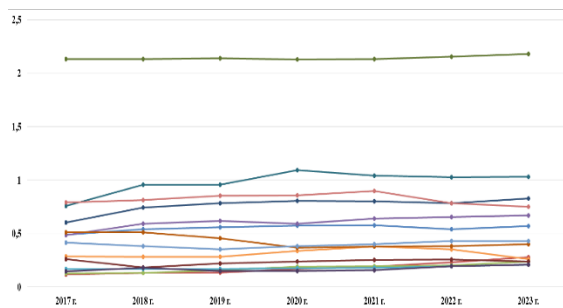
Б) СЗФО



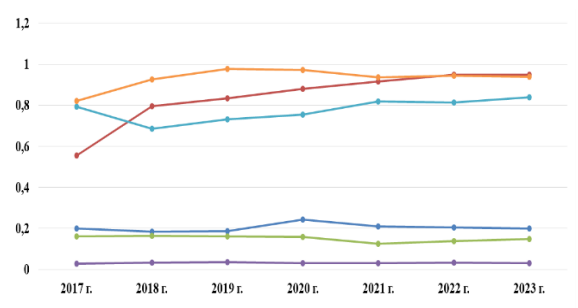
В) ЮФО



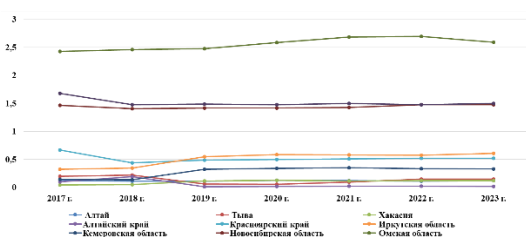
Г) СКФО



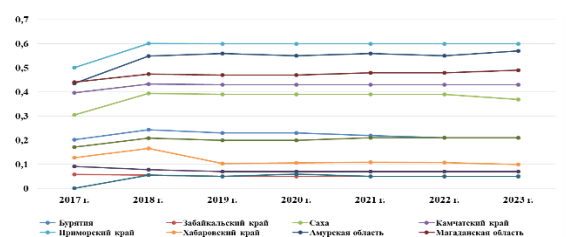
Д) ПФО



Е) УФО



Ж) СФО



З) ДВФО

Рис. 5. Динамика коэффициента локализации (научные исследования и разработки) в регионах России в 2017–2023 гг.

Fig. 5. Dynamics of the localization coefficient (research and development) in the regions of Russia in 2017–2023

Примечание: рассчитано автором по данным [ЕМИСС: <https://fedstat.ru/> (дата обращения 23.06.2025 г.)]



По результатам проведенных расчетов можем сделать вывод о том, что научные исследования в России крайне неравномерно распределены, что усугубляет дисбаланс в региональном развитии. Наибольшая концентрация научных исследований и разработок зафиксирована в Москве, Московской области и Санкт-Петербурге. Выделим ряд причин, способствующих концентрации научных исследований и разработок. Во-первых, исторически сложившаяся инфраструктура. Во-вторых, концентрация финансирования и наличие высококвалифицированных кадров. В-третьих, наличие тесной связи промышленно-технологической базы с высокотехнологическими секторами. Субъекты Южного и Северо-Кавказского федеральных округов традиционно ориентированы на сельское хозяйство и туризм, наука развита слабо. На территории Дальневосточного федерального округа созданы научные центры, реализуются мероприятия по развитию Дальнего Востока, но удаленность и слабая заселенность ограничивают рост науки.

В более ранних исследованиях были получены расчетные данные нормированного индекса потенциала агломерационного процесса в регионах РФ за период 2000–2022 гг., что позволяет определить уровень потенциала агломерационных процессов в российских регионах [Манаева, Мельников, 2025] (рис. 6).

По данным, представленным на рисунке 6, можем заключить о дифференциации потенциала агломерационных процессов в российских регионах и его динамических изменениях. Наибольшая доля территории РФ имеет низкий потенциал агломерационных процессов. За весь период исследования очень высокий уровень потенциала агломерационных процессов наблюдается в одном субъекте РФ – г. Москве; высокий уровень в двух субъектах – Московской области и Санкт-Петербурге. Потенциал агломерационных процессов стабильно отсутствует в республике Тыва. В отдельных регионах Северо-Западного, Приволжского, Уральского федеральных округов намечена тенденция на снижение потенциала агломерационных процессов: так, в 2008 году средним уровнем потенциала обладали сорок пять субъектов, в 2022 году – тридцать шесть.

Таким образом, целесообразно выделить причины снижения потенциала агломерационных процессов в российских регионах. Во-первых, демографические проблемы: старение населения, миграция трудоспособного населения из малых и средних городов в крупные агломерации. Во-вторых, низкая транспортная связанность городов и регионов (недостаток железнодорожного и авиасообщения). Дефицит современной цифровой инфраструктуры препятствует удаленной работе и развитию высокотехнологических секторов в отдалённых субъектах РФ. В северных и восточных регионах сложные природно-климатические условия негативно сказываются на развитии агломерационных процессов.

Заключение

Данное исследование направлено на определение уровня потенциала агломерационных процессов в российских регионах. Наибольшая доля территории РФ обладает низким потенциалом агломерационных процессов. Очень высокий уровень потенциала агломерационных процессов имеет один город Москва. Полученные результаты продемонстрировали современные тенденции развития субъектов РФ: приток финансовых ресурсов и человеческого капитала в крупные агломерации (Москва, Московская область, Санкт-Петербург) и «оголение» периферии. В ряде российских регионов выявлен негативный тренд снижения потенциала агломерационных процессов, что увеличивает социально-экономическое и пространственное неравенство.

Проведенное исследование дополняет цикл работ в области теории и эмпирики агломерационных процессов. Представленные авторские результаты могут быть использованы органами региональной власти при разработке документов стратегического планирования, широким кругом исследователей в области пространственной экономики, а также преподавателями и студентами в рамках подготовки кадров по экономическим специальностям.

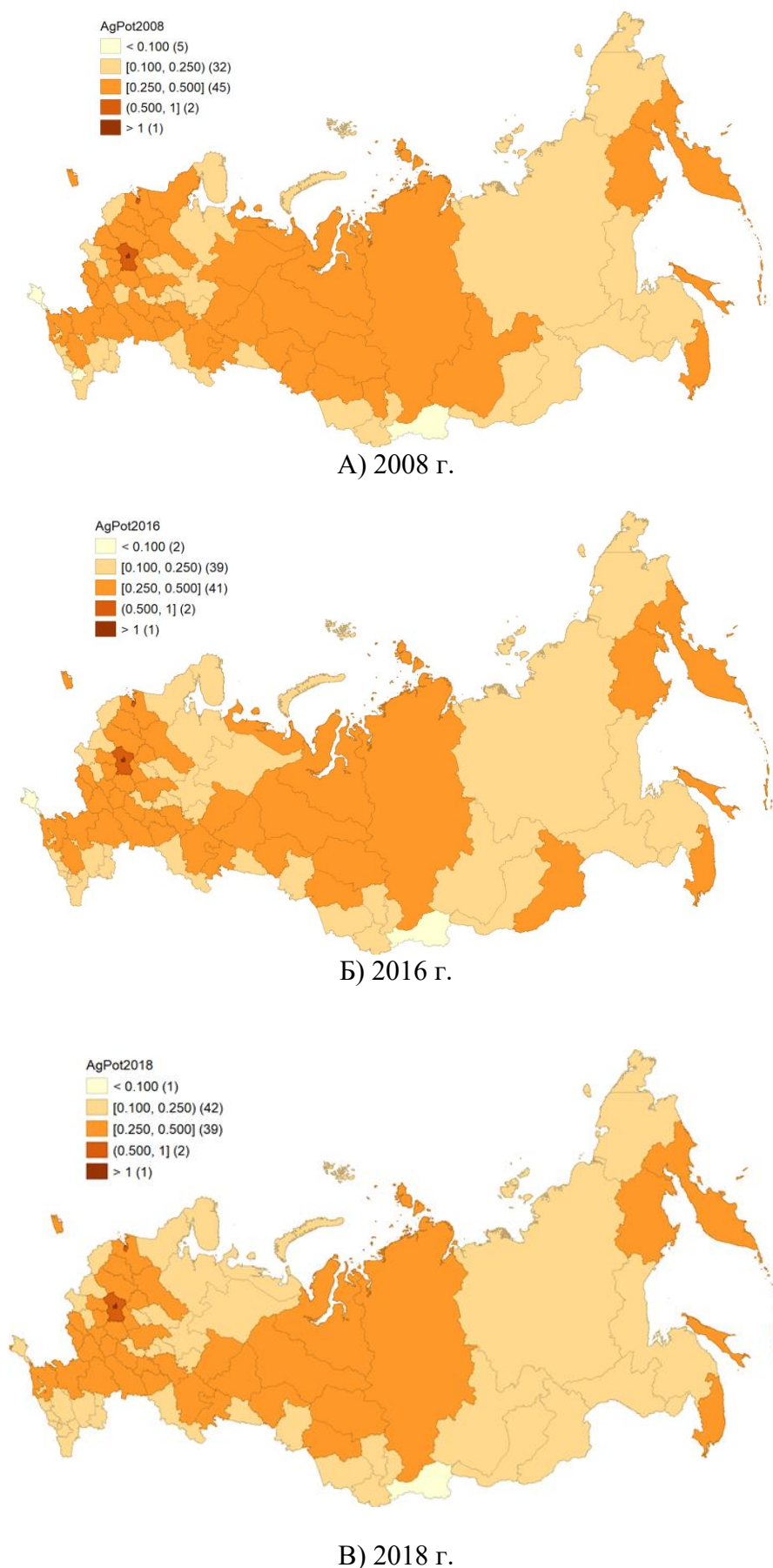
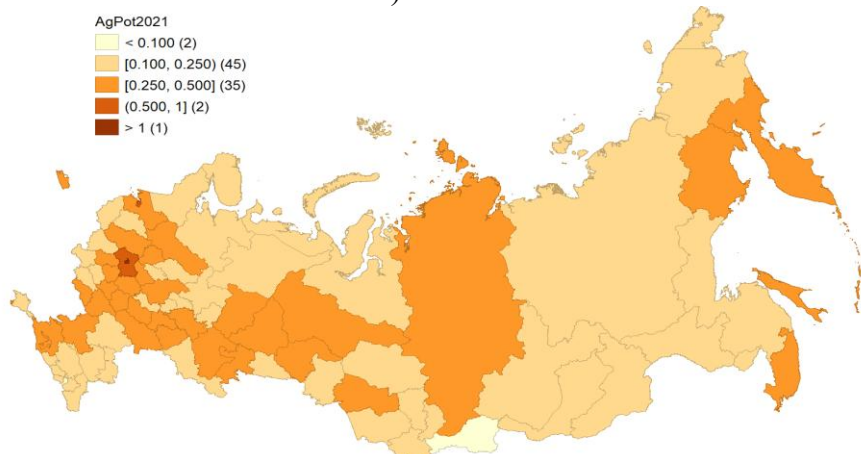


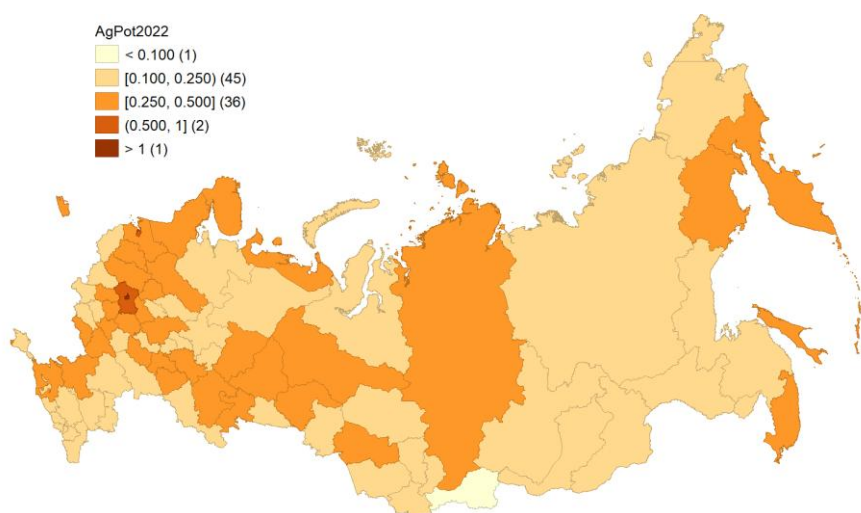
Рис. 6. Уровень потенциала агломерационных процессов в регионах РФ в 2008–2022 гг. (1/2)
Fig. 6. Level of potential of agglomeration processes in the regions of the Russian Federation in 2008–2022 (1/2)



Г) 2020 г.



Д) 2021 г.



Е) 2022 г.

Рис. 6. Уровень потенциала агломерационных процессов в регионах РФ в 2008–2022 гг. (2/2)

Fig. 6. Level of potential of agglomeration processes in the regions of the Russian Federation in 2008–2022 (2/2)

Примечание: рассчитано автором по данным [ЕМИСС: <https://fedstat.ru/> (дата обращения 23.06.2025 г.)]

Список источников

Единая межведомственная информационно-статистическая система: <https://fedstat.ru/> (дата обращения 23.06.2025 г.)
Регионы России. Социально-экономические показатели: <http://https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения 23.06.2025 г.)
Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (дата обращения 23.07.2024 г.)

Список литературы

- Акимова В.В., Чернецкий Ф.М. 2024. Агломерационные эффекты в промышленном развитии Республики Корея. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 40 (4): 570–586. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu05.2024.403>.
- Вебер А. 1926. Теория размещения промышленности. Перевод Н. Морозова. Под ред. Н. Баранского. Ленинград-Москва: Книга, 119.
- Киселева Н.Н., Бавина К.В., Каратунов А.В. 2016. Методические подходы к исследованию природы агломерационных процессов. *Фундаментальные исследования*, 2: 422–426.
- Кожевников С.А., Ворошилов Н.В. 2024. Агломерационные процессы в регионах России: особенности и проблемы активизации позитивных эффектов. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, 17 (1): 91–109. DOI: 10.15838/esc.2024.1.91.5.
- Коломак Е.А., Шерубнёва А.И. 2023. Оценка значимости агломерационных эффектов на юге Сибири. *Пространственная экономика*, 19 (1): 52–75. DOI: [10.14530/se.2023.1.052-069](https://doi.org/10.14530/se.2023.1.052-069).
- Копытова Е.Д., Патракова С.С. 2024. Агломерационные эффекты крупных городов: оценка на микроданных. *Проблемы развития территории*, 28 (2): 10–23. DOI: 10.15838/ptd.2024.2.130.
- Лавриненко П.А., Михайлова Т.Н., Ромашина А.А., Чистяков П.А. 2019. Агломерационные эффекты как инструмент регионального развития. *Проблемы прогнозирования*, 3 (174): 50–59.
- Лаппо Г.М., Полян П.М., Селиванова Т.И. 2007. Агломерации России в XXI веке. *Вестник Фонда регионального развития Иркутской области*, 1: 45–52.
- Манаева И.В., Мельников В.В. 2025. Оценка потенциала агломерационных процессов в регионах Российской Федерации. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, 18 (2): 90–106. DOI: 10.15838/esc.2025.2.98.5.
- Олифир Д.И. 2024. Пространственный потенциал агломерационных эффектов: методика определения на материалах Санкт-Петербургской агломерации. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, 17 (2): 113–128. DOI: 10.15838/esc.2024.2.92.6.
- Растворцева С.Н. 2013. Управление развитием процессов концентрации экономической активности в регионе: подходы новой экономической географии: Монография. М: Экон-информ, 131 с.
- Растворцева С.Н., Блохина С.Д. 2024. Региональные агломерационные эффекты в экономике России. *Проблемы развития территории*, 28 (3): 10–28. DOI: 10.15838/ptd.2024.3.131.2.
- Соболев С.А. 2022. Усиление агломерационных процессов в пространственном развитии: теория и практика. *Вестник Московского университета. Серия 21. Управление (государство и общество)*, 4: 61–85.
- Суворова А.В. 2023. Городские агломерации: особенности функционирования и методологические принципы развития. *Теоретическая и прикладная экономика*, 4: 1–17. DOI: 10.25136/2409-8647.2023.4.68863.
- Шмидт А.В., Антонюк В.С., Франчини А. 2016. Городские агломерации в региональном развитии: теоретические, методические и прикладные аспекты. *Экономика региона*, 12 (3): 776–789. DOI: 10.17059/2016-3-14.
- Fujita M., Ogawa H. 1982. Multiple equilibria and structural transition of nonmonocentric urban configuration. *Regional Science and Urban Economics*, 12: 161–196.
- Kipnis B.A. 1997. Dynamics and potentials of Israel's megalopolitan processes. *Urban Studies*, 34 (3): 489–501.
- Krugman P. 1991. Increasing returns and economic geography. *Journal of political economy*, 99(3): 483–499.
- Krugman P., Venables A.J. 1996. Integration, specialization, and adjustment. *European economic review*, 40(3-5): 959–967.
- Puga D. 1999. The rise and fall of regional inequalities. *European economic review*, 43(2): 303–334.

References

- Akimova V.V., Chernetsky F.M. 2024. Agglomeration effects in the industrial development of the Republic of Korea. *Bulletin of St. Petersburg University. Economics*, 40 (4): 570–586 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu05.2024.403>.



- Weber A. 1926. Theory of industrial location. Translated by N. Morozov. Ed. by N. Baransky. Leningrad-Moscow: Kniga, 119.
- Kiseleva N.N., Bavina K.V., Karatunov A.V. 2016. Methodological approaches to the study of the nature of agglomeration processes. *Fundamental research*, 2: 422–426 (in Russian).
- Kozhevnikov S.A., Voroshilov N.V. 2024. Agglomeration processes in the regions of Russia: features and problems of activating positive effects. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 17 (1): 91–109 (in Russian). DOI: 10.15838/esc.2024.1.91.5.
- Kolomak E.A., Sherubneva A.I. 2023. Assessing the significance of agglomeration effects in the south of Siberia. *Spatial Economics*, 19 (1): 52–75 (in Russian). DOI: 10.14530/se.2023.1.052-069.
- Kopytova E.D., Patrakova S.S. 2024. Agglomeration effects of large cities: assessment using microdata. *Problems of territorial development*, 28 (2): 10–23 (in Russian). DOI: 10.15838/ptd.2024.2.130.
- Lavrinenko P.A., Mikhailova T.N., Romashina A.A., Chistyakov P.A. 2019. Agglomeration Effects as a Tool for Regional Development. *Problems of Forecasting*, 3 (174): 50–59 (in Russian).
- Lappo G.M., Polyani P.M., Selivanova T.I. 2007. Agglomerations of Russia in the 21st century. *Bulletin of the Irkutsk Region Regional Development Fund*, 1: 45–52 (in Russian).
- Manaeva I.V., Melnikov V.V. 2025. Assessment of the potential of agglomeration processes in the regions of the Russian Federation. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 18 (2): 90–106 (in Russian). DOI: 10.15838/esc.2025.2.98.5
- Olifir D.I. 2024. Spatial potential of agglomeration effects: determination methodology based on the materials of the St. Petersburg agglomeration. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 17 (2): 113–128 (in Russian). DOI: 10.15838/esc.2024.2.92.6
- Rastvortseva S.N. 2013. Managing the development of economic activity concentration processes in the region: approaches of the new economic geography: Monograph. Moscow: Ekon-inform, 131 p (in Russian).
- Rastvortseva S.N., Blokhina S.D. 2024. Regional agglomeration effects in the Russian economy. *Problems of territorial development*, 28 (3): 10–28 (in Russian). DOI: 10.15838/ptd.2024.3.131.2
- Sobolev S.A. 2022. Strengthening agglomeration processes in spatial development: theory and practice. *Bulletin of Moscow University. Series 21. Management (state and society)*, 4: 61–85 (in Russian).
- Suvorova A.V. 2023. Urban agglomerations: features of functioning and methodological principles of development. *Theoretical and Applied Economics*, 4: 1–17 (in Russian). DOI: 10.25136/2409-8647.2023.4.68863
- Schmidt A.V., Antonyuk V.S., Franchini A. 2016. Urban agglomerations in regional development: theoretical, methodological and applied aspects. *Economy of the region*, 12 (3): 776–789 (in Russian). DOI: 10.17059/2016-3-14.
- Fujita M., Ogawa H. 1982. Multiple equilibria and structural transition of nonmonocentric urban configuration. *Regional Science and Urban Economics*, 12: 161–196.
- Kipnis B.A. 1997. Dynamics and potentials of Israel's megalopolitan processes. *Urban Studies*, 34 (3): 489–501.
- Krugman P. 1991. Increasing returns and economic geography. *Journal of political economy*, 99(3): 483–499.
- Krugman P., Venables A.J. 1996. Integration, specialization, and adjustment. *European economic review*, 40(3-5): 959–967.
- Puga D. 1999. The rise and fall of regional inequalities. *European economic review*, 43(2): 303–334.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 16.06.2025

Поступила после рецензирования 14.07.2025

Принята к публикации 23.07.2025

Received June 16, 2025

Revised July 14, 2025

Accepted July 23, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Мельников Вадим Вячеславович, научный сотрудник, Научно-исследовательский институт социальных систем при МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Vadim V. Melnikov, Researcher, Social Systems Research Institute at Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

УДК 332.1

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-513-527

EDN GAWTQK

Методический инструментарий выявления приоритетов развития малых городов на основе матриц отраслевой инновационно-технологической специализации

Селезнев П.С., Вуйменков С.А., Худокормов Г.А., Белик В.Н.

Финансовый университет при Правительстве РФ
Россия, 125167, г. Москва, Ленинградский проспект 55
pseleznev@fa.ru, s.9999@mail.ru, vnbelik@fa.ru

Аннотация. В данной научной публикации развивается подход оценки приоритетов развития малых городов. Отмечена авторская методика исследователей Восточного центра государственного планирования, которая основана на применении скрининга социально-экономического развития муниципалитетов. Выделены подходы исследователей, которые определяют инструментарий, применение которого поможет выявить приоритеты развития малого города. Отдельно в статье представлена методика рейтинговой оценки комплексного социально-экономического развития муниципального образования. Также отмечено, что одним из инструментов оценки инновационного и технологического потенциала развития территорий выступает матрица отраслевой инновационно-технологической специализации. Визуализация этапов методики построения региональной инновационно-технологической матрицы иллюстративно представлена в данной работе. Также продемонстрирован пример матрицы Бостонской консалтинговой группы как эффективной модели, отражающей состояние социально-экономической системы. В результате проведенного исследования предложена авторская методика построения матрицы отраслевой инновационно-технологической специализации на основе оценки таких показателей, как количество организаций, занимающихся научно-исследовательскими разработками и научно-технической деятельностью, и средний объем выручки компаний малого города. Определение индексов и построение матрицы позволяет наглядно видеть уровень протекания и реализации инновационных и технологических процессов в малых городах РФ.

Ключевые слова: приоритеты развития, малый город, матрица отраслевой инновационно-технологической специализации, инновационность, инновационная стратегия

Благодарности: статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансовому университету при Правительстве РФ.

Для цитирования: Селезнев П.С., Вуйменков С.А., Худокормов Г.А., Белик В.Н. 2025. Методический инструментарий выявления приоритетов развития малых городов на основе матриц отраслевой инновационно-технологической специализации. *Экономика. Информатика*, 52(3): 513–527. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-513-527. EDN GAWTQK

Methodological Tools for Identifying Town Development Priorities Based on Matrices of Sectoral Innovation and Technological Specialization

Pavel S. Seleznev, Semyon A. Vuymenkov, Georgy A. Khudokormov, Valery N. Belik

Financial University under the Government of the Russian Federation
55 Leningradsky Ave., Moscow 125167, Russia
pseleznev@fa.ru, s.9999@mail.ru, vnbelik@fa.ru

Abstract. This scientific publication develops an approach to assessing the priorities in the development of towns. The methodology based on the application of socio-economic development screening of municipalities

© Селезнев П.С., Вуйменков С.А., Худокормов Г.А., Белик В.Н., 2025



that is highlighted in the paper has been developed by the authors, researchers of the Eastern Center for State Planning. The researchers' approaches are outlined, which define the tools that can be used to identify town development priorities. The article also presents a methodology for ranking the comprehensive socio-economic development of a municipal formation. The matrix of sectoral innovation and technological specialization is described as one of the tools for assessing the innovative and technological potential of territorial development. Visualization of the stages of the methodology for constructing a regional innovation and technological matrix is presented in the work. The article also demonstrates an example of the Boston Consulting Group matrix as an effective model that reflects the state of the socio-economic system. The research findings allow the authors to propose a methodology for constructing a matrix of sectoral innovation and technological specialization, based on the assessment of indicators, such as the number of organizations engaged in research and development, as well as scientific and engineering activities, and the average revenue of town companies. The determination of indices and the construction of the matrix allow for a clear visualization of the level of innovation and technological processes in the towns of the Russian Federation.

Keywords: development priorities, small city, matrix of sectoral innovation and technological specialization, innovativeness, innovation strategy

Acknowledgements: the article is based on the results of the research carried out at the expense of budget funds under state assignment to the Financial University under the Government of the Russian Federation.

For citation: Seleznev P.S., Vuymenkov S.A., Khudokormov G.A., Belik V.N. 2025. Methodological Tools for Identifying Town Development Priorities Based on Matrices of Sectoral Innovation and Technological Specialization. *Economics. Information technologies*, 52(3): 513–527 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-513-527. EDN GAWTQK

Введение

Актуальность представленной темы исследования обусловлена важностью теоретико-методологического обоснования приоритетов развития малых городов и методического обеспечения построения матрицы отраслевой инновационно-технологической специализации. В настоящее время в Российской Федерации достаточно большое количество городов отнесено к малым. Это количество насчитывает более 800 городов. Развитие малых городов достаточно долго не привлекало особенного внимания со стороны власти. Однако такое игнорирование проблем малых городов негативно сказалось на их развитии. Так, например, в настоящее время наблюдается серьезное ухудшение инфраструктуры, промышленности малых городов. Но в 2025 году скорректированная Стратегия пространственного развития (до 2036 года) выделила малые города с точки зрения важного приоритета их развития. С уверенностью можно отметить тот факт, что зарубежный опыт демонстрирует высокий уровень эффективности в создании технологических центров в малых городах, которые обладают комплексом преимуществ в удобной инфраструктуре и компактности размещения. Именно малые города наполнены преимуществами для осуществления в них запуска инновационной промышленности и развития цифровых проектов. Цель данного исследования состоит в изучении совокупности методов, приёмов, которые находят свое применение с точки зрения выбора наиболее приемлемых приоритетов развития малых городов. Задача исследования состоит в разработке авторского подхода выявления приоритетов развития малых городов с использованием матрицы отраслевой инновационно-технологической специализации на основании оценки группы показателей: количество организаций, занимающихся научно-исследовательскими разработками и научно-технической деятельностью, и средний объем выручки компаний малого города.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступают приоритеты развития малых городов на основе матриц отраслевой инновационно-технологической специализации. Информационная основа исследования сформирована по официальным данным платформы СПАРК-Интерфакс.

В процессе данного исследования для решения поставленной задачи были использованы общенаучные диалектические методы исследования, системный подход, принцип рассмотрения явлений от общего к особенному и частному.

Результаты и их обсуждение

Многие исследователи определяют методический инструментарий, использование которого будет способствовать выявлению возможности выбора приоритетов развития малых городов, их эволюции, в том числе и инновационно-технологического развития малого города. Сделаем акцент, что группа исследований посвящена поиску приоритетов, потенциалов, факторам развития городов, муниципалитетов, регионов, которые также могут быть применимы и к малым городам.

Так, Благовидова Н.Г., Юдина Н.В. определяют скрытый потенциал малых городов. В исследовании отмечено, что «именно этот скрытый потенциал является наиболее стратегически важным в структуре их социально-экономического потенциала» [Благовидова, Юдина, 2021]. Авторы предлагают определять скрытый потенциал, используя метод мультифакторного анализа, оценивая три группы индикаторов:

- группа, на основании которой можно дать характеристику социальной устойчивости и кооперации малого города во время кризисных периодов;
- группа индикаторов, на основании оценки которых выявляется способность урбанизированной системы к трансформации и многопрофильной занятости;
- группа структурно-планировочной связности малого города.

Ключникова В.Р. [Ключникова, 2014] скомпоновала несколько подходов оценки социально-экономического развития малого города. К подходам отнесены такие, как социологическо-экспертный, экономико-статистический, проектный подходы и подход неинституциональной экономики.

Деневизюк Д.А. [Деневизюк, 2022] в своей работе делает акцент на том, что возможно проводить оценку комплексного социально-экономического развития малого города через оценку индикаторов четырех подсистем, а именно экономического и демографического развития города и подсистем благосостояния жителей города и социальной городской инфраструктуры.

Веприкова Е.Б., Кисленок А.А., Гулидов Р.В. [Веприкова, Кисленок, Гулидов, 2022] предлагают методику, которая заключается в проведении, по мнению авторов, скрининга социально-экономического развития муниципалитетов, их локальной депрессивности. Применение методики позволяет, например, выявить признаки отсутствия возможностей для эндогенного развития муниципалитетов.

Авторы [Чистопольская, Щербань, 2018] предлагают методику, основа которой заключается в определении рейтинга комплексного социально-экономического развития муниципальных образований. Методика учитывает определение комплексного рейтинга, который определяется при оценке четырех рейтингов муниципального образования: экономического развития; инвестиционной активности; развития социальной сферы; уровня и качества жизни населения.

Исследователи [Колчина, Лесничая, 2018] подчеркивают важность оценки диспропорций уровня социально-экономического развития муниципальных образований и предлагают оценивать уровень социально-экономического развития городских поселений путем расчета интегрального показателя. На его основании появляется возможность группировки городских округов и выбора приоритетных мер и инструментов воздействия на территории со стороны государственной власти.

Сульдина Г.А., Хамидулина А.М. [Сульдина, Хамидулина, 2012] предлагают оценивать сбалансированность социально-экономического развития муниципальных образований. Методика предполагает оценку базовых параметров развития территорий и оценку 32 показателей, которые описывают различные аспекты социально-экономического развития муниципального образования.



Скворцова А.С., Воротников А.М. [Скворцова, Воротников, 2022] предлагают оценивать возможность устойчивого развития городов с учетом трех направлений ESG-трансформации: экологическое, социальное, результаты деятельности администрации города. Авторы делают акцент на том, что при использовании данной методики возможно отслеживать динамику развития городов по всей России. По итогам формирования рейтинга возможно выявить, например, каким городам необходимо оказать финансовую помощь из федерального бюджета. Оценка рейтинга по данной методике может катализировать мотивацию городских властей по улучшению своих экологических, социальных и управленческих показателей».

Делая акцент на методиках, выявляющих уровень технологического развития города, отметим исследование [Гармашова, Дребот, Баранов, Митус, Тарабардина, 2020], фокус которого направлен на анализ уровня технологического развития города, при этом во внимание принимается определенный технологический уклад. Уровень технологического развития определяется как доля технологического уклада в валовом объеме производства нарастающим итогом.

Шевченко А.А. [Шевченко, 2024] в своей работе приводит группировку городов по относительному темпу прироста значений индекса IQ городов («умных» городов), в том числе выделяя группу технологически-ориентированных городов.

Группа авторов выявляет факторы, влияющие на инновационное развитие города, определяет наиболее оптимальные методики оценки инновационного развития городов. Так, исследователи [Соколова, Варакина 2016] выделяют группу факторов, влияющих на процесс формирования инновационного потенциала крупного города. Также факторы, влияющие на приращение инновационного потенциала территории, выделены в работе Семячкова К.А. [Семячков, 2021]. Конягина М.Н., Хэлльстром А.К., Хэлльстром Д.А. [Конягина, Хэлльстром, Хэлльстром, 2024] выявляют наиболее оптимальные методики, которые могут быть применимы для оценки инновационного потенциала города. Авторами подробно, на примере городов, сравниваются такие методики, как «Сравнительный анализ уровней использования инновационных потенциалов субъектов Российской Федерации» и «Интегральная оценка инновационного потенциала регионов Севера и Арктики», а также акцентируется внимание на рейтинге инновационного развития регионов и отчете об оценке рейтинга РИА Новости. Исследователи акцентируют внимание, что применение методик позволит комплексно оценить инновационный потенциал города.

Однако анализ исследований выявил отсутствие комплексной методики оценки инновационно-технологического развития города, которая может быть использована для более углубленного изучения проблем развития малых городов и выбора приоритетов их развития.

Отметим, что в качестве инструмента оценки инновационного и технологического потенциала развития территорий также может выступать матрица отраслевой инновационно-технологической специализации. Построение подобного типа матриц целесообразно для регионов, когда необходимо создать каркас оценки инновационного и технологического потенциала.

Привлекает внимание исследование ученых Е.В. Балацкого, Н.А. Екимовой [Балацкий, Екимова, 2019], которые в своем научном труде предлагают подход конструирования инновационно-технологических матриц, применяя значения индексов относительной производительности труда и относительных удельных затрат на исследования и разработки. В некоторых работах [Балацкий, Раптовский, 2007а; Балацкий, Раптовский, 2007б] можно наблюдать формирование простого типа наглядной аналитической конструкции, которая получила название инновационно-технологическая матрица. Она выглядит как симметричная таблица со следующими координатами: «технологический уровень – инновационная активность».

По нашему мнению, актуальным примером выступает применение индекса относительной производительности труда. Отметим, что в отличие от подхода авторов (который применяется на уровне стран), можно применять данный индекс и для малых городов.

Полученные результаты представленных индексов находятся в границах [0; 100 %].

Имея статистические данные представленных показателей, данную методику можно применить для оценки инновационной и технологической активности малых городов (рис. 1).

Оценка
индекса

$$J_i = (P_i / P_{usa}) \times 100 \%,$$

где J_i – индекс относительной производительности труда;

P_i – величина производительности труда в i -ой стране;

P_{usa} – величина производительности труда в США.

Рис. 1. Алгоритм расчета индекса относительной производительности труда
Fig. 1. Algorithm for calculating the relative labor productivity index

Аналогичный подход можно применить при оценке инновационной активности малых городов за счет следующего индекса:

$$I_i = (C_i / C_{usa}) \times 100 \%, \quad (1)$$

где I_i – значение индекса инновационной активности;

C_i – значение величины удельных затрат на исследования и разработки в i -й стране;

C_{usa} – величина удельных затрат на исследования и разработки в США.

Отдельно следует отметить исследование Веселовой Н.В. [Веселова, 2011], которая отметила следующий факт: чтобы построить инновационно-технологическую матрицу (ИТМ) промышленности, целесообразно опираться на методологию уровней построения ИТМ, которые используются в различных государствах для определения инновационно-активных регионов. Согласимся с данным исследователем, что указанную методологию можно применить и к оценке промышленного потенциала в разрезе внешнеэкономической деятельности. Чтобы построить региональную инновационно-технологическую матрицу, автор использовала следующий вариант методики, визуально представленный на рис. 2. Важно отметить, что построенная матрица должна подтвердить отраслевые приоритеты, которые сформулированы в стратегии развития города.

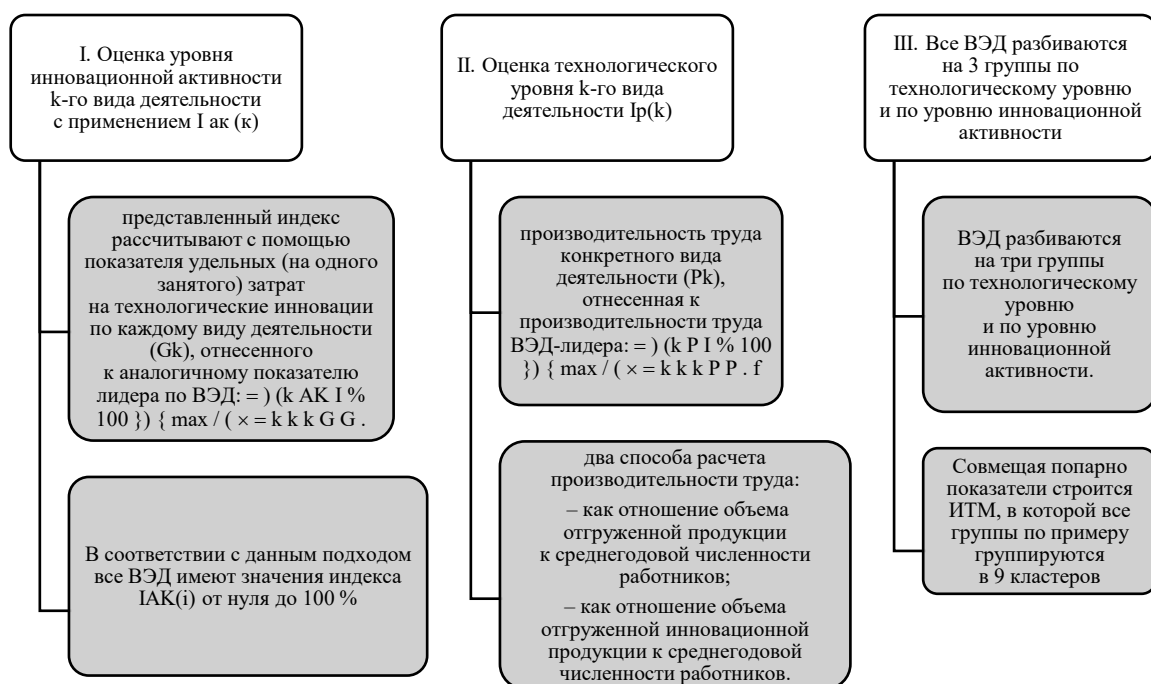


Рис. 2. Этапы методики построения региональной инновационно-технологической матрицы
Fig. 2. Stages of the methodology for constructing a regional innovation and technology matrix

Чтобы построить классификацию городов, автор предлагает составить градацию технологического уровня. Данный уровень позволяет задать определенную конъюнктуру на восприимчивость к инновационным решениям (рис. 3).

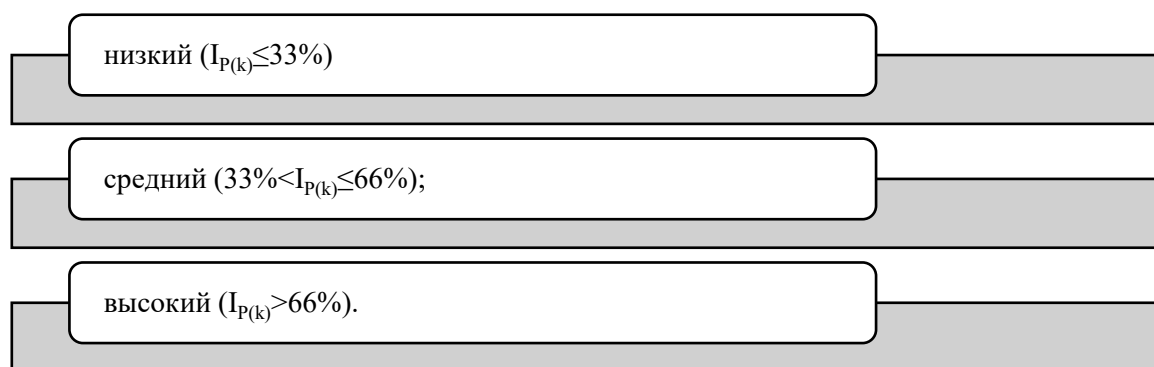


Рис. 3. Градация технологического уровня по спросу на восприимчивость к инновациям
 Fig. 3. Gradation of technological level according to demand for receptivity to innovation

Аналогичным образом можно составить градацию уровня инновационной активности, которая как раз таки формирует предложение инновационных решений.

Используя классификационные групповые признаки, можно объединить значения показателей оценки как инновационного, так и технологического уровня и на основании этого визуализировать инновационно-технологическую матрицу. Подчеркнем, что в данной матрице регионы должны быть расположены на пересечении групп соответствующего уровня. Основное смысловое значение такого типа матрицы заключается в совмещении значений данных, которые косвенным образом будут характеризовать конъюнктуру инновационных решений.

Ученые зарубежных стран предложили разработку различных матричных моделей. Отметим, что самой эффективной моделью, отражающей состояние социально-экономической системы, выступает построение матрицы Бостонской консалтинговой группы (БКГ). В данной модели значение первого показателя характеризуется уровнем положения объекта на определенный период времени. Для второго показателя характерно оценить перспективную направленность в будущем развитии объекта.

Объектами данной матрицы БКГ могут быть как различные предприятия, так и регионы, города. Каждая ось отражает значение одного параметра. Изучаемый комплекс объектов исследования размещают в четырех квадрантах [Лапицкая, Лапицкий, 2012].

Отдельно хотелось бы отметить исследование ученого [Семячков, 2021], который предложил использовать модифицированную матрицу БКГ, а также матрицу 7I, которая выступает практическим инструментарием в целях реализации этапов планирования в развитии территорий на основе «умного города».

Автор предлагает разработать механизм приоритетных направлений развития города на основе методологии матрицы БКГ. Семячков К.А. считает, что в рамках слияния методологического подхода матрицы БКГ и идеи многоступенчатого моделирования можно создать механизм выбора управленческого решения определенного приоритета. Примером можно назвать отбор по цифровизации среды городского поселения как приоритетную задачу.

Подчеркнем, что в рамках экспертного мнения необходимо определить критерии, на основании которых будет происходить распределение проектов. Автор считает, что перспективы развития «умного города» зависят от подхода, суть которого опирается на проведение моделирования прогрессирования городской среды в таких координатах, как «готовность/вовлеченность» (рис. 4.).

По данным координатам автор считает, что можно разделить города на 4 группы, предложив определенные рекомендации по их развитию.

Авторы [Попов, Семячков, 2020] в своем научном исследовании предложили подход, который учитывает этапность развития «умных городов» и перечень основных компонентов.

Как считают авторы, применение матричного подхода позволяет оценить эволюцию развития «умного города» и его основные характеристики.

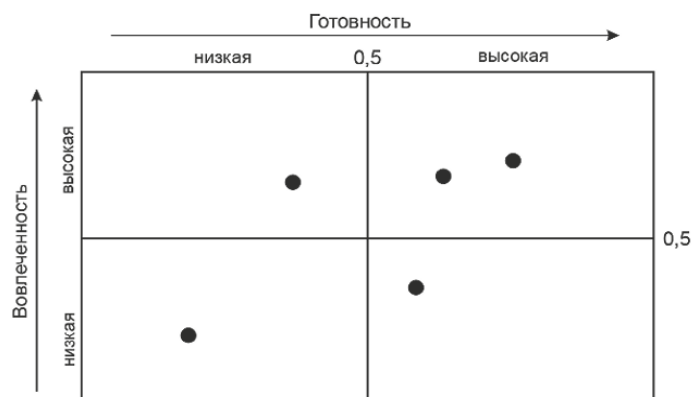


Рис. 4. Оценка городов по координатам «готовность/вовлеченность» [Семячков, 2021]
Fig. 4. Assessment of towns in the “readiness/involvement” coordinates [Semyachkov, 2021]

Согласимся с точкой зрения авторов, что применение матричного подхода к оценке развития «умных городов» в рамках оценки этапов формирования, исследования компонентов «умного города» является комплексным исследованием в целях их анализа и оценки функционирования. Ученые отмечают, что для оценки вовлеченности предлагается использовать показатели взаимодействия пользователей и технических систем, развития и использования инноваций в рамках основных компонент «умного города».

Рассмотрев представленные выше подходы авторов, считаем, что матрица отраслевой инновационно-технологической специализации выступает приоритетным инструментом с точки зрения выбора вектора развития малых городов. Тенденция роста технологического уровня развития малых городов создаст перспективные условия для выхода города на более высокий инновационный уровень развития, снижения пространственных рисков.

Ранее проводимый авторами анализ развития малых городов показал, что в настоящее время на территории РФ растет количество малых городов, которые имеют высокий уровень риска «пространственной аритмии города».

Нами выделены основные проблемы развития малых городов (рис. 5).

Вектор развития определенного типа малого города должен быть направлен на реализацию мероприятий, в том числе инновационно-технологического характера, с точки зрения:

- формирования бренда территории;
- необходимости предложения и обоснования развития на территории города хотя бы одного вида производственной деятельности;
- повышения индекса качества городской среды за счет внедрения инновационных технологий;
- повышения экономической эффективности за счет роста объема отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами по промышленным видам деятельности по крупным и средним организациям;
- внедрения инновационных видов производства товаров, работ, услуг.

На наш взгляд, матрица отраслевой инновационно-технологической специализации – наиболее приоритетный инструмент в аспекте выбора вектора развития малых городов. Данный инструмент может быть использован региональными и государственными органами для определения уровня инновационно-технологического развития (специализации), оценки сбалансированности развития данных сфер.



Рис. 5. Каталог проблем развития малых городов, являющихся опорными населенными пунктами РФ
Fig. 5. Catalog of problems in the development of small towns, which are centres of administrative and territorial formations

Рост инновационного и технологического уровня развития малых городов позволит выйти им на более высокий инновационный уровень развития. При этом мы согласны с мнением Е. Балацкого [Балацкий, 2007], который утверждает, что если необходимо выйти на более высокий инновационный уровень, то это возможно, в совокупности, за счет роста технологического уровня. Автор утверждает, что «на вложения в исследования наша экономика реагирует очень слабо именно из-за отсталости (неразвитости) основного капитала. Пока не будет достаточного потока финансов в оборудование, никакое «закачивание» денег в инновационную сферу не работает» [Балацкий, 2007]. Именно объем средств, вложенных в основной капитал, дает оптимальную картину уровня технологического развития.

Отметим, что эффективность реализации технологий, которые, как правило направлены на снижение затрат, применение новых ресурсов, рост производительности и увеличение оборотов предприятий малых городов за счет роста продаж продукции, влияют на базовый показатель – выручку, так как реализация вышеперечисленных мероприятий повышает финансовый результат функционирования предприятия. Это, в частности, отмечено и в работах исследователей [Асеев, Бугорский, 2025; Соколов, Матыцина, 2024]. Поэтому одним из показателей, на основании которого можно выстроить вывод об уровне технологического развития, помимо объема инвестированных средств в основной капитал, будет так же являться показатель выручки предприятий и организаций малого города.

Уровень инновационного развития города может характеризовать достаточно большое количество индикаторов. Так, к данной группе индикаторов относятся: объем производимой и реализуемой инновационной продукции, объем затрат на инновации, доля предприятий, осуществляющих инновационную деятельность, количество предприятий, функционирующих на территории малого города, занимающихся научно-исследовательскими разработками и научно-технической деятельностью. Оценка результатов, отраженных в определенном поле данной матрицы, позволит также выявить возможности инновационно-технологического развития городов, их инновационно-технологической специализации. Такая специализация может проявляться через различные формы территориальной организации инновационного производства: предприятия, разрабатывающие инновации, занимающиеся

научно-технической деятельностью, промышленные узлы, технологические парки, агломерации предприятий.

Считаем, что для выявления приоритета развития малого города с точки зрения особенностей его инновационно-технологической специализации, выявления уровня инновационной и технологической специализации, а также построения наглядной матрицы инновационно-технологической специализации целесообразно рассчитать следующие два индекса развития малого города:

1. Индекс инновационной специализации малого города (Iис): цель – оценить инновационный потенциал. Основным индикатор, на основании которого рассчитывается данный индекс – количество организаций, занимающихся научно-исследовательскими разработками и научно-технической деятельностью (И1). Оценить данный показатель возможно, соотнося данный индикатор с данными индикатора города – лидера (имеющего максимальное значение показателя).

2. Индекс технологической специализации города (Iтс): цель – оценить технологический потенциал. Основным индикатор, на основании которого рассчитывается данный индекс – средняя выручка, млн руб. (И2). Оценить значение также возможно, соотнося данный индикатор с данными индикатора города-лидера (имеющего максимальное значение показателя).

Выбор основных индикаторов обусловлен достаточно сложным поиском данных муниципальной статистики для анализа, недостаточностью базы данных муниципальной статистики. Ресурс, который был использован для выбора значений основных индикаторов – статистика городов РФ, представленная на платформе СПАРК-Интерфакс [СПАРК. Статистика компаний России].

Распределение малых городов по уровню инновационно-технологического развития (инновационно-технологической специализации) будет выглядеть следующим образом:

- сверхнизкий уровень – $I_{ис} (I_{тс}) \leq 0,19$;
- низкий уровень – $I_{ис} (I_{тс}) 0,20-0,39$;
- средний – $I_{ис} (I_{тс}) 0,4-0,59$;
- высокий – $I_{ис} (I_{тс}) 0,6-0,79$;
- сверхвысокий – $0,8 < I_{ис} (I_{тс}) \leq 1$.

Анализ индексов проводился по выборке 165 малых городов (выделенных в Стратегии пространственного развития как опорные населенные пункты) Центрального федерального округа. Результаты выборки малых городов по индексу инновационного развития (специализации) и технологического развития (специализации) за 2023 год приведены в табл. 1.

Отметим, что для разных регионов матрица будет иметь определенный вид с учетом специфики инновационного и технологического развития, специализации малых городов. Определение индексов и построение матрицы будет давать возможность наглядно видеть уровень протекания и реализации инновационных и технологических процессов в малых городах РФ.

Заключение

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что наблюдается достаточно большой разрыв с точки зрения инновационно-технологических особенностей между малыми городами и городами-лидерами (в большей степени это города Московской области). Траектория инновационно-технологического развития малых городов не оптимальна. Высокий и сверхвысокий уровень инновационной либо технологической специализации имеют только пять малых городов ЦФО, что составляет всего 3 % от количества рассматриваемых малых городов. Подчеркнем, что средний уровень характерен для 6 городов. Остальные города имеют низкий и сверхнизкий уровень инновационно-технологического развития.

Однако наблюдается выраженная несбалансированность с точки зрения как технологического, так и инновационного развития малых городов, выборка которых приведена в исследовании. Она состоит в том, что некоторые города – Фатеж, Узловая, Ефремов, Короча,



Новый Оскол, Скопин, Трубчевск достаточно хорошо развиваются с точки зрения реализации технологических составляющих. Однако инновационное развитие данной группы малых городов достаточно низкое. Противоположная характеристика (достаточно высокий уровень инновационной специализации) характерна для городов Солнечногорск и Краснознаменск. Только один город – Черноголовка – развивается на достаточно высоком уровне с точки зрения инновационно-технологической специализации.

Поэтому в настоящее время перед региональными и государственными властями стоит задача повышения уровня инновационно-технологической специализации, роста инновационной активности малых городов, обеспечения сбалансированности как инновационного, так и технологического развития малых городов. Игнорирование данных вопросов может привести к тому, что многие малые города могут ухудшать свои инновационно-технологические параметры и уйти из экономического поля как регионов, так и государства.

Таблица 1

Table 1

Результаты выборки малых городов по индексу инновационного
и технологического развития (специализации) – малые города ЦФО, 2023 г.
Results of sampling small towns by the index of innovative and technological development
(specialization) – small towns of the Central Federal District, 2023

Приоритет развития	Значение индекса / уровень инновационно-технологического развития	Иис / малый город ЦФО (опорный населенный пункт)	Итс / малый город ЦФО (опорный населенный пункт)
1	2	3	4
ПРИОРИТЕТ РАЗВИТИЯ – РЕАЛИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МАЛОГО ГОРОДА, РЕАЛИЗАЦИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА	0–0,19 / сверхнизкий	Шебекино, Алексеевка, Валуйки, Новый Оскол, Грайворон, Короча, Новозыбков, Дятьково, Унеча, Стародуб, Жуковка, Карачев, Почеп, Трубчевск, Сураж, Мглин, Севск, Злынка, Кольчугино, Киржач, Радужный, Юрьев-Польский, Меленки, Гороховец, Камешково, Острогожск, Нововоронеж, Бутурлиновка, Павловск, Бобров, Калач, Поворино, Богучар, Эртиль, Новохопёрск, Тейково, Кохма, Вичуга, Фурманов, Родники, Приволжск, Южа, Комсомольск, Заволжск, Юрьево, Пучеж, Гаврилов Посад, Людиново, Киров, Козельск, Сухиничи, Боровск, Таруса, Медынь, Юхнов, Спас-Деменск, Мосальск, Мещовск, Шарья, Нерехта, Волгореченск, Мантурово, Галич, Нея, Макарьев, Солигалич, Чухлома, Кологрив, Курчатов, Льгов, Рыльск, Щигры, Обоянь, Дмитриев, Суджа, Фатеж, Грязи, Усмань, Лебедянь, Данков, Чаплыгин, Задонск, Луговицы, Зарайск, Талдом, Ливны, Мценск, Болхов, Дмитровск, Малоархангельск, Новосиль, Касимов, Скопин, Рыбное, Сасово, Рязск, Кораблино, Михайлов, Шацк, Спас-Клепики, Рославль, Ярцево, Сафоново, Гагарин, Десногорск, Дорогобуж, Рудня, Ельня, Сычёвка, Починок, Демидов, Духовщина, Рассказово, Моршанск, Котовск, Уварово, Кирсанов, Жердевка, Вышний Волочек, Торжок, Кимры, Конаково,	Шебекино, Алексеевка, Валуйки, Грайворон, Новозыбков, Дятьково, Унеча, Стародуб, Жуковка, Карачев, Почеп, Сураж, Мглин, Севск, Злынка, Кольчугино, Киржач, Радужный, Юрьев-Польский, Меленки, Гороховец, Камешково, Острогожск, Нововоронеж, Бутурлиновка, Калач, Поворино, Богучар, Эртиль, Новохопёрск, Тейково, Кохма, Вичуга, Фурманов, Родники, Приволжск, Южа, Комсомольск, Заволжск, Юрьево, Пучеж, Гаврилов Посад, Людиново, Киров, Козельск, Сухиничи, Таруса, Медынь, Юхнов, Спас-Деменск, Мосальск, Мещовск, Шарья, Нерехта, Волгореченск, Мантурово, Галич, Нея, Макарьев, Солигалич, Чухлома, Кологрив, Курчатов, Льгов, Рыльск, Щигры, Обоянь, Дмитриев, Суджа, Усмань, Данков, Чаплыгин, Задонск, Солнечногорск, Краснознаменск, Кашира, Шатура, Можайск, Волоколамск, Руза, Луговицы, Зарайск, Талдом, Ливны, Мценск, Болхов, Дмитровск, Малоархангельск, Новосиль, Касимов, Рыбное, Сасово, Рязск, Кораблино, Михайлов, Шацк,

Окончание табл. 1
End of the table 1

1	2	3	4
		Удомля, Бежецк, Бологое, Нелидово, Осташков, Кашин, Калязин, Торопец, Лихославль, Кувшиново, Западная Двина, Старица, Андреаполь, Зубцов, Весьегонск, Красный Холм, Белый, Ефремов, Киреевск, Тутаев, Углич, Ростов, Гаврилов-Ям, Данилов, Мышкин, Пошехонье	Спасск-Рязанский, Спас-Клепики, Рославль, Ярцево, Сафонов, Гагарин, Десногорск, Рудня, Ельня, Сычёвка, Починок, Демидов, Духовщина, Рассказово, Моршанск, Котовск, Уварово, Вышний Волочек, Торжок, Кимры, Конаково, Удомля, Бежецк, Бологое, Нелидово, Осташков, Кашин, Калязин, Торопец, Лихославль, Кувшиново, Западная Двина, Старица, Андреаполь, Зубцов, Весьегонск, Красный Холм, Белый, Киреевск, Тутаев, Переславль-Залесский, Углич, Ростов, Гаврилов-Ям, Данилов, Мышкин, Пошехонье
	0,2–0,39 / низкий	Строитель, Гусь-Хрустальный, Вязники, Суздаль, Малоярославец, Жуков, Боровск, Кашира, Шатура, Можайск, Волоколамск, Руза, Спасск-Рязанский, Узловая, Переславль-Залесский	Строитель, Павловск, Бобров, Боровск, Лебедянь, Дорогобуж, Грязи, Кирсанов, Жердевка
ПРИОРИТЕТ РАЗВИТИЯ – ДАЛЬНЕЙШЕЕ ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МАЛОГО ГОРОДА, РЕАЛИЗАЦИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА	0,4–0,59 / средний	Краснознаменск	Короча, Новый Оскол, Скопин, Трубчевск, Ефремов
ПРИОРИТЕТ РАЗВИТИЯ – УДЕРЖИВАНИЕ КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ, ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ	0,6–0,79 / высокий	Черноголовка	Фатеж, Узловая
	0,8–1/ сверхвысокий	Солнечногорск	Черноголовка

На рис. 6 приведена графическая интерпретация результатов (матрица) Ис и Its по представленной выборке городов.

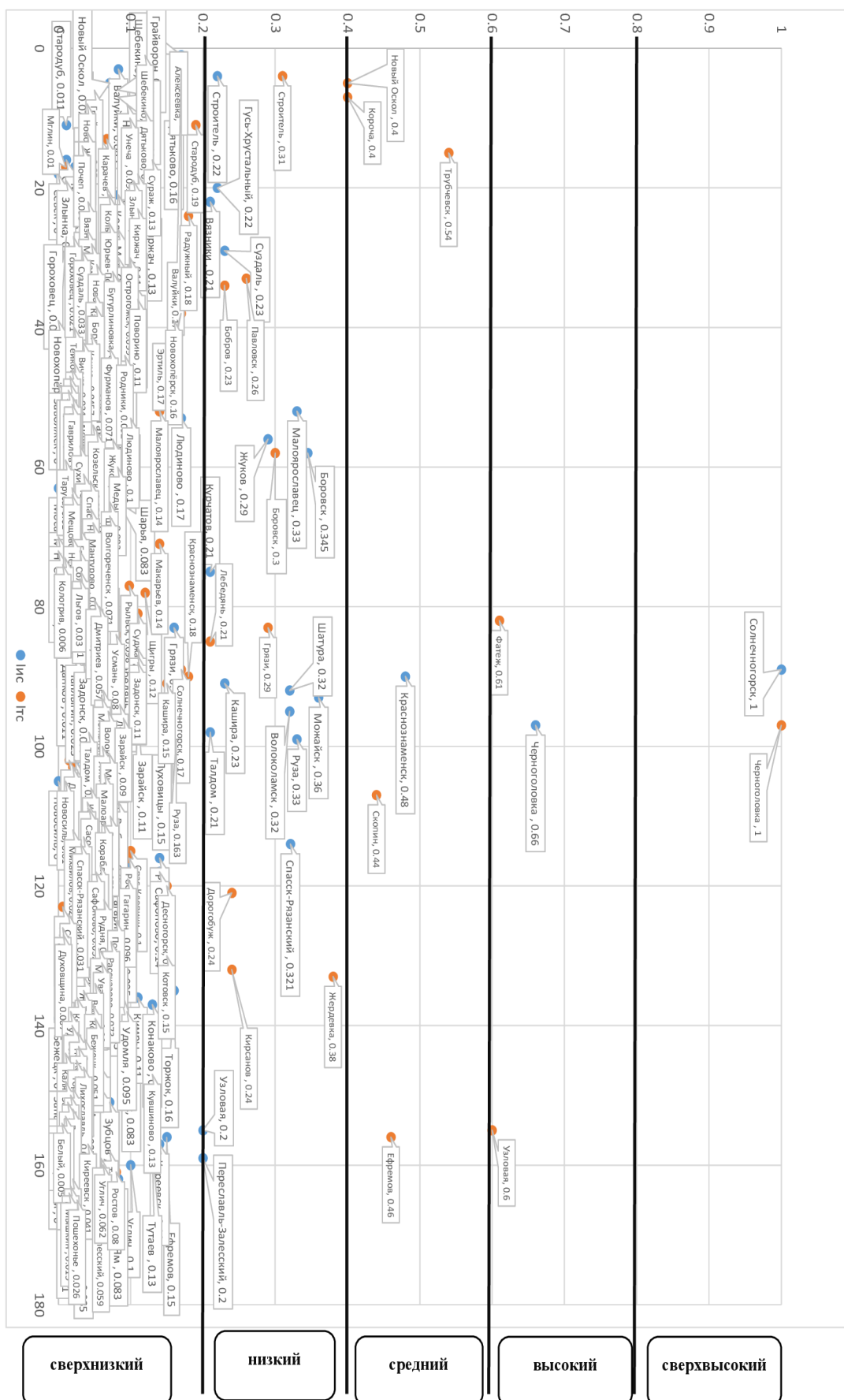


Рис. 6. Графическая интерпретация результатов (матрица) Iis и Itc по выборке городов, 2023 г.
Fig. 6. Graphical interpretation of the results (matrix) of Iis and Itc for sampling of towns, 2023

Список источников

- Об организации исполнения ведомственного проекта Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации цифровизации городского хозяйства «Умный город» и признании утратившими силу некоторых актов Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации: Приказ Минстроя России от 28.09.2023 №696/прс. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=838325&dst=100012&field=134&rnd=pb3BPA#FtssLaUMhIhQpRQn> (дата обращения: 02.08.2025).
- Рейтинг инновационного развития регионов НИУ ВШЭ // НИУ «Высшая школа экономики» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://region.hse.ru/rankingid19> (дата обращения: 02.08.2025).
- Рейтинг РИА Новости // ОИА Новости. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ria.ru/20211025/tehnologii-1756053678.html> (дата обращения: 02.08.2025).
- СПАРК. Статистка компаний России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spark-interfax.ru/statistics> (дата обращения: 02.08.2025).

Список литературы

- Асеев О.В., Бугорский Д.В. 2024. Использование инновационных технологий как фактор повышения финансового результата деятельности организации. *ЕГИ*, 3 (53): 25–28.
- Балацкий Е.В., Екимов Н.А. 2019. Инновационно-технологические матрицы и национальные стратегии экономического развития. *Управленец*, 5: 9–19.
- Балацкий Е.В., Раптовский А.В. 2007а. Инновационно-технологическая матрица российских регионов. *Общество и экономика*, 2–3: 138–159.
- Балацкий Е.В., Раптовский А.В. 2007б. Инновационные и инвестиционные факторы эффективности производства. *Общество и экономика*, 1: 3–27.
- Благовидова Н.Г., Юдина Н.В. 2021. Скрытый потенциал малых городов. *Academia. Архитектура и строительство*, 1: 92–100.
- Бухвальд Е.М., Валентик О.М. 2018. Малые города в системе пространственного регулирования российской экономики. *Региональная экономика. Юг России*, 1(19): 169–180.
- Веприкова Е.Б., Кисленок А.А., Гулидов Р.В. 2022. Методика оценки уровня социально-экономического развития муниципальных образований региона на основе выявления признаков локальной депрессивности. *Власть и управление на Востоке России*, 3 (100): 71–86.
- Веселова Н.В. 2011. Построение инновационно-технологической матрицы (на примере промышленности Нижегородской области). *Вестник ННГУ*, 5-2: 38–47.
- Гармашова Е.П., Дребот А.М., Баранов А.Г., Митус А.А., Тарабардина М.Ю. 2020. Оценка уровня технологического развития: региональный аспект. *Вопросы инновационной экономики*, 10 (4): 2005–2020.
- Деневизюк Д.А. 2022. Комплексный подход к оценке социально-экономического развития города. *РППЭ*, 9 (143): 36–47.
- Иванов О.Б., Бухвальд Е.М. 2024. Экономическое пространство как потенциал устойчивого развития. *ЭТАП: Экономическая теория*, 1: 4–52.
- Колчина О.А., Лесничая М.А. 2018. Модель оценки межмуниципальной социально-экономической дифференциации. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*, 8 (11А): 64–75.
- Конягина М.Н., Хэлльстром А.К., Хэлльстром Д.А. 2022. Поиск оптимальных подходов к оценке инновационного потенциала мегаполиса. *Управленческое консультирование*, 7: 96–114.
- Ключникова В.Р. 2014. Методический инструментарий оценки социально-экономического развития малых городов: содержание и проблемы использования. *ПСЭ*, 23 (51): 258–260.
- Лапицкая Л.В., Лапицкий А.В. 2012. Совершенствование диагностики продуктового портфеля в системе стратегического менеджмента. *Менеджмент и бизнес-администрирование*, 4: 28–46.
- Логинов С.В., Королева Е.Н. 2024. Оценка экономического развития малых городов на основе подхода «город как квазикорпорация». *Экономика, предпринимательство и право*, 14 (11): 6877–6888.
- Попов А.В., Гнатюк М.А. 2017. Стратегии инновационного развития малых городов России: специфика проблем и ресурсный потенциал. *Гуманитарий Юга России*, 2: 251–258.
- Попов Е.В., Семячков К.А. 2020. Матрица показателей развития умных городов. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*, 16, 8 (389): 1422–1443.



- Семячков К.А. 2021. Инновационный потенциал умного города. *Журнал экономической теории*, 18 (3): 474–484.
- Скворцова А.С., Воротников А.М. 2022. Возможности определения устойчивости развития городов России на основе оценки ESG-факторов (на примере г. Липецка). *Вестник РУК*, 3 (49): 53–57.
- Соколова С.А., Варакина С.А. 2016. Формирование и реализация инновационного потенциала крупного города в условиях кризиса. *Интернет-журнал Науковедение*, 8, 2 (33): 73–83.
- Соколов Д.С., Матыцина Н.П. 2024. Инновационные пути повышения эффективности деятельности организаций в современных условиях. *Символ науки*, 12-1-1: 169–171.
- Стрельцова Е., Кузьмин Г. 2019. Российские технограды: технологические профили городов. *Форсайт*, 3: 41–49.
- Сульдина Г.А. 2012. Оценка сбалансированности социально-экономического развития муниципальных образований в регионе. *Экономические науки*, 87: 244–248.
- Чистопольская Е.В., Щербань Е.Г. 2018. Формирование методики рейтинговой оценки комплексного социально-экономического развития муниципальных образований региона. *Известия Саратовского университета. Серия Экономика. Управление. Право*, 18 (3): 305–313.
- Шевченко А.А. 2024. Оценка уровня технологического развития умных городов РФ. *Вестник евразийской науки*, 16 (6): 75.
- Шульгин П. 2009. Культурное наследие как ресурс (новые тенденции в развитии малых городов России). *Мир перемен*, 2: 165–176.

References

- Aseev O.V., Bugorsky D.V. 2024. The use of innovative technologies as a factor in improving the financial results of an organization. *EGI*, 3 (53): 25–28. (in Russian).
- Balatsky E.V., Ekimova N.A. 2019. Innovative and technological matrices and national strategies for economic development. *Upravlenets*, 5: 9–19 (in Russian).
- Balatsky E.V., Raptovsky A.V. 2007a. Innovative and technological matrix of Russian regions. *Society and Economy*, 2–3: 138–159 (in Russian).
- Balatsky E.V., Raptovsky A.V. 2007b. Innovative and investment factors of production efficiency. *Society and Economy*, 1: 3–27 (in Russian).
- Blagovidova N.G., Yudina N.V. 2021. The hidden potential of small cities. *Academia. Architecture and Construction*, 1: 92–100 (in Russian).
- Buchwald E.M., Valentik O.M. 2018. Small cities in the system of spatial regulation of the Russian economy. *Regional Economics. South of Russia*, 1(19): 169–180 (in Russian).
- Veprikova E.B., Kislenok A.A., Gulidov R.V. 2022. Methodology for Assessing the Level of Socio-Economic Development of Municipalities in the Region Based on Identifying Signs of Local Depressiveness. *Power and Administration in Eastern Russia*, 3 (100): 71–86 (in Russian).
- Veselova N.V. 2011. Building an Innovation and Technology Matrix (Based on the Industry of the Nizhny Novgorod Region). *Vestnik NNGU*, 5-2: 38–47 (in Russian).
- Garmashova E.P., Drebot A.M., Baranov A.G., Mitus A.A., Tarabardina M.Yu. 2020. Assessment of the level of technological development: regional aspect. *Issues of Innovative Economy*, 10 (4): 2005–2020 (in Russian).
- Deneviziuk D.A. 2022. A Comprehensive Approach to Assessing the Socioeconomic Development of a City. *RPPES*, 9 (143): 36–47 (in Russian).
- Ivanov O.B., Buchwald E.M. 2024. Economic Space as a Potential for Sustainable Development. *STAGE: Economic Theory*, 1: 4–52 (in Russian).
- Kolchina O.A., Lesnichaya M.A. 2018. Model of Assessment of Inter-Municipal Socio-Economic Differentiation. *Economics: Yesterday, Today, Tomorrow*, 8 (11A): 64–75 (in Russian).
- Konyagina M.N., Hellstrom A.K., Hellstrom D.A. 2022. Search for optimal approaches to assessing the innovative potential of a megalopolis. *Management consulting*, 7: 96–114 (in Russian).
- Klyuchnikova V.R. 2014. Methodological Tools for Assessing the Socio-Economic Development of Small Cities: Content and Problems of Use. *PSJ*, 23 (51): 258–260 (in Russian).
- Lapitskaya L.V., Lapitsky A.V. 2012. Improving the diagnostics of the product portfolio in the strategic management system. *Management and Business Administration*, 4: 28–46 (in Russian).
- Loginov S.V., Koroleva E.N. 2024. Assessment of the Economic Development of Small Cities Based on the "City as a Quasi-Corporation" Approach. *Economics, Entrepreneurship and Law*, 14 (11): 6877–6888 (in Russian).
- Popov A.V., Gnatyuk M.A. 2017. Strategies for the Innovative Development of Small Cities in Russia: Specific Problems and Resource Potential. *Humanities of the South of Russia*, 2: 251–258 (in Russian).

- Popov E.V., Semyachkov K.A. 2020. Matrix of Indicators for the Development of Smart Cities. *National Interests: Priorities and Security*, 16, 8 (389): 1422–1443 (in Russian).
- Semyachkov K.A. 2021. Innovative potential of a smart city. *Journal of Economic Theory*, 18 (3): 474–484 (in Russian).
- Skvortsova A.S., Vorotnikov A.M. 2022. Opportunities for Determining the Sustainability of Russian Cities' Development Based on the Assessment of ESG Factors (Using the Example of Lipetsk). *Vestnik RUK*, 3 (49): 53–57 (in Russian).
- Sokolova S.A., Varakina S.A. 2016. Formation and Realization of Innovative Potential of a Large City in the Conditions of Crisis. *Internet-journal Naukovedenie*, 8, 2 (33): 73–83 (in Russian).
- Sokolov D.S., Matytsina N.P. 2024. Innovative Ways of Increasing the Efficiency of Organizations in Modern Conditions. *Symbol of Science*, 12-1-1: 169–171 (in Russian).
- Streltsova E., Kuzmin G. 2019. Russian Technograde: Technological Profiles of Cities. *Forsyth*, 3: 41–49 (in Russian).
- Suldina G.A. 2012. Assessment of the Balanced Socio-Economic Development of Municipalities in the Region. *Economic Sciences*, 87: 244–248 (in Russian).
- Chistopolskaya E.V., Shcherban E.G. 2018. Formation of a Methodology for Rating the Comprehensive Socio-Economic Development of Municipalities in the Region. *Izvestiya of Saratov University. Series Economics. Management. Law*, 18 (3): 305–313 (in Russian).
- Shevchenko A.A. 2024. Assessment of the Technological Development Level of Smart Cities in the Russian Federation. *Bulletin of Eurasian Science*, 16 (6): 75 (in Russian).
- Shulgin P. 2009. Cultural Heritage as a Resource (New Trends in the Development of Small Cities in Russia). *World of Changes*, 2: 165–176 (in Russian).

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 17.06.2025

Received June 17, 2025

Поступила после рецензирования 15.07.2025

Revised July 15, 2025

Принята к публикации 24.07.2025

Accepted July 24, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Селезнев Павел Сергеевич, доктор политических наук, доцент, профессор департамента политологии факультета социальных наук и массовых коммуникаций, декан факультета международных экономических отношений, Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, Россия

Pavel S. Seleznev, Doctor of Political Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Political Science at the Faculty of Social Sciences and Mass Communications, Dean of the Faculty of International Economic Relations, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Вуйменков Семен Алексеевич, кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, Россия

Semyon A. Vuymenkov, Candidate of Economic Sciences, leading researcher, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Худокормов Георгий Александрович, стажер-исследователь, Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, Россия

Georgy A. Khudokormov, Research Intern, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Белик Валерий Николаевич, кандидат юридических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, Россия

Valery N. Belik, Candidate of Law, Associate Professor, Leading Researcher, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia



ИНВЕСТИЦИИ И ИННОВАЦИИ INVESTMENT AND INNOVATIONS

УДК 338.46
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-528-538
EDN IBFDST

Тренды и ограничения развития инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг

^{1,2,3} Оборин М.С., ^{1,2} Терентьев А.И.

¹ Пермский институт (филиал) Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова,
Россия, 614070, г. Пермь, бульвар Гагарина, 57;

² Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15;

³ Пермский государственный аграрно-технологический университет им. ак. Д.Н. Прянишникова
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 23
recreachin@rambler.ru, Terentev.AI@rea.ru

Аннотация. Рынок образовательных услуг играет важную роль в формировании качественной и доступной системы образования, которая способствует развитию человеческого капитала, обеспечивает подготовку квалифицированных специалистов и, как следствие, определяет возможности экономического роста стран. Вместе с тем мировая экономика находится в состоянии трансформации под влиянием технического прогресса и цифровизации, что отражается и на рынке образовательных услуг, его участниках и их взаимодействии. В статье отражены основные процессы, связанные с инновационно-интеграционным потенциалом данного рынка, определены ключевые барьеры, замедляющие его развитие, предложено авторское определение инновационно-интеграционного потенциала и его основных компонентов.

Ключевые слова: рынок образовательных услуг, образование, инновационное развитие, трансформация, барьеры развития

Для цитирования: Оборин М.С., Терентьев А.И. 2025. Тренды и ограничения развития инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг. *Экономика. Информатика*, 52(3): 528–538. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-528-538. EDN IBFDST

Development of the Innovative and Integration Potential of the Educational Services Market: Trends and Limitations

^{1,2,3} Matvey S. Oborin, ^{1,2} Alexander I. Terentyev

¹ Perm Institute, branch of Plekhanov Russian University of Economics
57 Gagarin Blv., Perm 614070, Russia;

² Perm State National Research University, 15 Bukirev St, Perm 614990, Russia

³ Perm State National Research University, 23 Petropavlovskaya St., Perm 614990, Russia
recreachin@rambler.ru, Terentev.AI@rea.ru

Abstract. The educational services market plays an important role in the formation of a high-quality and affordable education system that promotes the development of human capital, provides training for qualified specialists and,

© Оборин М.С., Терентьев А.И., 2025

as a result, determines the economic growth opportunities of countries. At the same time, the global economy is in a state of transformation under the influence of technological progress and digitalization, which is reflected in the educational services market, its participants, and their interaction. The article reflects the main processes related to the innovation and integration potential of this market, identifies key barriers that slow down its development, and offers the authors' definition of the innovation and integration potential and its main components.

Keywords: the market of educational services, education, innovative development, transformation, barriers to development

For citation: Oborin M.S., Terentyev A.I. 2025. Development of the Innovative and Integration Potential of the Educational Services Market: Trends and Limitations. *Economics. Information technologies*, 52(3): 528–538 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-528-538. EDN IBFDST

Введение

Рынок образовательных услуг представляет собой сложный и динамично развивающийся сегмент социально-экономического устройства общества. Он играет ключевую роль в обучении и подготовке специалистов, способствует развитию общества, определяя духовно-нравственный, культурный уровень и экономическое развитие общества.

Мировая экономика, претерпевая глубинные изменения, которые обусловлены технологическим прогрессом, цифровизацией, изменениями структуры потребностей рынка труда и запросами общества, оказывает влияние и на рынок образовательных услуг.

Понятие и сущность рынка образовательных услуг изучается крупными отечественными и зарубежными авторами, такими как Романова И.М., Егоров Н.Ю., Кэмбелл М., Бурденко Е.В., Демцура С.С. и другими.

Рынок образовательных услуг рассматривается как целостная система экономических отношений, которые определяют процесс купли-продажи образовательных услуг. В то же время это и пространство по формированию человеческого капитала, тесно связанного с цифровизацией общества. Также рынок образовательных услуг может рассматриваться и как совокупность материальных взаимодействий участников образовательного процесса.

Таким образом, рынок образовательных услуг характеризуется социально-экономическими связями и отношениями, которые возникают между субъектами в процессе предоставления и получения образовательных услуг [Baker, Yacef, 2009].

Эти связи и отношения, базирующиеся на интеграции, способствуют развитию рынка образовательных услуг, то есть определяют его потенциал.

Теоретические аспекты интеграции рынка образовательных услуг

Потенциал рынка образовательных услуг зависит от внедрения инноваций и положительного практического опыта взаимодействия его субъектов, который масштабируется на мировом уровне и приводит к институциональным, социокультурным и экономическим изменениям всей мировой экономики.

Инновационный потенциал рынка образовательных услуг можно определить как совокупность ресурсов и возможностей, необходимых для внедрения и реализации новых технологий, идей и методов обучения [Соломатина, 2020].

Данный процесс, как отмечают В.П. Тихомиров и Н.В. Днепровская, переводит отношения между ключевыми субъектами рынка образовательных услуг на новый качественный уровень [Тихомиров, Днепровская, 2015].

При этом инновационная деятельность, в том числе и на рынке образовательных услуг сегодня, неразрывно связана с интеграционными процессами.

В широком смысле интеграция определяется как объединение различных элементов в единое целое.

Интеграционные процессы в образовании имеют исторические корни. В СССР и современной России и других странах были и остаются развиты технопарки, производственно-образовательные кластеры, наукограды.

По мнению Мохначева С.А., Мохначева К.С. и Шамаевой Н.П., интеграция в сфере образования представляет собой «добровольное объединение или поглощение, слияние локально функционирующих образовательных и обучающих структур в более масштабную целостную интегрированную образовательную или научно-образовательную структуру, которая может включать как одноуровневые, так и разноуровневые образовательные учреждения, а также отраслевые или корпоративные обучающие структуры» [Мохначев, Мохначев, Шамаева, 2012].

Другие исследователи отмечают, что интеграция на рынке образовательных услуг представляет собой совокупность действий и механизмов, направленных на объединение различных образовательных учреждений, программ и ресурсов для повышения качества и доступности образования.

На основе вышеперечисленных понятий и подходов к определениям инновационной деятельности и интеграции можно выделить авторское понятие инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг – *способность объединения различных участников рыночной экономики (образовательные учреждения, коммерческие, технологические, научные компании и государственные структуры) для создания единой образовательной экосистемы на основе новых, передовых решений и технологий, способной эффективно реагировать на изменения в потребностях общества и экономики*. Важными качественными характеристиками инновационно-интеграционного потенциала являются уровень цифровизации, гибкость и адаптивность системы управления образованием на различных уровнях.

В работах Шматко А.Д., Баженовой О.И., Днепровской Н.В., Бейкера Р. и других отечественных и зарубежных исследователей отмечается, что цифровизация является естественным процессом, который улучшает качество образования, делает его более доступным для людей независимо от места жительства и условий [Baker, Yacef, 2009; Бондарева, Вершинин, Климентьева, 2021; Шматко, Бордовский, 2023].

Ключевые тренды инновационно-интеграционного потенциала

Можно определить следующие ключевые тенденции в инновационном развитии рынка образовательных услуг [Imed Bouchrika, 2024; Оборин, 2023; Тихонова, 2023]:

- расширение использования элементов дистанционного образования;
- внедрение элементов искусственного интеллекта;
- организация учебного процесса с учетом персонализированного обучения;
- изменения сроков обучения;
- широкое внедрение цифровых инструментов в преподавании;
- изменения в финансировании образовательных учреждений.

Развитие и внедрение элементов искусственного интеллекта, автоматизация анализа данных и машинное обучение позволило образовательным учреждениям персонализировать учебный процесс, учитывая индивидуальные потребности и способности обучающихся.

Примером может служить модель смешанного обучения «flipped classroom», которая базируется на усвоении нового учебного материала в домашних условиях, а аудиторная работа связана с выполнением практических заданий, лабораторных занятий и индивидуальных консультаций с преподавателем.

Еще одной формой персонализированного обучения является адаптивное обучение с использованием искусственного интеллекта. Примерами практической реализации такого обучения являются «Knewton», «McGraw-Hill Connect», «Smart Sparrow». В их основе заложен принцип индивидуального подхода к обучению каждого человека, активное использование ИИ, которые корректируют объем и состав учебного материала, обязательное присутствие обратной связи [Imed Bouchrika, 2024].

Распространение персонализированного обучения стало возможным благодаря развитию образовательных технологий (EdTech).

Согласно отчету «Global Data», среднегодовой темп роста рынка EdTech с 2022 г. составляет 16 % и данный темп роста сохранится [The business research company, 2024].

В России вопросами внедрения дистанционных технологий в образовании на государственном уровне начали заниматься еще в начале 2000-х гг. Драйвером развития такой формы взаимодействия на рынке образовательных услуг стало не только распространение персональных компьютеров и интернет-покрытия, но и пандемия COVID-19. Тренд на расширение дистанционных форм образования подтверждается и тем, что по данным отчета «Global Industry Analysts» мировой рынок онлайн-образования увеличится с 332,6 млрд долларов в 2022 г. до 686,9 млрд долларов к 2030 году [Imed Bouchrika, 2024].

МООС (Massive Open Online Courses) представляет собой массовые открытые онлайн-курсы, зачастую на безвозмездной основе. Первой формой такой системы является созданный в 2001 г. сервис Массачусетского технологического института под названием Open Course Ware. Однако, только в 2012 г. система МООС превратилась в современную форму, когда в мире появились лидеры современного рынка онлайн-образования – Coursera, edX, Udaity. В России к аналогичным платформам относят «Лекториум», «Универсариум» и другие. Количество пользователей таких платформ ежегодно возрастает. Например, в 2023 г. на самом популярном ресурсе «Coursera» было зарегистрировано уже более 100 миллионов пользователей [Гомонко, Высочиненко, 2019].

К EdTech относят не только адаптивные технологии, платформы онлайн-обучения, но и системы управления обучением (LMS) такие как «Moodle», «Canvas».

На рынке продолжается расширение использования геймификации, симуляций и интерактивных методов обучения. Они предполагают использование VR-реальности или искусственной среды, которые имитируют реальные, прикладные ситуации, позволяющие обучающимся усваивать профессиональные компетенции в безопасном и контролируемом пространстве. Такие методы обучения позволяют повысить мотивацию и вовлеченность обучающихся: согласно отдельным исследованиям более 60 % студентов чувствуют себя более мотивированными и вовлеченными при использовании геймифицированного обучения [Будущее уже здесь: как искусственный интеллект меняет образование, 2024].

Набирает популярность и интегрированная форма обучения, в рамках которой происходит не только объединение нескольких дисциплин, что позволяет укрепить междисциплинарные связи, но и объединение двух образовательных программ с освоением широкого спектра профессиональных компетенций. Важную роль в реализации последней формы играют кросс-дисциплинарные альянсы – объединение образовательных учреждений с представителями различных отраслей в форме кооперации, в результате которой разрабатывается совместная образовательная программа.

Необходимо отметить и тренд на микрообучение и bite-sized контент. В связи с быстрыми темпами изменения бизнес-процессов на предприятиях, а также с сокращением внимания и времени у населения, растет спрос и на обучение, требующее минимизации времени. Формами bite-sized контента являются короткие видео, инфографика, модульные курсы, аудиокурсы.

Микрообучение и bite-sized контент сопряжены и с другим трендом современного рынка образовательных услуг – растущим значением непрерывного образования и повышением внимания к мягким навыкам. Данный тренд проявляется в расширении образовательными учреждениями предложений по кросс-программам дополнительного профессионального образования: переподготовка, повышение квалификации [Тихонова, 2023].

Изменения касаются не только форм и методов обучения, но и организационно-экономических процессов, происходящих в образовательных учреждениях, в том числе вузах. Помимо необходимости изменения инфраструктуры и взаимодействия внутри вуза из-за внедрения технологических и иных современных инновационных продуктов, изменяется и подход к финансированию деятельности вуза.

Инновационным подходом является финансирование, основанное на компетентности, фокусирующееся на результатах обучения и достижении определенных компетенций студентами. Он отличается от традиционных моделей, которые зачастую основываются на количестве студентов или академических часах.

Критериями такой модели финансирования могут являться показатели успеваемости студентов, среди которых завершение курса, получение специализированных сертификатов по компетенциям, а также трудоустройство выпускников. Компетентностный подход позволяет студентам осваивать материалы в удобном темпе, что особенно важно для обучающихся, которые совмещают учебу и работу. С другой стороны, вузам необходимо разрабатывать индивидуальные учебные планы, которые учитывают индивидуальные потребности [Imed Bouchrika, 2024; Бондарева, Вершинин, Климентьева, 2021].

Преимуществами такого подхода являются, с одной стороны, повышение качества образования, так как студенты получают более практические и применимые знания, а с другой – увеличение эффективности использования ресурсов, так как вузы вынуждены распределять ресурсы таким образом, чтобы они использовались только на программы и курсы, которые демонстрируют наибольшую востребованность и эффективность. Среди других трендов можно выделить:

- обучение через вызов как образовательный формат;
- педагогика отношений;
- предпринимательское образование;
- подкасты как педагогическая технология;
- метавселенная для образования.

Особый интерес вызывает концепция метавселенных, которую в контексте образования можно рассматривать как пространство по взаимодействию обучающихся, преподавателей, бизнес-сообщества посредством цифровых аватаров. При этом данная форма выходит за границы использования технологий AR, VR, XR и характеризуется такими качествами как открытость, доступность и постоянство [Соломатина, 2020].

Вышеперечисленные тренды не являются исчерпывающими, однако демонстрируют необходимость изменений в организационно-экономическом механизме на рынке образовательных услуг, так как порождают ряд значимых эффектов, среди которых обеспечение потребностей рынка труда в квалифицированных и компетентных кадрах, сокращение затрат на обучение и переобучение сотрудников, рост занятости и благосостояния общества.

Анализ рынка

По данным отчета «Educational Services Market Size, Share, Growth, Trends, Global Industry Analysis, By Type (Skill Education, Language Education, And, Other), By Application (Adult, Teen, Children, And, Aged), Regional Insights, and Forecast From 2024 To 2032», объем рынка образовательных услуг в 2023 г. составил порядка 1441,99 млрд долларов, а к 2032 году объем может вырасти до 2395,15 млрд долларов, сохраняя ежегодный темп роста в 5,8 %.

В России в последние годы наблюдается устойчивая тенденция роста востребованности программ среднего профессионального образования (рис. 1). Ежегодная численность поступающих за последние три года увеличилась более чем на 13 %. В целом число студентов, получающих среднее профессиональное образование, увеличилось с 2021 г. на 8 %.

В структуре высшего образования до 2022 года наблюдалась тенденция к сокращению численности обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры. С 2022 года вновь наблюдается рост интереса к высшему образованию.

По данным органов статистики, в 2024 году в системе высшего образования обучается более 4,3 млн студентов, из которых более 66 % обучаются по программам бакалавриата. При этом если до 2022 года наблюдалась тенденция к сокращению численности обучающихся с 4,068 млн до 4,044 млн студентов, то с 2022 года наблюдается рост почти на 7 % (рис. 2).

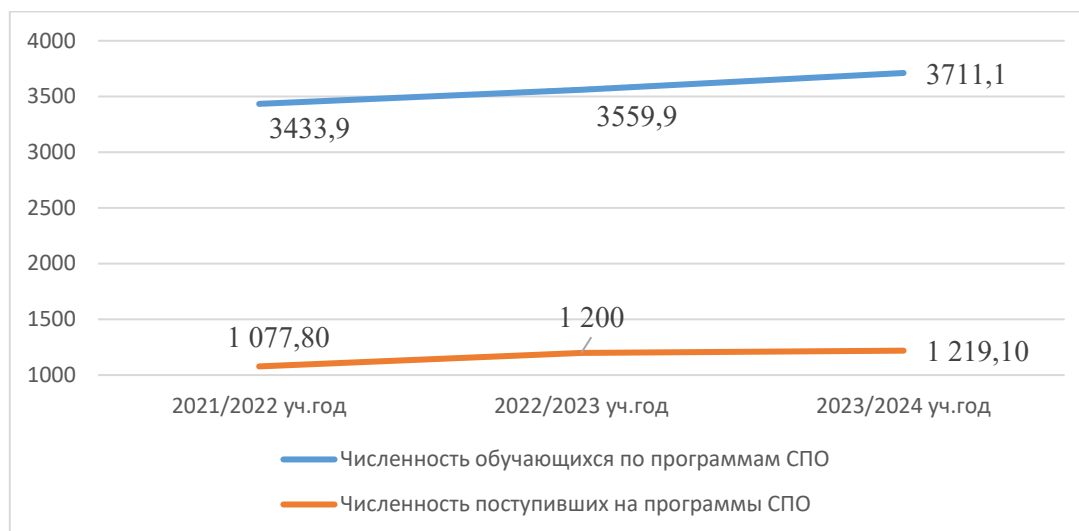


Рис. 1. Численность поступивших по образовательным программам среднего профессионального и высшего образования [Российский статистический ежегодник, 2024]

Fig. 1. The number of applicants for programs in secondary vocational training and higher education [Russian Statistical Yearbook, 2024]

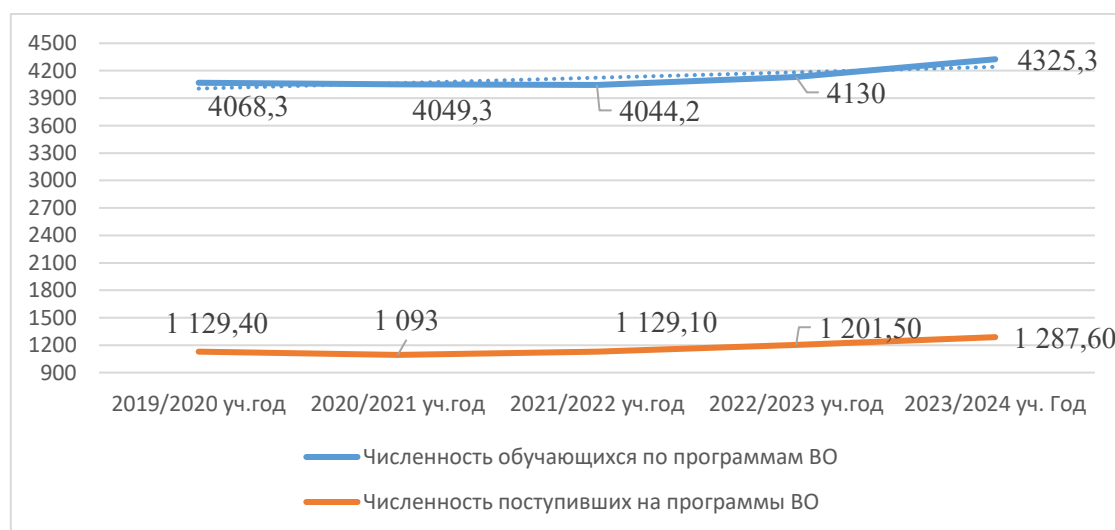


Рис. 2. Численность студентов и поступивших по образовательным программам высшего образования [Российский статистический ежегодник, 2024]

Fig. 2. The number of students and those newly enrolled in educational programs of higher education [Russian Statistical Yearbook, 2024]

На рынке дополнительного образования в последние годы также наблюдается положительная тенденция. По данным 2023 года объем этого сегмента достиг 845,6 млрд руб., что на 16 % больше, чем в 2022 году. Стоит отметить, что рост был обеспечен за счет роста стоимости. С учетом изменения цен рост рынка составил 7,8 % [Ежегодный доклад Правительства, 2023].

Значительным сегментом на отечественном рынке образовательных услуг остается рынок онлайн-образования. На начало 2024 года его объем оценивался в 100 млрд руб. За последние три года с использованием дистанционных образовательных технологий в России обучается более 2 млн студентов [Российский статистический ежегодник, 2024].

Вышеуказанные данные демонстрируют устойчивость различных сегментов рынка образовательных услуг и его высокий потенциал к росту.

Развитие инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг

На основе вышеизложенного материала авторами выделены ключевые компоненты инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг: интеллектуальные ресурсы, которые включают в себя знания преподавателей, опыт в разработке образовательных программ, а также компетенции и навыки студентов; финансовые ресурсы, включающие инвестиции в образовательные технологии и финансирование исследований и разработок; технологические ресурсы, подразумевающие применение инновационных технологий обучения и образовательных платформ; управленческие практики, включающие новые формы управления образовательными организациями и внедрение новых показателей; стратегия развития образовательной организации, включая повышение конкурентных характеристик оказываемых услуг.

Полному раскрытию инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг препятствуют различные ограничения, которые можно объединить в пять основных групп (рис. 3). На современном этапе необходимо не только внедрять и использовать инновационные методы и формы работы, но и интегрировать новые технологии. Бюджетные ограничения, которые характерны для образовательных учреждений, приводят к нехватке ресурсов для модернизации образовательной инфраструктуры. Она требует значительных затрат не только на оборудование, но и на обучение персонала и техническую поддержку, приобретение и разработку программного обеспечения.

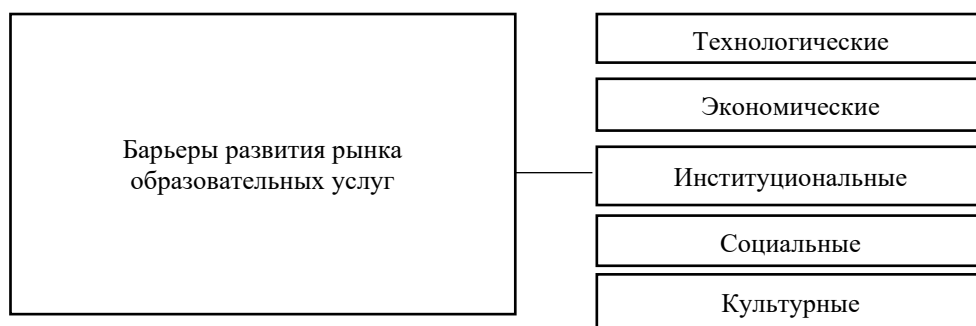


Рис. 3. Ограничения развития рынка образовательных услуг [Imed Bouchrika, 2024, Будущее уже здесь: как искусственный интеллект меняет образование, 2024; Университет 4.0: как должна происходить цифровизация вузов, 2023]

Fig. 3. Constraints on the development of the educational services market [Imed Bouchrika, 2024; The future is already here: how artificial intelligence is changing education, 2024; University 4.0: how the digitalization of universities should take place, 2023]

Серьезным барьером является не только необходимость наличия современных технологий, но и их быстрое устаревание. Образовательные учреждения не имеют возможности на постоянной основе обновлять инфраструктуру и системно изменять подходы к обучению, что приводит к снижению эффективности их деятельности.

Экономические барьеры тесно связаны с социальными ограничениями: сопротивлением изменениям и неравенством в доступе к технологиям.

Первый аспект связан с нежеланием профессорско-преподавательского состава и администрации образовательных учреждений из-за отсутствия уверенности в эффективности инновационных методов использовать и внедрять в организации современные технологии. В связи чем возникает необходимость повышения цифровой грамотности. Оборин М.С. определяет её как умение создавать, обеспечивать и управлять образовательным пространством с использованием инновационных инструментов [Оборин, 2019].

Вместе с недостаточным уровнем цифровой грамотности, ограничением является и цифровой разрыв. Несмотря на объективный тренд на рост онлайн-образования, расширение

использования EdTech, существуют ограничения в доступе к образовательным ресурсам для определенных групп населения. Причинами цифрового разрыва являются недостаточный уровень развития инфраструктуры, отсутствие доступа в интернет.

Причины, по которым рынок образовательных услуг ограничен в своем поступательном развитии, заложены и в институциональных барьерах.

В первую очередь это касается бюрократических барьеров. Жесткие регуляторные требования, негибкость законодательства и излишний контроль не позволяют субъектам рынка образовательных услуг в полной мере использовать возможности инновационных форм работы. С другой стороны, существует проблема профессионального развития: преподаватели и администрация по различным причинам не имеют доступа к программам профессиональной переподготовки или повышения квалификации, которые могли бы помочь им освоить новые технологии и методы работы.

Вместе с тем барьером является и традиционалистический подход в системе образования, а именно разница в ключевых показателях обучения между образовательными учреждениями и бизнес-сообществом. Несмотря на принимаемые меры, внедрение практикоориентированного подхода, до сих пор остается проблема взаимодействия учебных заведений и бизнеса.

Представим процесс развития инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг на рис. 4.

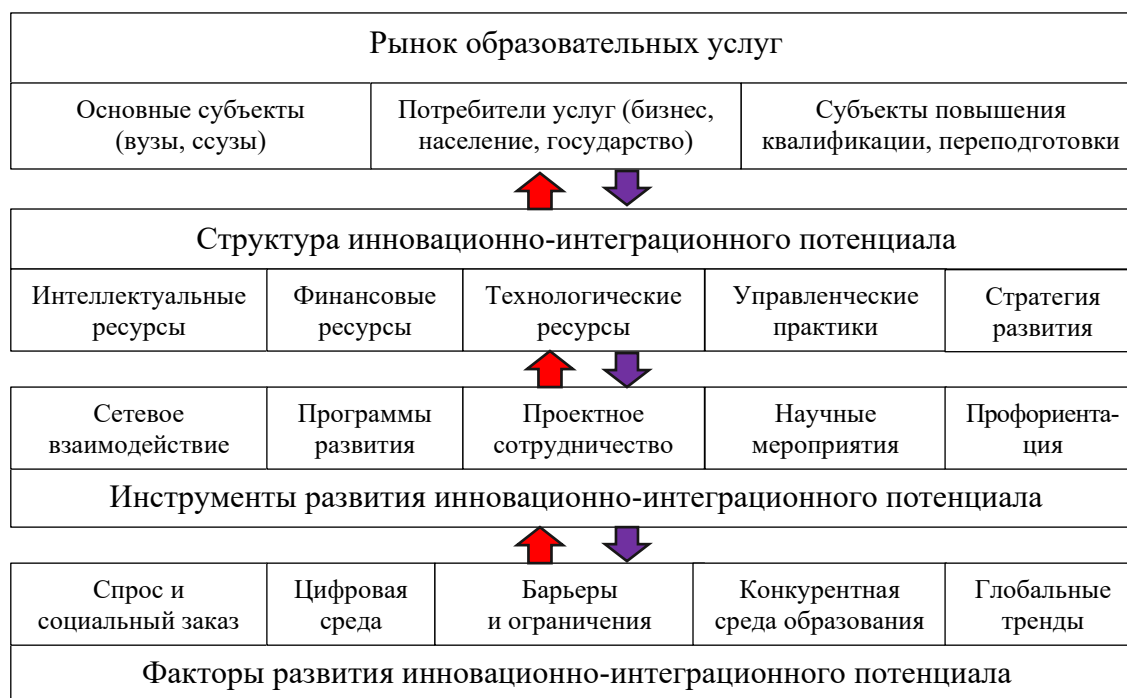


Рис. 4. Процесс развития инновационно-интеграционного потенциала рынка образовательных услуг (разработано авторами)

Fig. 4. The process of developing the innovative and integration potential of the educational services market (developed by the authors)

Интеллектуальные ресурсы обеспечивают финансовые ресурсы необходимыми знаниями для обоснования инвестиций. Финансовые ресурсы поддерживают технологические ресурсы, позволяя внедрять новые образовательные технологии и использовать цифровые площадки. В свою очередь технологические ресурсы требуют применения управленческих практик для эффективного внедрения и использования. Управленческие практики же способствуют созданию сетевых взаимодействий, что позволяет образовательным организациям сотрудничать с бизнесом и государственными структурами. Стратегия развития



образовательной организации предполагает поиск инструментов повышения конкурентных преимуществ на региональных рынках услуг, включая критерии портрета выпускника, его соответствия потребностям бизнеса, общества и государства.

Устойчивое сетевое взаимодействие создает возможности для развития инновационно-интеграционного потенциала рынка на основе реализации инновационных проектов, которые в свою очередь, влияют на качество интеллектуальных ресурсов, приобретения уникальных компетенций. Устойчивость сетевых связей зависит от инициативы руководства, кадров высокой квалификации, определяют состав и уровень взаимосвязи и сотрудничества между бизнесом, образованием и государством, направлены на эффективный обмен знаниями и опытом.

Вместе с тем важно сохранять баланс между «классическим» и «инновационным» подходом в образовательном пространстве, так как цифровизация и связанные с ней технологии, новые социальные тренды имеют ряд объективных недостатков.

Для учебных заведений, в частности вузов, ключевыми критериями являются академическая успеваемость, развитие компетенций, вовлеченность студентов в научные исследования. Таким образом, основным является сам процесс обучения.

В свою очередь для бизнеса ключевыми показателями являются овладение обучающимися практическими навыками, наличие у них развитых софт-скиллов (коммуникабельность, умение работать в команде), готовность к работе. Следовательно, основным для бизнес-сообщества является не процесс обучения, а результат, который в том числе должен быть достигнут уже в самом процессе обучения.

В последние годы экономическая нестабильность и геополитическая напряженность также являются барьерами для развития рынка образовательных услуг, так как сказываются на финансировании и инициативах в области образования.

Таким образом, только совместные усилия государства, образовательных учреждений, частного бизнеса и общества в целом способны создать благоприятные условия для внедрения инноваций и интеграции новых технологий, форм и методов в образовательный процесс, сохранив при этом баланс интересов и социальную значимость образования.

Список источников

- Будущее уже здесь: как искусственный интеллект меняет образование [Электронный ресурс]. – URL: <https://theoryandpractice.ru/posts/20442-budushchee-uzhe-zdes-kak-iskusstvennyy-intellekt-menyaet-obrazovanie> (дата обращения: 19.10.2024).
- Ежегодный доклад Правительства о реализации государственной политики в сфере образования в 2023 году [Электронный ресурс]. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7wTyuCH7RUXZb5RgUqReX4nWt6TuUAH4.pdf> (дата обращения: 19.10.2024).
- Отчет «Educational Services Market Size, Share, Growth, Trends, Global Industry Analysis, By Type (Skill Education, Language Education, And, Other), By Application (Adult, Teen, Children, And, Aged), Regional Insights, and Forecast From 2024 To 2032» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/educational-services-market-106812> (дата обращения: 10.11.2024).
- Российский статистический ежегодник 2024: стат. сб. / Федеральная служба гос. статистики (Росстат). – М., 2024. – 193-200 с.
- Университет 4.0: как должна происходить цифровизация вузов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/education/60cb28709a7947641636b303> (дата обращения 05.11.2024).
- Imed Bouchrika, Phd «60 University Statistics: 2024 Data, Trends & Predictions» 7 июня 2024 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://research.com/universities-colleges/university-statistics> (дата обращения 05.11.2024).
- The business research company «Global Education Market Report 2024», January 2024 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/educational-services-global-market-report> (дата обращения 15.10.2024).

Список литературы

- Бондарева Л.Н., Вершинин А.А., Климентьева И.В. 2021. Развитие российского рынка образовательных услуг в условиях глобализации мирового сообщества: монография; под науч. ред. В.А. Шапошникова. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 101 с.
- Гомонко Э.А., Высочиненко А.С. 2019. Основные тенденции развития рынка образовательных услуг. *Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права*, 4 (77): 126–135.
- Мохначев С.А., Мохначев К.С., Шамаева Н.П. 2012. Интеграция образования, науки и бизнеса: тенденции на мезоуровне. *Фундаментальные исследования*, 3-3: 707-711.
- Оборин М.С. 2019. Инновационные технологии как фактор повышения финансово-экономического и социального эффекта образовательных услуг. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление*, 5 (71), 4: 71–83.
- Оборин М.С. 2023. Технологии управления человеческими ресурсами в условиях цифровизации. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Социальные науки*, 1 (69): 33–41.
- Соломатина Е.Н. 2020. Особенности цифрового образовательного процесса в условиях современного российского общества. *Журнал Общество: социология, психология, педагогика*, 12: 88–92.
- Тихомиров В.П., Днепровская Н.В. 2015. Смарт-образование как основная парадигма развития информационного общества. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, 11(1): 9–13.
- Тихонова А.Д. 2023 Особенности взаимодействий экономических субъектов на рынке образовательных услуг. *Креативная экономика*, 17(11): 4071–4088.
- Шматко А.Д., Бордовский Г.А. 2023. Инновационные технологии в современной системе образования в условиях цифровой трансформации. *Проблемы и перспективы устойчивого развития российских регионов*, 1(72): 3–7.
- Baker R., Yacef K. 2009. The State of Educational Data Mining in 2009: A Review and Future Visions. *Journal of Educational Data Mining*, 1(1): 3–17.

References

- Bondareva L.N., Vershinin A.A., Klimentieva I.V. 2021. The development of the Russian market of educational services in the context of the globalization of the world community: a monograph; under the scientific editorship of V. A. Shaposhnikov. Yekaterinburg: Publishing House of Russian State Prof.-ped. University, 101 p (in Russian).
- Gomonko E.A., Vysochinenko A.S. 2019. The main trends in the development of the educational services market. *Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*, 4 (77):126–135 (in Russian).
- Mokhnachev S.A., Mokhnachev K.S., Shamaeva N.P. 2012. Integration of Education, Science, and Business: Trends at the Mesolevel. *Fundamental Research*, 3-3: 707-711 (in Russian).
- Oborin M.S. 2019. Innovative technologies as a factor of improvement financial, economic and social impact of educational services. *Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Economics and Management*, 5 (71), 4: 71–83 (in Russian).
- Oborin M.S. 2023. Human resource management technologies in the context of digitalization. *Bulletin of the Nizhny Novgorod Lobachevsky University. Series: Social Sciences*, 1 (69):33–41 (in Russian).
- Solomatina E.N. 2020. Features of the digital educational process in modern Russian society. *Society Magazine: Sociology, Psychology, and Pedagogy*, 12:88–92 (in Russian).
- Tikhomirov V.P., Dneprovskaya N.V. 2015. Smart education as the main paradigm of information society development. *Modern Information Technologies and IT Education*, 11(1):9–13 (in Russian).
- Tikhonova A.D. 2023 Features of interactions of economic entities in the educational services market. *Creative Economy*, 17(11): 4071–4088 (in Russian).
- Shmatko A.D. Bordovsky G.A. 2023. Innovative technologies in the modern education system in the context of digital transformation. *Problems and Prospects of sustainable development of Russian regions*, 1(72): 3–7 (in Russian).
- Baker R., Yacef K. 2009. The State of Educational Data Mining in 2009: A Review and Future Visions. *Journal of Educational Data Mining*, 1(1): 3–17.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.



Поступила в редакцию 09.04.2025
Поступила после рецензирования 14.06.2025
Принята к публикации 10.07.2025

Received April 09, 2025
Revised June 14, 2025
Accepted July 10, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Оборин Матвей Сергеевич, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономического анализа и статистики, Пермский институт – филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова; профессор кафедры мировой и региональной экономики, экономической теории, Пермский государственный национальный исследовательский университет; профессор кафедры менеджмента, Пермский государственный аграрно-технологический университет им. ак. Д.Н. Прянишникова, г. Пермь, Россия

Терентьев Александр Игоревич, преподаватель отделения информационно-коммуникационных технологий, Пермский институт – филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова; аспирант кафедры мировой и региональной экономики, экономической теории, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matvey S. Oborin, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Economic Analysis and Statistics, Perm Institute, branch of Plekhanov Russian University of Economics; Professor of the Department of World and Regional Economy, Economic Theory, Perm State National Research University; Professor of the Department of Management, Perm State Agrarian and Technological University named after ac. D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

Alexander I. Terentyev, Lecturer at the Department of Information and Communication Technologies, Perm Institute, branch of Plekhanov Russian University of Economics; Postgraduate Student of the Department of World and Regional Economy, Economic Theory, Perm State National Research University, Perm, Russia

УДК 339.97
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-539-556
EDN IYKAB

Цифровизация в странах БРИКС: сравнительный обзор и рейтинговая диагностика

Растопчина Ю.Л., Ковалева Е.И.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
rastopchina@bsuedu.ru, ekovaleva@bsuedu.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования цифровизации БРИКС как одного из приоритетных и перспективных направлений современного развития объединения. Проанализирована цифровизация стран БРИКС в контексте устойчивого развития, в частности, отмечен процесс достижения таких целей устойчивого развития (ЦУР) как ЦУР-9 «Создание стойкой инфраструктуры, содействие всеохватной и устойчивой индустриализации и инновациям (Индустриализация, инновации и инфраструктура)» и ЦУР-11 «Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов (Устойчивые города и населенные пункты)», отражающих инфраструктурное развитие цифровых и транспортных сетей. Выделены страны-лидеры в инновационном и инфраструктурном развитии с приоритетным направлением развития – «умные» и «зеленые» технологии. Проведен обзор особенностей институционального управления и нормативно-правового сопровождения цифровизации БРИКС, при этом отмечено, что нормативно-правовая часть процессов развития цифровизации в странах БРИКС характеризуется различиями в законодательстве. Среди общих трендов можно выделить законы о данных и кибербезопасности, которые принимают почти все члены БРИКС, но управленческие подходы к цифровизации разные. Авторами выделены ключевые тезисы по цифровизации в рамках итогового документа XVII саммита БРИКС, который прошёл в Рио-де-Жанейро в июле 2025 года (Декларации БРИКС Рио-де-Жанейро «Укрепление сотрудничества Глобального Юга для более инклюзивного и устойчивого управления»). Исследованы особенности развития и формирования цифровой экономики, а также готовности стран БРИКС+ к новым условиям цифровой трансформации через положение в следующих рейтингах: Индекс сетевой готовности, Глобальный индекс инноваций, Индекс развития электронного правительства, Глобальный индекс цифровизации. Для методологического сравнения рассмотрен Индекс цифровой экономики и общества (Digital Economy and Society Index, DESI) 2024, разработанный как инструмент для измерения степени и прогресса цифровизации в государствах – членах ЕС. Итоги рейтинговой диагностики цифровизации стран БРИКС позволили выделить лидеров (топ-3) каждого рейтинга. Китай и ОАЭ лидируют во всех четырёх проанализированных рейтингах, Саудовская Аравия – в трех, Индия – в глобальном индексе инноваций. Результат исследования – выявленные проблемы, риски и стратегии прорыва в цифровой экономике стран – членов БРИКС+.

Ключевые слова: цифровизация, страны БРИКС, устойчивое развитие, рейтинг, диагностика, сравнительный анализ

Для цитирования: Растопчина Ю.Л., Ковалева Е.И. 2025. Цифровизация в странах БРИКС: сравнительный обзор и рейтинговая диагностика. *Экономика. Информатика*, 52(3): 539–556. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-539-556. EDN IYKAB



Digitalization in the BRICS Countries: A Comparative Review and Rating Diagnostics

Julia L. Rastopchina, Elena I. Kovaleva

Belgorod State National Research University,
85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russia
rastopchina@bsuedu.ru, ekovaleva@bsuedu.ru

Abstract. The article presents the results of a study of BRICS digitalization as one of the priority and promising areas of the association's modern development. Digitalization of the BRICS countries is analyzed in the context of sustainable development. In particular, the authors note the process of achieving such sustainable development goals (SDGs) as SDG-9 "Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and innovation (Industrialization, innovation and infrastructure)" and SDG-11 "Make cities and communities open, safe, resilient and sustainable (Sustainable cities and communities)", reflecting the infrastructural development of digital and transport networks. The study identifies countries leading in innovative and infrastructural development with a priority development direction – "smart" and "green" technologies. An overview of the features of institutional governance and regulatory support for the digitalization of BRICS is conducted. The authors stress that the regulatory part of the digitalization development processes in the BRICS countries is characterized by differences in legislation. General trends include the adoption of laws on data and cybersecurity by almost all BRICS members, although the management approaches to digitalization are different. The authors highlight the key theses on digitalization in the framework of the final document of the 17th BRICS summit held in Rio de Janeiro in July 2025 (BRICS Rio de Janeiro Declaration "Strengthening Cooperation of the Global South for More Inclusive and Sustainable Governance"). The features of the development and formation of the digital economy, as well as the readiness of the BRICS+ countries for the new conditions of digital transformation are studied through their position in the following rankings: Network Readiness Index, Global Innovation Index, E-Government Development Index, and Global Digitalization Index. For methodological comparison, the paper focuses on the Digital Economy and Society Index (DESI) 2024 developed as a tool for measuring the degree and progress of digitalization in the EU member states. The results of the ranking diagnostics of the BRICS countries' digitalization has made it possible to identify the leaders (TOP-3) of each ranking. China and the UAE are leading in all the four rankings under study, while Saudi Arabia leads in three, and India is the leader in terms of the global innovation index. As a result of the study, problems, risks and breakthrough strategies in the digital economy of the BRICS+ member countries have been identified.

Keywords: digitalization, BRICS countries, sustainable development, rating, diagnostics, comparative analysis

For citation: Rastopchina Yu.L., Kovaleva E.I. 2025. Digitalization in the BRICS Countries: A Comparative Review and Rating Diagnostics. *Economics. Information technologies*, 52(3): 539–556 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-539-556. EDN IJYKAB

Введение

БРИКС в современных условиях мирохозяйственного развития является особым политико-экономическим объединением стран, набирающим привлекательность для многих участников мировой экономики. На данный момент БРИКС состоит из десяти стран-участниц (Бразилия, Россия, Индия, Китай, ЮАР, ОАЭ, Иран, Эфиопия, Египет и Индонезия) и девяти стран-партнёров (Республика Беларусь, Многонациональное Государство Боливия, Республика Казахстан, Республика Куба, Федеративная Республика Нигерия, Малайзия, Королевство Таиланд, Социалистическая Республика Вьетнам, Республика Уганда и Республика Узбекистан).

Объединение стран с огромным ресурсным потенциалом, интенсивным экономическим развитием, высокой индустриализацией – данные характеристики вызывают тревогу и беспокойство в западных странах. БРИКС сегодня – это уникальная социально-экономическая

модель, но при всех значительных преимуществах у БРИКС есть и определенные сложности, и, в первую очередь, это объединение разных по общему экономическому потенциалу и развитию стран, что препятствует получению максимального синергетически-интеграционного эффекта.

В данной статье будет проведено исследование цифровизации БРИКС как одного из приоритетных и перспективных направлений развития объединения.

Целью исследования является оценка и сравнительный анализ уровня, динамики, степени влияния цифровизации на макроэкономическое развитие стран БРИКС, в том числе анализ позиций стран БРИКС в международных рейтингах по цифровизации.

Обзор публикаций по проблематике. Цифровая трансформация в современных условиях существования и развития человеческого общества требует постоянного наблюдения, анализа данных, их влияния на экономическую, социальную, экологическую и другие системы страны. Международные организации, консалтинговые группы ежегодно выявляют показатели, индикаторы, которые позволяют эффективно оценивать постоянно меняющуюся ситуацию в области цифровой эволюции.

Исследований по цифровизации в странах БРИКС значительное количество, большая часть из которых в отраслевом разрезе: исследованию процессов цифровизации в образовании стран БРИКС посвящены работы Козиной Ю.П. и Богдановой Н.В. [Kozina, Bogdanova, 2024]; Паланто А.С., Исмагиловой А.Р. [Паланто, Исмагилова, 2025]. Особенности цифровизации денежных расчётов организаций в странах БРИКС раскрыты в публикации Парамонова И.С. [Парамонов, 2024]; процессы цифровизации финансовой сферы стран БРИКС изучены в статьях [Василевский, 2025; Акинина, Захарова, 2024.].

О проблемах и перспективах цифровизации социальной сферы в странах БРИКС, в частности в системе здравоохранения, дискутирует Нарышкин А.А., отмечая, что «исследования и разработки, обмен опыта применения цифровых технологий в сфере здравоохранения всегда будут для БРИКС+ важной областью для взаимодействия и обмена опытом» [Нарышкин, 2025]. Пьянкова С.Г., Ергунова О.Т., Якименко Д.Д. выявили различия в уровне цифровой зрелости и институциональной готовности к внедрению технологий [Пьянкова, Ергунова, Якименко, 2025]. Непосредственная оценка уровня цифровизации стран БРИКС и ЕС на основе международных индексов проведена Масловой Л.А. в публикации [Маслова, 2023].

Обзор научной литературы по проблематике цифровизации БРИКС показывает, что данное исследовательское направление очень актуально. Страны БРИКС для сохранения своих конкурентных позиций на современном излишне динамичном мировом рынке должны использовать «технологические возможности в соответствии с мировыми трендами и нивелировать последствия технологического отставания» [Рабыко, Якимчик, 2023].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступают страны – члены БРИКС+ (Бразилия, Россия, Индия, Китай, ЮАР, ОАЭ, Иран, Эфиопия, Египет и Индонезия). Предметом исследования являются процессы цифровизации и устойчивого развития стран БРИКС+.

Для получения результатов статьи были использованы методы сравнительного анализа, рейтинговой оценки. Анализ опирался на трехуровневый подход: на макроуровне были определены позиции стран в глобальных индексах, выявлены лидеры/аутсайдеры. На мезоуровне мы выделили составляющие индексов – субиндексы, показывая различия в рейтинговых оценках, на микроуровне использование кейс-стади конкретных проектов стран БРИКС+ в развитии цифровой экономики позволило выявить наиболее эффективные решения и диагностировать проблемы стран. Эмпирическую базу исследования составили материалы рейтинговых агентств и исследовательских организаций, ведущих мониторинг и учет цифровых преобразований в странах. При исследовании процессов цифровизации в некоторых странах были проанализированы национальные стратегии (РФ, Саудовская Аравия, ОАЭ).



Результаты и их обсуждение

Цифровизация БРИКС в контексте устойчивого развития. Анализируя БРИКС как модель устойчивого развития в контексте цифровизации, стоит отметить, в первую очередь, процесс достижения таких целей устойчивого развития (ЦУР) как ЦУР-9¹ и ЦУР-11², отражающих инфраструктурное развитие цифровых и транспортных сетей [The Sustainable Development Goals Report, 2024].

Характеристика базовых метрик по достижению ЦУР-9 странами БРИКС+ за 2024–2025 гг. представлена в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Общая характеристика реализации ЦУР-9 странами БРИКС+ (составлено авторами по данным [The Sustainable Development Goals Report, 2024; TheGlobalEconomy.com, 2025])

General characteristics of the implementation of SDG-9 by BRICS+ countries
 (compiled by the authors based on data from [The Sustainable Development Goals Report, 2024; TheGlobalEconomy.com, 2025])

Страна	Инфраструктура (транспорт, логистика, энергетика)	Индустриализация (доля промышленности в ВВП)	Инновации (R&D, патенты, цифровизация)
1	2	3	4
Китай*	Лидер в сфере возобновляемых источников энергии, наличие высокоскоростной железнодорожной сети, высокая интернетизация (5G)	40 % ВВП	2,4 % ВВП на R&D, 1-е место по патентам
Индия	Интенсивное развитие умных городов, сильная отрасль, связанная с солнечной энергетикой	25 % ВВП	0,7 % ВВП на R&D, лидер в IT-аутсорсинге
Россия	Фокус на развитие транспортной инфраструктуры, в том числе реализация проекта Северного морского пути; сильная атомная энергетика	32 % ВВП	1,1 % ВВП на R&D, лидер в развитии фундаментальной науки
Бразилия	Развитие биоэнергетики. Однако в стране слабая транспортная инфраструктура, что во многом затрудняет процессы индустриализации	20 % ВВП	1,2 % ВВП на R&D
ЮАР	Первостепенные проблемы – энергосети и угольная зависимость	23 % ВВП	0,8 % ВВП на R&D
ОАЭ*	Лидирующие позиции в регионе по инфраструктуре	50 % ВВП	1,5 % ВВП на R&D, наличие в стране утвержденной AI-стратегии развития к 2031 году (Национальная стратегия ОАЭ для искусственного интеллекта 2031)

¹ ЦУР 9 – Создание стойкой инфраструктуры, содействие всеохватной и устойчивой индустриализации и инновациям (Индустриализация, инновации и инфраструктура)

² ЦУР 11 – Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов (Устойчивые города и населенные пункты)

Окончание табл. 1
End of the table 1

1	2	3	4
Саудовская Аравия*	Реализация в стране мегапроектов, связанных с зеленой энергетикой	45 % ВВП	0,9 % ВВП на R&D, (наличие амбициозной программы развития страны Saudi Vision 2030)
Иран	Сложная военно-политическая и экономическая обстановка, военный конфликт, санкционные ограничения. Сильной стороной страны являлось развитие ядерных технологий, однако в сложившихся условиях сложно давать отраслевые прогнозы	35 % ВВП	0,5 % ВВП на R&D
Эфиопия	Строительство самой крупной в Африке гидроэлектростанции «Возрождение» (Великая плотина Хыдасе)	15 % ВВП	0,3 % ВВП на R&D, низкий уровень инновационной активности
Египет	Суэцкий канал как конкурентное экономическое преимущество страны, реализация проекта «Новая столица», развитие альтернативной энергетики	30 % ВВП	0,7 % ВВП на R&D, активные инвестиции в развитие цифровых платежей
Аргентина	Развитая наука, инвестиции в развитие ядерной энергетики	25 % ВВП	0,5 % ВВП на R&D, центр технологических инноваций в Латинской Америке, однако проявляется тенденция активного сокращения расходов на исследования

* Страны-лидеры в инновационном и инфраструктурном развитии, приоритетное направление развития – «умные» и «зеленые» технологии.

В индустриальном аспекте в качестве лидеров среди стран БРИКС+ необходимо выделить Китай и Индию; в инновационном аспекте – Китай, ОАЭ, Россию, Индию, Египет, которые занимают лидирующие позиции в таких отраслях, как искусственный интеллект, ядерные и космические технологии, IT-аутсорсинг и цифровые платежи.

В рамках реализации ЦУР-11 развитие «умных городов» (Smart Cities) и инвестиционных проектов в странах БРИКС сопровождается активными процессами цифровизации. Китай является мировым лидером, реализующим свыше 500 проектов умных городов и экосистем. ОАЭ также лидирует в формировании Smart City, в России локально развиваются такие проекты, как «Цифровой транспорт», «Умное ЖКХ».

Институциональное управление и нормативно-правовое сопровождение цифровизации БРИКС. Механизмы институционального управления и национальные координационные структуры цифровизации в странах БРИКС сильно разнятся (от уровня отдельных рабочих групп до министерств цифровизации). Страны – участницы объединения, реализуя стратегии развития цифровой экономики, создали профильные министерства/агентства/ведомства: в России – Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, в Бразилии цифровое развитие курирует Министерство развития, промышленности, торговли и услуг, в Китае – Центральный комитет по делам киберпространства Китая и Группа



по цифровизации при Госсовете, в Индии – Министерство электроники и информационных технологий, в ЮАР – Министерство связи и цифровых технологий.

Цифровая трансформация требует координации различных министерств и ведомств, поэтому в странах часто создаются межведомственные комитеты/советы при главе государства/правительства для стратегического руководства: в России создана Правительственная комиссия по цифровому развитию, в Китае – Центральная комиссия по киберпространству, в Бразилии – Комитет по цифровой трансформации.

Особое внимание уделяется развитию и применению ИКТ в отраслях национальной экономики и регионах стран через создание центров компетенций, «цифровых песочниц», кластеров для продвижения инноваций, в качестве примера можно привести создание российских «Цифровых кафедр» и ИТ-кластеров, китайских зон демонстрации цифровой экономики, индийские центры и инициативы в сферах интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (AI).

При этом в целом для БРИКС+ нет единого наднационального органа, только координационные структуры типа Цифрового форума БРИКС.

Нормативно-правовая часть процессов развития цифровизации также характеризуется различиями в законодательстве. Среди общих трендов можно выделить законы о данных и кибербезопасности, которые принимают почти все члены БРИКС, но управленческие подходы к цифровизации разные, например, у Китая достаточно жёсткий контроль, у ЮАР – более либеральный. Важно отметить наличие Рамочного соглашения о партнёрстве стран БРИКС в цифровой экономике, которое было подписано в июне 2022 года на онлайн-саммите в Пекине, отражающего особенности цифровой экономики в БРИКС (цифровая аутентификация, электронные платежи, конфиденциальность и безопасность данных).

В рамках итогового документа XVII саммита БРИКС, который прошёл в Рио-де-Жанейро в июле 2025 года [Декларация БРИКС Рио-де-Жанейро «Укрепление сотрудничества Глобального Юга для более инклюзивного и устойчивого управления», 2025], процессам цифровизации уделено внимание в следующих тезисах:

– «...для преодоления растущего цифрового разрыва внутри стран и между ними, мы признаем наличие вызовов и угроз, исходящих из цифровой сферы и изнутри» (стр. 15, пункт 40 декларации);

– «...ожидаем выработки и последующей реализации Стратегии экономического партнерства БРИКС 2030, которая будет направлена на консолидацию руководящих принципов сотрудничества БРИКС по вопросам, касающимся многосторонней торговой системы, цифровой экономики, международной торговли, финансового сотрудничества и торговли, а также устойчивого развития» (стр. 16, пункт 42 Декларации);

– «...намерены и впредь обмениваться передовой практикой поддержки МСП, в том числе посредством цифровых сервисов и платформ, направленных на упрощение ведения бизнеса» (стр. 19, пункт 54 Декларации);

– «...цифровая взаимосвязанность является важнейшей предпосылкой для цифровой трансформации и социально-экономического роста, ...признаем, что устойчивая, безопасная, инклюзивная и совместимая цифровая государственная инфраструктура способна обеспечить предоставление услуг в широком масштабе и расширить социальные и экономические возможности для всех» (стр. 21, пункт 58 Декларации);

– «...призываем участников БРИКС изучить возможности совместной деятельности в сфере цифровой инфраструктуры для обеспечения целостности, стабильности функционирования и безопасности национальных сегментов сети «Интернет» при недопущении фрагментации сети «Интернет» и соблюдении национального законодательства, регулирующего все аспекты использования сети «Интернет», включая вопросы безопасности» (стр. 21, пункт 59 Декларации);

– «...приветствуем заключение «Договоренности об управлении экономикой данных БРИКС» в качестве дорожной карты для использования экономики данных в рамках БРИКС в целях обеспечения безопасного доступа к технологиям, защиты индивидуальных и

национальных интересов, содействия цифровизации промышленности и услуг, расширения торговли внутри БРИКС» (стр. 24, пункт 66 Декларации);

– «...электронная торговля стала важной движущей силой глобального экономического роста, способствуя развитию международной торговли товарами и услугами, обеспечивая приток иностранных инвестиций и содействуя инновациям» (стр. 24, пункт 67 Декларации);

– «...признаем важность использования высшими органами аудита всего спектра возможностей, предоставляемых цифровыми технологиями, включая искусственный интеллект, в своей работе, одновременно сводя к минимуму риски, создаваемые этими технологиями» (стр. 27, пункт 74 Декларации).

Лидеры стран БРИКС также по итогам XVII саммита БРИКС приняли декларацию о глобальном управлении искусственным интеллектом (ИИ), направленную в первую очередь, на «разработку международных принципов развития и применение технологий ИИ, ориентированных на инклюзивность, устойчивость и соблюдение прав человека» [Лидеры БРИКС, 2025]. Декларативный фокус направлен на технологическое развитие, снижение зависимости и защиту цифрового суверенитета. Перспективными направлениями сотрудничества стран БРИКС, заложенными в декларации, являются развитие инфраструктуры, совместные исследования, обмен кадрами, разработка технических стандартов. Декларация во многом задает лишь общие принципы и направления, не содержит конкретных, юридически обязывающих норм или стандартов, что показывает факт – реальная работа по согласованию позиций и выработке общих подходов внутри БРИКС+ только начинается, а цифровизация как тенденция развития БРИКС наращивает свою динамику и силу.

Рейтинговая диагностика цифровизации стран БРИКС. Рассмотрим особенности развития и формирования цифровой экономики, готовности стран БРИКС+ к новым условиям цифровой трансформации через положение в следующих рейтингах: Индекс сетевой готовности, Глобальный индекс инноваций, Индекс развития электронного правительства, Глобальный индекс цифровизации. Для методологического сравнения рассмотрим Индекс цифровой экономики и общества (Digital Economy and Society Index, DESI) 2024. Данный индекс DESI разработан как инструмент для измерения степени и прогресса цифровизации в государствах – членах ЕС. С 2023 года, в соответствии с Программой цифрового десятилетия до 2030 года, DESI включается в отчёт о состоянии цифрового десятилетия.

Одним из показателей цифровой трансформации стран является Индекс сетевой готовности (NRI), который через систему индексов позволяет оценить технологическую инфраструктуру, отразить уровень компетентности, инклюзивности и способности населения и организаций страны использовать технологические ресурсы, описать цифровые структуры страны, их целостность, безопасность и доступность использования, определить готовность страны к формированию сетевой экономики и оценить разнообразные последствия участия в сетевой экономике [Фадеева, 2025; Network Readiness Index, 2024]. Так, индекс NRI оценивает готовность стран использовать ИКТ для повышения конкурентоспособности и благополучия, охватывая технологии, управление, влияние на людей и бизнес.

Индекс сетевой готовности складывается из нескольких уровней: первичный уровень состоит из четырёх основных групп показателей, отражающих развитие (технологии, люди, управление, воздействие), которые определяют основные параметры готовности сети. Каждая из основных групп делится на дополнительные подгруппы показателей, которые составляют вторичный уровень: 1) технологии – доступность, содержание, технологии будущего; 2) люди – отдельные люди, бизнес, правительство; 3) управление – доверие, регулирование, инклюзивность; 4) воздействие – экономика, качество жизни, вклад в достижение ЦУР. Третий уровень состоит из отдельных показателей, распределённых по различным подгруппам и группам первичного и вторичного уровней. Все показатели, используемые в Индекс сетевой готовности (NRI), разнятся по группам и подгруппам (рис. 1).

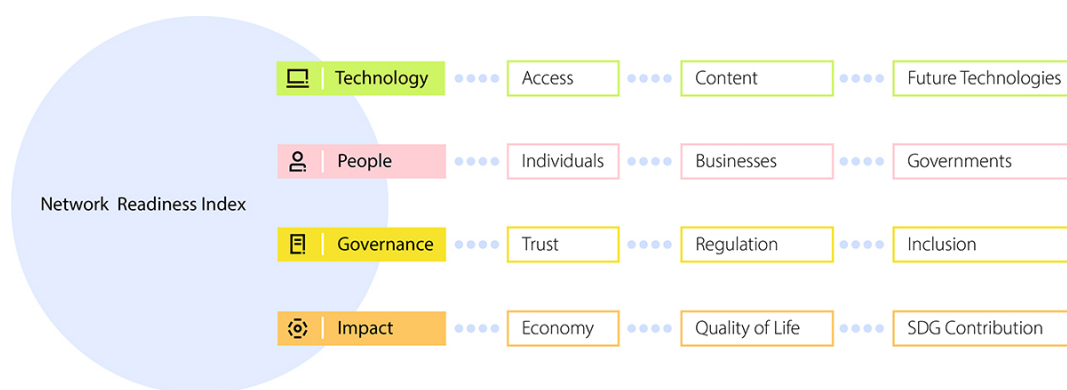


Рис. 1. Структура Индекса сетевой готовности (NRI) [Network Readiness Index, 2024]
Fig. 1. Structure of the Network Readiness Index (NRI) [Network Readiness Index, 2024]

Индекс сетевой готовности за 2024 год ранжирует 133 страны, на долю которых в совокупности приходится 95 % мирового валового внутреннего продукта (ВВП). Рассмотрим положение стран БРИКС+ в рейтинге Индекса сетевой готовности 2024 (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Рейтинг стран БРИКС+ по Индексу сетевой готовности (NRI) 2024
(составлено авторами по данным [Network Readiness Index, 2024])
BRICS+ Countries Ranking by Network Readiness Index (NRI) 2024
(compiled by the authors based on data from [Network Readiness Index, 2024])

Страны БРИКС	Индекс сетевой готовности, место в рейтинге	Технологии	Люди	Управление	Воздействие
1. Бразилия	44	48,88	45,53	71,77	54,64
2. Россия	41	47,69	54,58	66,74	53,95
3. Индия	49	52,56	51,62	49,79	60,56
4. Китай	17	65,34	66,33	73,81	69,32
5. ЮАР	72	44,61	39,80	61,58	45,23
6. Египет	85	44,83	36,34	46,99	48,94
7. Иран	79	45,40	45,83	52,62	38,18
8. ОАЭ	28	59,51	60,74	66,58	64,31
9. Эфиопия	122	31,06	19,21	26,58	41,53
10. Королевство Саудовская Аравия	35	53,95	51,13	70,44	59,47
11. Индонезия	49	56,08	48,26	57,53	53,49

По данным Индекса сетевой готовности мы можем отметить, что лидерами стран БРИКС+ являются Китай (17 место) и ОАЭ (28 место).

Положение «выше среднего (30–50)» занимают страны с высоким потенциалом в развитии сетевой готовности – Королевство Саудовская Аравия (35 место), Россия (41 место), Бразилия (44 место), Индия и Индонезия (49 место). Страны, имеющие позиции «ниже среднего (60–133)» – ЮАР (72 место), Египет (85 место), Эфиопия (122 место) [Countries. Benchmarking the Future of the Network Economy, 2025]. Страна-лидерами данного рейтинга стали Китай, ОАЭ, Саудовская Аравия, которые демонстрируют наиболее значимые результаты по инвестициям в инфраструктуру, развитию «умных городов», цифровому

правительству и созданию благоприятной нормативной среды. Также стоит отметить, что Россия, Бразилия, Индия, Индонезия обладают высоким потенциалом в развитии информационно-коммуникационных технологий, развитой технологической базой, значительными инвестициями в НИОКР (R&D). Можно сказать, что лидерство названных стран – это результат принятых стратегий развития цифровой экономики, направленных на цифровизацию государственных услуг, развитие инфраструктуры (5G/6G, базы данных, облака), поддержку стартапов и технологических инноваций, развитие искусственного интеллекта (ИИ) как приоритетной технологии. ЮАР, Иран, Египет и Эфиопия значительно отстают не только от лидеров стран БРИКС+, но и от среднемирового уровня. Основными проблемами стран являются доступность и качество инфраструктуры, цифровые навыки населения, государственное регулирование.

Глобальный индекс инноваций (Глобальный инновационный индекс, The Global Innovation Index, GII) оценивает эффективность инновационной экосистемы. В доклад и рейтинг «Глобальный индекс инноваций 2024. Раскрывая возможности социального предпринимательства» было включено 133 экономики и отражены самые последние мировые тенденции в сфере инноваций. Целью GII является улучшение измерения инноваций для получения более полной картины инновационных экосистем по всему миру. Общий рейтинг GII основан на двух субиндексах, которые одинаково важны для представления полной картины инноваций: индекс затрат на инновации (вход) и индекс результатов инноваций (выход). Структура Глобального инновационного индекса 2024 года представлена в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Структура Глобального инновационного индекса
(составлено авторами по данным [The Global Innovation Index, 2024])
Structure of the Global Innovation Index
(compiled by the authors based on data from [The Global Innovation Index, 2024])

Субиндекс входа	Субиндекс выхода
1. Институты	1. Научные и технологические результаты 2. Творческие результаты
2. Человеческий капитал и исследования	
3. Инфраструктура	
4. Устойчивость рынка	
5. Устойчивость бизнеса	

Всего при оценке стран было использовано в 2024 году 78 показателей, их них 53 показателя по субиндексу входа, 25 – по субиндексу выхода. В табл. 4 представлен рейтинг стран БРИКС+ в Глобальном инновационном индексе 2024.

Лидером в GII является Китай, занимает в общем рейтинге 11 место, отражая высокую эффективность всей инновационной системы страны. Разница между субиндексом входа и выхода демонстрирует отдачу от инвестиций в R&D и промышленность. Среднее положение в рейтинге занимают ОАЭ, Индия, Саудовская Аравия, Бразилия, Индонезия, Россия, отстающие страны – Иран, ЮАР, Египет, Эфиопия. Основными проблемными зонами в развитии инновационной экосистемы стран остаются показатели субиндекса входа, а именно состояние инфраструктуры (низкий уровень ИКТ, энергодефицит, износ транспорта – Бразилия, ЮАР, санкционный дефицит высокотехнологичного оборудования – Россия), формирование институтов (бюрократия, коррупция, слабая защита прав собственности – Египет, Эфиопия, Иран, риски для иностранных инвесторов – Россия), развитость рынка (инвестиции) характеризуется во всех странах, за исключением Китая, ОАЭ, низким притоком венчурного капитала, слабыми фондовыми рынками для стартапов, человеческий капитал (отток ученых из менее развитых стран (Египет, Эфиопия) в более развитые, неравенство в доступе к качественному образованию).



Таблица 4
 Table 4

Рейтинг стран БРИКС+ в Глобальном инновационном индексе 2024
 (составлено авторами по данным [The Global Innovation Index, 2024])
 BRICS+ Countries Ranking in the Global Innovation Index 2024
 (compiled by the authors based on data from [The Global Innovation Index, 2024])

Страны БРИКС	Глобальный индекс инноваций, место в рейтинге	Субиндекс входа	Субиндекс выхода
1. Бразилия	50	58	49
2. Россия	59	76	56
3. Индия	39	44	33
4. Китай	11	7	23
5. ЮАР	69	75	61
6. Египет	86	95	80
7. Иран	64	85	48
8. ОАЭ	32	19	50
9. Эфиопия	130	133	112
10. Королевство Саудовская Аравия	47	36	66
11. Индонезия	54	54	67

Индекс развития электронного правительства (E-Government Development Index, EGDИ) – индекс, разработанный Департаментом по экономическим и социальным вопросам ООН для оценки уровня развития электронного правительства в 193 государствах – членах ООН. Целью ежегодного исследования является содействие глобальному достижению Повестки дня в области устойчивого развития до 2030 года и концепции, согласно которой никто не должен быть оставлен позади и исключен из цифровой эпохи, и оценке эффективности электронного правительства стран и городов в сравнении друг с другом. Структура Индекса развития электронного правительства 2024 года представлена в табл. 5.

Таблица 5
 Table 5

Структура Индекса развития электронного правительства
 (составлено авторами по данным [E-Government Survey, 2024])
 Structure of the E-Government Development Index
 (compiled by the authors based on data from [E-Government Survey, 2024])

Индекс развития электронного правительства		
Индекс телекоммуникационной инфраструктуры (ТИ)	Индекс человеческого капитала (HCI)	Индекс онлайн-услуг (OSI)
Пользователи Интернета	Уровень грамотности взрослого населения (AL)	Институциональная структура (IF)
Абоненты мобильной сотовой связи	Валовой коэффициент охвата образованием (GER)	Предоставление услуг (SP)
Абоненты беспроводного широкополосного доступа	Ожидаемая продолжительность обучения (EYS)	Предоставление контента (CP)
Доступность широкополосного доступа	Средняя продолжительность обучения (MYS)	Технология (TEC)
	Грамотность в области электронного правительства (EGL)	Электронное участие (EPI)

«Исследование служит инструментом сравнительного анализа и разработки, способствуя цифровой трансформации, позволяя национальным и местным органам власти учиться друг у друга, выявлять сильные стороны и проблемы в области электронного правительства, а также формировать свои политики и стратегии для будущего улучшения» [E-Government Survey, 2024]. Индекс EGDI позволяет оценивать уровни и рейтинги цифрового развития в 193 государствах – членах ООН и фиксировать актуальные тенденции. Все страны по уровню EGDI представлены в группах: низкий EGDI, средний EGDI, высокий EGDI, очень высокий EGDI. В табл. 6 представлен рейтинг стран БРИКС+ в Индексе развития электронного правительства 2024.

Таблица 6
Table 6

Рейтинг стран БРИКС+ в Индексе развития электронного правительства, EDGI 2024
(составлено авторами по данным [E-Government Survey, 2024])
Ranking of BRICS+ countries in the Electronic Government Development Index, EDGI 2024
(compiled by the authors based on data from [E-Government Survey, 2024])

Страны БРИКС	Индекс развития электронного правительства, место в рейтинге	Группа EDGI	EGDI 2024	OSI	ТИ	НСИ
1. Бразилия	50	Очень высокий	0,8403	0,9063	0,8068	0,8077
2. Россия	43	Очень высокий	0,8532	0,7766	0,9512	0,8319
3. Индия	97	Высокий	0,6678	0,8184	0,5700	0,6149
4. Китай	35	Очень высокий	0,8718	0,9258	0,9258	0,9258
5. ЮАР	40	Очень высокий	0,8616	0,8872	0,8951	0,8026
6. Египет	95	Высокий	0,6699	0,7002	0,6946	0,6150
7. Иран	101	Высокий	0,6564	0,3773	0,8987	0,6932
8. ОАЭ	11	Очень высокий	0,9533	0,9163	1,0000	0,9436
9. Эфиопия	169	Средний	0,3111	0,3420	0,2659	0,3254
10. Королевство Саудовская Аравия	6	Очень высокий	0,9602	0,9899	0,9841	0,9067
11. Индонезия	64	Очень высокий	0,7991	0,8035	0,8645	0,7293

Итак, мы видим, лидерами в рейтинге стран по Индексу развития электронного правительства являются Саудовская Аравия и ОАЭ, Китай, ЮАР, Россия, Бразилия, Индонезия, это страны, которые входят в группу с очень высоким индексом EGDI. Индия, Египет, Иран входят в группу с высоким EGDI, Эфиопия – в группу со средним EGDI. Анализируя субиндекс онлайн-услуг (OSI), можно сказать, что самые высокие показатели имеют Саудовская Аравия, Китай, ОАЭ, Бразилия. Индекс отражает качество, доступность и сложность электронных государственных услуг, в названных странах созданы цифровые платформы для регистрации бизнеса, государственных платежей, социальных выплат, налоговые сервисы, умные городские сервисы, цифровая идентификация. По индексу телекоммуникационной инфраструктуры (ТИ), отражающему развитие инфраструктуры для цифровой экономики, первые места занимают также ОАЭ и Саудовская Аравия, Россия, Китай.



Для многих стран формирование инфраструктуры связано с такими проблемами, как энергетическая нестабильность, географическое неравенство, технологические барьеры. Индекс человеческого капитала дает оценку способности населения использовать цифровые услуги, по показателям данного субиндекса также лидируют ОАЭ, Китай, Саудовская Аравия, Россия, что объясняется высокой грамотностью населения, охватом высшим образованием.

Глобальный индекс цифровизации (Global Digitalization Index, GDI) был составлен китайской компанией Huawei совместно с международным консалтинговым агентством IDC с опорой на «Глобальный индекс сетевого взаимодействия» (Global Connectivity Index, GCI). Достижения стран в цифровизации рассматривались по четырем направлениям: «Повсеместная связь» (Ubiquitous Connectivity), «Цифровая основа» (Digital Foundation, учитывалось применение искусственного интеллекта, интернета вещей, периферийных вычислений), «Зеленая энергетика» (Green Energy), «Поддерживающая политика и экосистема» (Supporting Policy & Ecosystem). В общей сложности аналитики учитывали 42 индикатора. Структура Глобального индекса цифровизации 2024 года представлена в табл. 7.

Таблица 7
Table 7

Структура Глобального индекса цифровизации
 (составлено авторами по данным [Global Digitalization Index (GDI), 2024])
 Structure of the Global Digitalization Index
 (compiled by the authors based on data from [Global Digitalization Index (GDI), 2024])

Глобальный индекс цифровизации			
1	2	3	4
Повсеместная связь	Цифровая основа	Зеленая энергетика	Поддерживающая политика и экосистема
Покрытие оптоволокном (до С)	Инвестиции в центры обработки данных	Инвестиции в возобновляемую электроэнергию	Инвестиции в ИКТ
Покрытие оптоволокном (до В)	Инвестиции в передовые системы хранения данных	Коэффициент экологичности поездов	Политика использования спектра
Международная пропускная способность интернета	Внедрение непрерывности бизнеса и аварийного восстановления (BCDR)	Удобство зарядки	Политика цифровой трансформации
Покрытие 4G и 5G	Инвестиции в вычислительные мощности	Коэффициент использования возобновляемой электроэнергии	Политика в области зеленой энергетики
Фиксированный широкополосный доступ	Инвестиции в облачные технологии	Экономика возобновляемой электроэнергии	Законы и нормативные акты в области ИКТ
Мобильный широкополосный доступ	Уровень использования облачных технологий		Патенты в области ИКТ
Опыт развертывания IPv6 (новый протокол адресации в интернете)	Создание данных		Участие в Интернете
Проникновение гигабитных корпоративных кампусов	Услуги электронного правительства		Транзакции в электронной коммерции

Окончание табл. 7
End of the table 7

1	2	3	4
Подписки на фиксированный широкополосный доступ	Расходы на цифровую трансформацию отрасли		Распространение смартфонов
Подписки на мобильный широкополосный доступ			Онлайн-трансляции видео
База установленного оборудования Интернета вещей			Количество стартапов
Доступность фиксированного широкополосного доступа			Доля выпускников STEM-специалистов
Доступность мобильного широкополосного доступа			Рабочие в сфере ИКТ
Мобильные данные на подключение			
Экспортируемая корпоративная пропускная способность 10 гигабит+			
Скорость развертывания			

В отчете 2024 года был представлен рейтинг из 77 стран, которые были распределены по трем группам: лидеры (Frontrunners), последователи (Adopters) и начинающие (Starters). Россия, Иран, Эфиопия не были включены составителями в этот перечень. В табл. 8 представлен рейтинг стран БРИКС+ в Глобальном индексе цифровизации 2024.

В данном рейтинге лидерами стали Китай и ОАЭ, вошли в группу лидеров (Frontrunners). Стоит отметить, что страны-лидеры находятся на переднем крае цифровизации, эти страны активно продвигают внедрение облачных технологий, центров обработки данных, перспективных вычислительных мощностей и систем хранения данных, инвестиции в сетевые технологии нового поколения, внедряя информационные технологии во все сферы национальной экономики. Саудовская Аравия, ЮАР, Бразилия и Индия вошли в группу последователи (Adopters). Так, показателен опыт Саудовской Аравии. В рамках программы «Saudi Vision 2030» правительство наращивает инвестиции в ИКТ. Страна занимает первое место в кластере стран, использующих технологии GDI. В последние годы правительство запустило несколько ключевых инициатив, таких как инициатива «Общество 10 Гбит/с». В 2023 году страна развернула коммерческие сети 5G-A на Ближнем Востоке, при этом уровень подключения GDI значительно превышает среднемировой. Правительство планирует инвестировать в мегацентры обработки данных совокупной мощностью 1,3 ГВт·ч, чтобы превратить Саудовскую Аравию в региональный цифровой хаб. Прогнозируется, что к 2030 году вклад индустрии искусственного интеллекта в экономику страны составит 135 миллиардов долларов США. Индонезия и Египет вошли в группу начинающие (Starters). Эти страны сталкиваются с проблемами в охвате территории широкополосной связью (MBB) и доступе к оптоволоконным сетям, нуждаются в расширении возможностей и предоставлении большему числу людей доступа к цифровой экономике.



Таблица 8
Table 8

Рейтинг стран БРИКС+ в Глобальном индексе цифровизации 2024
(составлено авторами по данным [Global Digitalization Index (GDI), 2024])
BRICS+ Countries Ranking in the Global Digitalization Index 2024
(compiled by the authors based on data from [Global Digitalization Index (GDI), 2024])

Страны БРИКС	Глобальный индекс цифровизации, место в рейтинге	Повсеместная связь	Цифровая основа	Зеленая энергетика	Поддерживающая политика и экосистема
1. Бразилия	69	25,6	25,2	24,0	36,0
2. Россия	–	–	–	–	–
3. Индия	48	40,0	34,8	24,0	51,7
4. Китай	8	64,8	74,4	88,8	61,8
5. ЮАР	43	31,2	44,4	38,4	56,3
6. Египет	63	24,0	33,6	24,0	42,5
7. Иран	–	–	–	–	–
8. ОАЭ	16	82,4	54,0	16,8	62,8
9. Эфиопия	–	–	–	–	–
10. Королевство Саудовская Аравия	23	62,4	45,6	28,8	63,7
11. Индонезия	59	30,4	32,4	24,0	39,7

Ниже в табл. 9 сведены итоги рейтинговой диагностики цифровизации стран БРИКС. Цветовой заливкой отмечены лидеры (топ-3) каждого рейтинга. Китай и ОАЭ лидируют по всем четырём проанализированным рейтингам, Саудовская Аравия – в трех, Индия – в Глобальном индексе инноваций.

Таблица 9
Table 9

Рейтинг стран БРИКС+ в цифровых индексах
(составлено авторами по данным [Network Readiness Index, 2024; The Global Innovation Index, 2024; E-Government Survey, 2024; Global Digitalization Index (GDI), 2024])
BRICS+ Countries Ranking in Digital Indices
(compiled by the authors based on data from [Network Readiness Index, 2024; The Global Innovation Index, 2024; E-Government Survey, 2024; Global Digitalization Index (GDI), 2024])

Страны БРИКС	Индекс сетевой готовности	Глобальный индекс инноваций	Индекс развития электронного правительства	Глобальный индекс цифровизации
Бразилия	44	50	50	69
Россия	41	59	43	–
Индия	49	39	97	48
Китай	17	11	35	8
ЮАР	72	69	40	43
Египет	85	86	95	63
Иран	79	64	101	–
ОАЭ	28	32	11	16
Эфиопия	122	130	169	–
Королевство Саудовская Аравия	35	47	6	23
Индонезия	49	54	64	59

Заключение

На основе проведенного исследования мы можем выявить основные проблемы и риски цифровой экономики стран – членов БРИКС+ и перспективы развития. Ключевыми проблемами и рисками цифровой экономики БРИКС+ являются:

- «цифровой разрыв» (Digital Divide) как внутристрановой (инфраструктурные «пустыни» как отсутствие покрытия всей территории интернетом – в 40 % муниципалитетах Амазонии отсутствуют оптоволоконные сети, низкое качество широкополосного доступа (особенно мобильного интернета) для значительной части населения, 600 млн человек в индийских селах ограничены 2G, сильное неравенство в доступе к интернету (особенно в сельских районах), цифровым устройствам и навыкам (Бразилия, Индия, ЮАР, Эфиопия, Египет), так и межстрановой (значительный разрыв между лидерами (Китай, ОАЭ) и отстающими (ЮАР, Эфиопия, Иран) в инфраструктуре (5G, ЦОДы), проникновении ИИ и уровне цифровизации бизнеса/госуправления;

- кадровая проблема, которая проявляется в дефиците высококвалифицированных специалистов в области ИИ, кибербезопасности, data science. По прогнозам китайского правительства, дефицит ИИ-инженеров может достигнуть 8 млн к 2030 году. Присутствует миграция высококвалифицированных специалистов;

- отставание в фундаментальных исследованиях в условиях недостаточного финансирования и инфраструктуры для прорывов в искусственном интеллекте и других критических технологиях (особенно Бразилия, ЮАР, Эфиопия, Египет);

- геополитическая уязвимость и технологический суверенитет обусловлены зависимостью от импорта западных технологий (чипы, ПО, облака) у России, Ирана; частично у Бразилии, Индии;

- фрагментация интернета через создание собственных «суверенных интернетов» в Китае, Иране, РФ), затрудняющих глобальное сотрудничество внутри БРИКС+;

- доверие и этические вопросы использования ИИ: скептицизм населения через опасения по поводу слежки, потери работы, предвзятости алгоритмов (особенно при авторитарных тенденциях), разные этические подходы в странах-членах и отсутствие консенсуса по этике ИИ (например, применение автономного оружия, социальный рейтинг).

Перспективы и стратегии прорыва в цифровой экономике стран БРИКС+ должны быть сосредоточены в углублении внутриблоковой кооперации, использовании комплементарности экономик и огромных внутренних рынков, в ускоренной цифровизации традиционных секторов с применением ИИ, а именно:

- активное создание национальных и наднациональных (в рамках БРИКС+) аналогов значимых базовых технологий (операционные системы, облачные технологии, процессоры, спутниковые системы) для снижения внешних рисков;

- формирование собственной инфраструктуры через развитие альтернатив платежной системы SWIFT – BRICS Pay, использование национальных валют в расчетах, создание цифровой валюты для синхронизации и упрощения трансграничных расчетов, введение единых стандартов для e-commerce;

- внедрение ИИ в традиционных отраслях (сельское хозяйство, здравоохранение, логистика, энергетика), где страны БРИКС+ имеют масштаб и потребности, создание платформ для совместных инноваций, реализация совместных проектов в «зеленой» цифровизации.

Страны БРИКС+ обладают огромным потенциалом в цифровой экономике, но сталкиваются с уникальными вызовами на фоне геополитической турбулентности и неравномерного развития научно-технического прогресса и ИИ. Сотрудничество стран БРИКС+ и индивидуальные траектории будут определять как глобальный цифровой ландшафт, так и развитие каждой страны.



Список источников

- Декларация БРИКС Рио-де-Жанейро «Укрепление сотрудничества Глобального Юга для более инклюзивного и устойчивого управления», 6 июля 2025. URL: [p://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/gvTArkWauqwuryk9xzLt3HuuI7EBmqrC.pdf](https://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/gvTArkWauqwuryk9xzLt3HuuI7EBmqrC.pdf) (дата обращения: 15.07.2025).
- «Видение 2030» – это план по диверсификации экономики, расширению прав и возможностей граждан, созданию благоприятной среды как для местных, так и для международных инвесторов, а также по превращению Саудовской Аравии в мирового лидера. URL: <https://www.vision2030.gov.sa/en> (дата обращения: 26.05.2025).
- Индикаторы цифровой экономики: 2025: статистический сборник / В.Л. Абашкин, Г.И. Абдрахманова, К.О. Вишневский, Л.М. Гохберг и др. Москва. ИСИЭЗ ВШЭ, 296 с.
- Исследование ООН: Электронное правительство 2024. Ускорение цифровой трансформации для устойчивого развития. Департамент по экономическим и социальным вопросам ООН. 2025. URL: <https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2025-01/E-Government%20Survey%202024%20RUS-compressed.pdf> (дата обращения: 02.06.2025).
- Лидеры БРИКС приняли декларацию об управлении ИИ. 2025. URL: <https://ria.ru/20250707/briks-2027573942.html> (дата обращения: 07.07.2025).
- Лола И.С., Семина В.В. 2023. БРИКС: устойчивость, конвергенция, инклюзивность. Информационно-аналитический обзор Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ «Высшая школа экономики». URL: https://www.hse.ru/data/2023/08/21/2071880015/Early_composite_indice_8_2023_2.pdf (дата обращения: 24.03.2025).
- Мегаполис будущего. 2025. Интернет-портал ФГБУ «Редакция «Российской газеты», 1998–2025. URL: <https://rg.ru/2025/04/02/na-zavist-faraonam.html> (дата обращения: 02.04.2025).
- Национальная стратегия ОАЭ для искусственного интеллекта 2031. 2025. Министерство по вопросам искусственного интеллекта, цифровой экономики и удаленной работы ОАЭ. URL: <https://ai.gov.ae/strategy/> (дата обращения: 21.04.2025).
- Эфиопия завершила строительство большой ГЭС, которой недовольны Египет и Судан. 2025. Интернет-портал ФГБУ «Редакция «Российской газеты», 1998–2025. URL: <https://rg.ru/2025/07/06/efiopiia-zavershila-stroitelstvo-bolshoj-ges-kotoroj-nedovolny-egipet-i-sudan.html> (дата обращения: 06.07.2025).
- Countries. Benchmarking the Future of the Network Economy. 2025. URL: <https://networkreadinessindex.org/countries/#hero> (дата обращения: 09.06.2025).
- E-Government Survey 2024. Accelerating Digital Transformation for Sustainable Development URL: <https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2024-09/%28Web%20version%29%20E-Government%20Survey%202024%201392024.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).
- Global Digitalization Index (GDI) 2024. URL: <https://www.huawei.com/en/gdi/> (дата обращения: 21.03.2025).
- Global Digitalization Index 2024 // Открытая площадка о цифровых технологиях ICT.Moscow, 2025. URL: <https://ict.moscow/analytics/global-digitalization-index-2024/> (дата обращения: 21.03.2025).
- Global Innovation Index 2024 URL: <https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/> (дата обращения: 10.04.2025).
- Network Readiness Index 2024. Building a Digital Tomorrow: Public-Private Partnerships for Digital Readiness. URL: <https://networkreadinessindex.org/> (дата обращения: 25.04.2025).
- The Sustainable Development Goals Report 2024. URL: <https://desapublications.un.org/publications/sdgs/SDG%209%20Industry%20Innovation%20and%20Infrastructure> (дата обращения: 28.03.2025).
- The Digital Economy and Society Index (DESI) 2022. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi> (дата обращения: 28.03.2025).
- TheGlobalEconomy.com. URL: <https://ru.theglobaleconomy.com> (дата обращения: 21.05.2025).

Список литературы

- Акинина В.П., Захарова Д.А. 2024. Цифровизация финансовых систем и трансграничная интеграция: к вопросу о создании валютного инструмента для стран БРИКС. *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*, 5(104): 7–16. DOI 10.37493/2307-907X.2024.5.1.

- Василевский И.М. 2025. Цифровизация финансовой инфраструктуры в странах БРИКС: перспективы для интеграции. Цифровая экономика и финансы: Материалы VIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 20–21 марта 2025 года. Санкт-Петербург: Центр научно-информационных технологий «Астерион»: 48–51.
- Козина Ю.П., Богданова Н.В. 2024. Политика стран БРИКС в области цифровизации образования: цифровизация как основа современного диалога культур. *Социально-политические науки*, 14 (6): 114–120. DOI 10.33693/2223-0092-2024-14-6-114-120.
- Маслова Л.А. 2023. Оценка уровня цифровизации стран БРИКС и ЕС на основе международных индексов. Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: Тезисы докладов VII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию В.Л. Березина, Москва, 19–20 октября 2023 года. Москва. Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина: 391.
- Нарышкин А.А. 2025. Цифровизация здравоохранения в странах БРИКС+. *Современная Европа*, 1(129): 136–149. DOI 10.31857/S0201708325010115.
- Паланто А.С., Исмагилова А.Р. 2025. Цифровизация образования – сравнительный анализ применения технологий в странах БРИКС с фокусом на национальные образовательные платформы. Молодежная наука в современном мире: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Краснодар, 23 апреля 2025 года. Чебоксары. ООО «Издательский дом «Среда»: 57–65. DOI 10.31483/t-137942.
- Парамонов И.С. 2024. Особенности цифровизации денежных расчётов организаций в странах БРИКС. Страны БРИКС: стратегии развития и механизмы сотрудничества в изменяющемся мире: Материалы Второй международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Москва, 05–07 июня 2024 года. Москва. Издательский дом «УМЦ»: 152–155.
- Пьянкова С.Г., Ергунова О.Т., Якименко Д.Д. 2025. Цифровизация медицины как фактор роста инновационной экономики стран БРИКС. *Уфимский гуманитарный научный форум*, 1(21): 204–221. DOI 10.47309/2713-2358-2025-1-204-221.
- Рабыко И.Н., Якимчик А.А. 2023. БРИКС в условиях цифровизации экономики. Тенденции и перспективы. Проблемы устойчивости развития социально-экономических систем: Материалы Международной научно-практической конференции, Тамбов, 26 октября 2023 года. Тамбов. Издательский дом «Державинский»: 730–737.
- Фадеева И.А. 2025. Цифровой потенциал стран БРИКС в условиях цифровой трансформации мировой экономики. *Фундаментальные исследования*, 4: 57–63. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=43812> (дата обращения: 01.07.2025).

References

- Akinina V.P., Zakharova D.A. 2024. Digitalization of financial systems and cross-border integration: on the issue of creating a currency instrument for the BRICS countries. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*, 5(104): 7–16 (in Russian). DOI 10.37493/2307-907X.2024.5.1.
- Vasilevsky I.M. 2025. Digitalization of financial infrastructure in the BRICS countries: prospects for integration. Digital Economy and Finance: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, March 20–21, 2025. St. Petersburg: Asterion Center for Scientific and Information Technologies: 48–51 (in Russian).
- Kozina Yu.P., Bogdanova N.V. 2024. Policy of the BRICS Countries in the Field of Digitalization of Education: Digitalization as the Basis of Modern Dialogue of Cultures. *Sociopolitical Sciences*, 14 (6): 114–120 (in Russian). DOI 10.33693/2223-0092-2024-14-6-114-120.
- Maslova L.A. 2023. Assessing the Level of Digitalization of the BRICS and EU Countries Based on International Indices. Gubkin University in Addressing Issues of the Russian Oil and Gas Industry: Abstracts of the VII Regional Scientific and Technical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of V.L. Berezina, Moscow, October 19–20, 2023. Moscow. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University): 391 (in Russian).
- Naryshkin A.A. 2025. Digitalization of Healthcare in the BRICS+ Countries. *Modern Europe*, 1(129): 136–149 (in Russian). DOI 10.31857/S0201708325010115.
- Palanto A.S., Ismagilova A.R. 2025. Digitalization of Education: A Comparative Analysis of the Application of Technologies in the BRICS Countries with a Focus on National Educational Platforms. Youth Science in the Modern World: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with



- International Participation, Krasnodar, April 23, 2025. Cheboksary. OOO “Izdatelskiy Dom «Sreda»”: 57–65 (in Russian). DOI 10.31483/r-137942.
- Paramonov I.S. 2024. Features of Digitalization of Cash Settlements of Organizations in the BRICS Countries. BRICS Countries: Development Strategies and Cooperation Mechanisms in a Changing World: Proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference. In 2 parts, Moscow, June 05-07, 2024. Moscow. Publishing House «UMC»: 152–155 (in Russian).
- Pyankova S.G., Ergunova O.T., Yakimenko D.D. Digitalization of Medicine as a Growth Factor of the Innovative Economy of the BRICS Countries. *Ufa Humanitarian Scientific Forum*, 1(21): 204–221 (in Russian). DOI 10.47309/2713-2358-2025-1-204-221.
- Rabyko I.N., Yakimchik A.A. BRICS in the context of digitalization of the economy. Trends and prospects. Problems of sustainability of development of socio-economic systems: Materials of the International scientific and practical conference, Tambov, October 26, 2023. Tambov. Publishing house «Derzhavinsky»: 730–737 (in Russian).
- Fadeeva I.A. 2025. Digital potential of BRICS countries in the context of digital transformation of the global economy. *Fundamental Research*, 4: 57–63 (in Russian). URL: <https://fundamental-research.ru/en/article/view?id=43812> (accessed: 01.07.2025).

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 23.06.2025

Поступила после рецензирования 14.07.2025

Принята к публикации 23.07.2025

Received June 23, 2025

Revised July 14, 2025

Accepted July 23, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Растопчина Юлия Леонидовна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры мировой экономики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Ковалева Елена Ивановна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры мировой экономики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Julia L. Rastopchina, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of World Economy, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Elena I. Kovaleva, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of World Economy, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

ОТРАСЛЕВЫЕ РЫНКИ И РЫНОЧНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА SECTORAL MARKETS AND MARKET INFRASTRUCTURE

УДК 339.138

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-557-564

EDN IU ECBN

Российский рынок фитнес-услуг: структурные трансформации, тенденции развития, сезонная динамика и эффективные инструменты маркетинга

¹Кучерявенко С.А., ¹Тищенко Б.Ю., ²Жариков Р.В., ¹Назарова А.Н.

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

²Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106/5

kucheryavenko_s@bsuedu.ru, tbogdan1990@yandex.ru, shriad@mail.ru, nazarova_a@bsuedu.ru

Аннотация. Актуальность исследования данной темы продиктована стремительным развитием и трансформацией российского рынка фитнес-услуг. Этот процесс обусловлен постпандемическим восстановлением экономики и возрастающим стремлением жителей страны вести здоровый образ жизни. Статья посвящена анализу структурных трансформаций рынка фитнес-услуг в России, тенденций развития отрасли за период с 2018 по 2025 годы. Особое внимание уделяется исследованию сезонных изменений потребительского спроса и влиянию этих колебаний на уровень доходов компаний. В статье рассматриваются последствия нехватки квалифицированных кадров и роль эффективных маркетинговых стратегий в минимизации негативных воздействий указанных факторов. Информационную основу исследования составили статистические данные исследовательского агентства FitnessData, Национального фитнес-сообщества, Росстата, Яндекс.Вордстат и др. Итогом исследования являются практические рекомендации для специалистов в области маркетинга, направленные на повышение конкурентоспособности фитнес-организаций в меняющихся социально-экономических условиях.

Ключевые слова: фитнес-услуги, рынок услуг фитнеса, сезонный спрос, сегментация, маркетинговая стратегия, персонал, удержание клиентов, клубные карты

Для цитирования: Кучерявенко С.А., Тищенко Б.Ю., Жариков Р.В., Назарова А.Н. 2025. Российский рынок фитнес-услуг: структурные трансформации, тенденции развития, сезонная динамика и эффективные инструменты маркетинга. *Экономика. Информатика*, 52(3): 557–564. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-557-564. EDN IU ECBN

The Russian Market of Fitness Services: Structural Transformations, Development Trends, Seasonal Dynamics and Effective Marketing Tools

¹Svetlana A. Kucheryavenko, ¹Boris Yu. Tishchenko,

²Roman V. Zharikov, ¹Anastasia N. Nazarova

¹Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

²Tambov State University, 106/5 Sovetskaya St., Tambov 392000, Russia

kucheryavenko_s@bsuedu.ru, tbogdan1990@yandex.ru, shriad@mail.ru, nazarova_a@bsuedu.ru

Abstract. The relevance of the research on this topic is dictated by the rapid development and transformation of the Russian market of fitness services. This process is due to the post-pandemic economic recovery and the

© Кучерявенко С.А., Тищенко Б.Ю., Жариков Р.В., Назарова А.Н., 2025



increasing desire of the country's residents to lead a healthy lifestyle. The article is devoted to the analysis of structural transformations of the fitness services market in Russia and trends in the development of the industry for the period from 2018 to 2025. Special attention is paid to the study of seasonal changes in consumer demand and the impact of these fluctuations on the income level of companies. The article examines the consequences of a shortage of qualified personnel and the role of effective marketing strategies in minimizing the negative effects of these factors. The information basis of the study was made up of statistical data from the FitnessData research agency, the National Fitness Community, Rosstat, Yandex. Wordstat, and other sources. The research results in practical recommendations for marketing specialists aimed at increasing the competitiveness of fitness organizations in the changing socio-economic conditions.

Keywords: fitness services, fitness services market, seasonal demand, segmentation, marketing strategy, staff, customer retention, club cards

For citation: Kucheryavenko S.A., Tishchenko B.Yu., Zharikov R.V., Nazarova A.N. 2025. The Russian Market of Fitness Services: Structural Transformations, Development Trends, Seasonal Dynamics and Effective Marketing Tools. *Economics. Information technologies*, 52(3): 557–564 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-557-564. EDN IU ECBH

Введение

В последние годы рынок фитнес-услуг в России демонстрирует поступательное развитие, что связано с ростом интереса населения к вопросам здоровья, физической активности и формирования здорового образа жизни. Вместе с тем для данного сегмента характерны ярко выраженные сезонные колебания спроса, оказывающие влияние на устойчивость финансовых показателей организаций [Кучерявенко, Тищенко, 2024].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления факторов, влияющих на поведение потребителей в различные периоды года, а также анализа эффективности маркетинговых стратегий, направленных на сглаживание указанных колебаний. Несмотря на наличие отдельных публикаций по данной тематике, освещающих временной промежуток с 2018 по 2025 год и включающих анализ рыночных изменений вместе с инструментами адаптации, такие материалы исследований остаются недостаточно распространёнными и доступными широкому кругу исследователей [Воронина, Мартыщенко, 2023; Яшкина, Алексеева, 2023; Вовк, Храменкова, 2024].

Цель настоящего исследования – провести комплексный анализ российского рынка фитнес-услуг за период 2018–2025 годов, выявить основные структурные изменения и ключевые тенденции развития, исследовать особенности сезонной динамики спроса и предложить эффективные маркетинговые инструменты для повышения конкурентоспособности организаций фитнес-индустрии.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выступает российский рынок фитнес-услуг. Предметом исследования являются структурные преобразования, тенденции развития, сезонная динамика спроса и эффективность используемых маркетинговых инструментов на российском рынке фитнес-услуг в период с 2018 по 2025 годы.

Методологическую основу исследования составили методы сравнительного анализа, графической интерпретации статистических данных, контент-анализа маркетинговых стратегий, а также методы систематизации и обобщения эмпирических материалов.

Информационной базой послужили данные исследовательского агентства FitnessData, Росстата, Национального фитнес-сообщества, платформы Яндекс.Вордстат и профильных аналитических ресурсов.

Результаты исследования и их обсуждение

Рынок фитнес-услуг в России демонстрирует устойчивый рост на протяжении последних 15 лет, однако наиболее интенсивное развитие началось с 2018 года и продолжается в 2025 году.

Этот тренд обусловлен как изменением образа жизни россиян и повышением интереса к вопросам здоровья, так и воздействием макроэкономической ситуации. Для глубокого изучения динамики развития индустрии фитнеса и определения масштабов её роста нами проведен подробный анализ изменения уровня выручки российских фитнес-клубов за период с 2018 по 2025 год. Исследование базируется на официальных данных аналитического центра FitnessData совместно с компанией 1С, результаты анализа графически отражены на рис. 1.

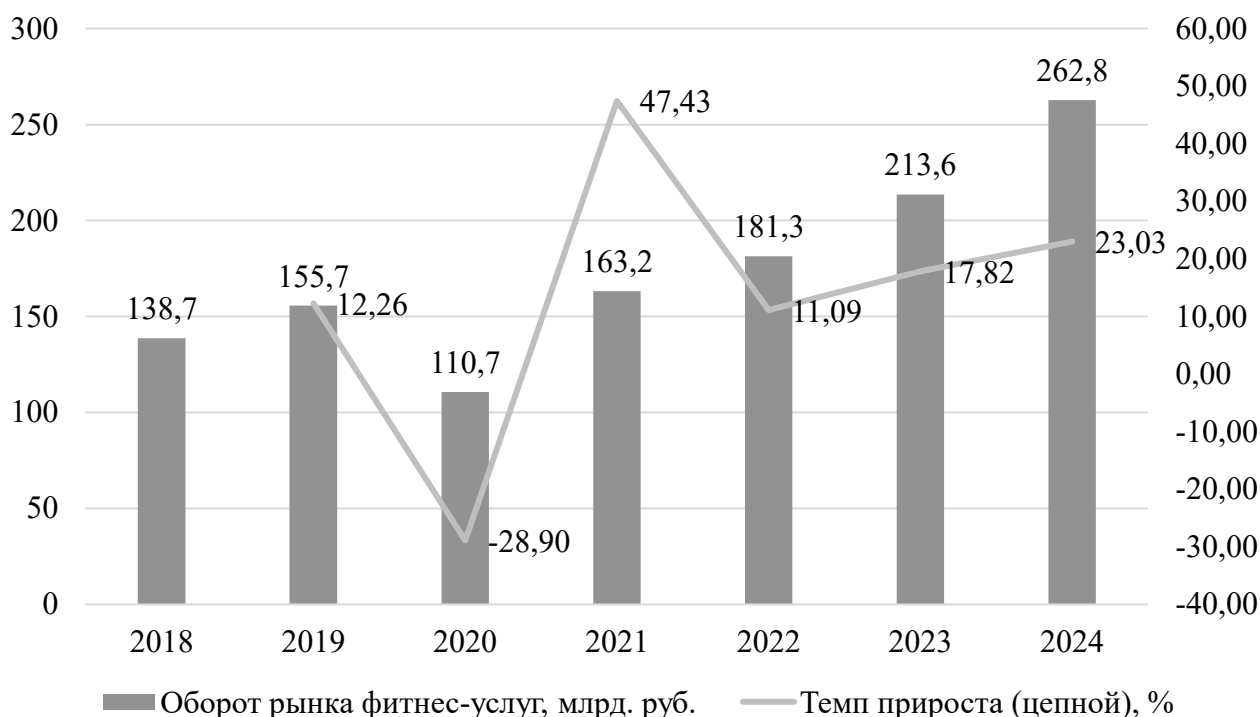


Рис. 1. Изменение объемов рынка фитнес-услуг в России за 2018–2024 гг.
[Итоги 2024 года на рынке ..., 2025]
Fig. 1. Changes in the volume of the fitness services market in Russia in 2018–2024
[The results of 2024 in the market ..., 2025]

Согласно данным исследовательского агентства в 2018–2019 годах рынок фитнес-услуг в России демонстрировал уверенный рост: объем выручки увеличился с 138,7 млрд руб. до 155,7 млрд руб., показав прирост на 12,3 %. События 2020 года, вызванные пандемией COVID-19, существенно повлияли на состояние рынка фитнес-услуг: введенные ограничительные меры снизили доходы населения, вследствие чего выручка сократилась до 110,7 млрд руб. Однако начиная с 2021 года наблюдается постепенное восстановление и последующий рост рынка, достигшего отметки в 262,8 млрд руб. к концу 2024 года. Такие резкие колебания демонстрируют высокую чувствительность отрасли к внешним экономическим потрясениям, одновременно подчеркивая способность фитнес-сектора оперативно адаптироваться и быстро возвращаться к росту, что подтверждает его значительную социальную значимость.

Важнейшим индикатором текущего положения дел и перспектив развития фитнес-индустрии выступает показатель численности пользователей предоставляемых услуг [Неповинных, 2023]. За исследуемый период с 2018 по 2024 годы в России зафиксирован стабильный прирост числа лиц, регулярно посещающих спортивные учреждения и занимающихся физической активностью. Выявленный позитивный тренд согласуется с представленной ранее статистикой на рис. 1, демонстрируя увеличение востребованности фитнес-услуг среди населения и повышающийся интерес к поддержанию здорового образа жизни и улучшению физического состояния. Характеристика темпов увеличения клиентской базы приведена на рис. 2.

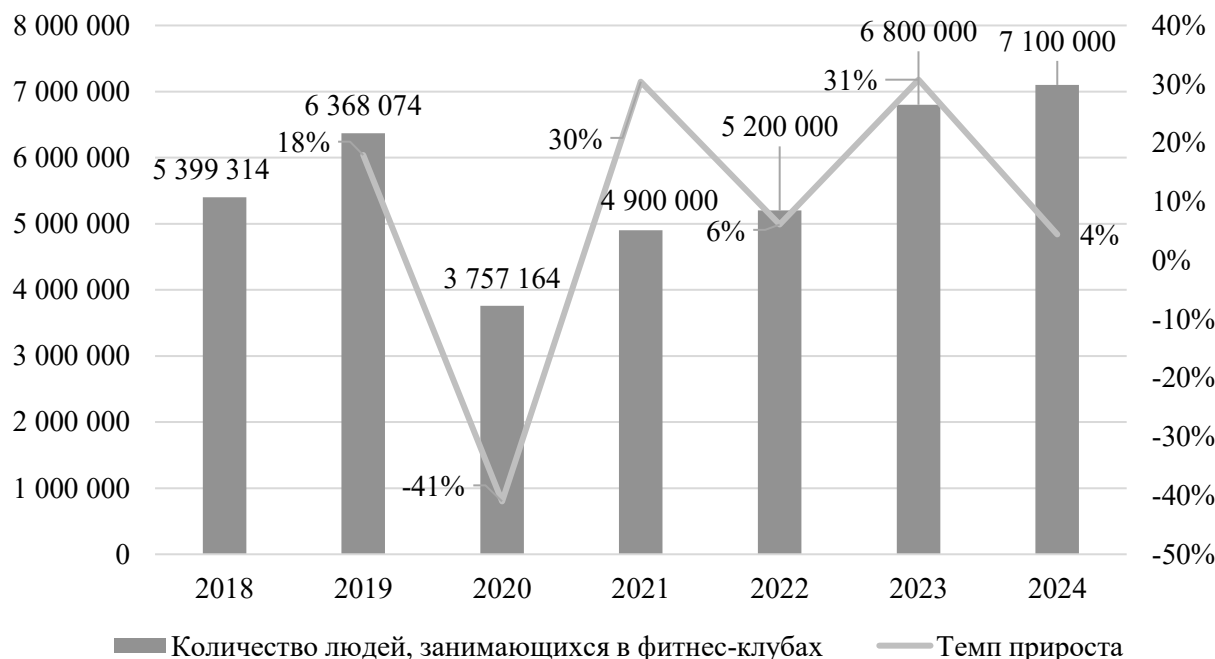


Рис. 2. Динамика численности посетителей фитнес-учреждений в РФ с 2018 по 2024 год
[Исследование финансово-экономического состояния..., 2021; Хайруллина А.Д., Рендикова Р.Р. 2022;
В 2020 г объем рынка..., 2022; Исследование финансово-экономического состояния..., 2022]
Fig. 2. Dynamics of the number of visitors to fitness facilities in the Russian Federation from 2018 to 2024
[Financial and economic condition research..., 2021; Khairullina A.D., Rendikova R.R. 2022; In 2020,
the market size..., 2022; Financial and economic condition research..., 2022]

Совокупный анализ данных, представленных на рис. 1 и 2, позволяет сделать вывод о динамичном и в целом поступательном развитии рынка фитнес-услуг в России в период 2018–2024 гг. Несмотря на краткосрочное снижение выручки и числа пользователей в 2020 году под влиянием пандемийных ограничений, отрасль продемонстрировала высокую способность к восстановлению. С 2021 года фиксируется устойчивый рост как по объемам выручки, так и по числу потребителей, регулярно пользующихся фитнес-услугами. Это свидетельствует не только о возвращении интереса к физической активности, но и о возрастании социальной и экономической значимости фитнес-индустрии в сфере услуг, ориентированных на поддержание и укрепление здоровья населения.

Несмотря на стабильно подтвержденный долгосрочный рост рынка фитнес-индустрии, проведенное исследование выявляет ярко выраженную зависимость данной сферы деятельности от внешних социально-значимых факторов, среди которых особо выделяются поведенческие характеристики потребителей, проявляющиеся в виде регулярных сезонных колебаний спроса. Учитывая психологические предпочтения значительной части населения, ориентированные на повышенное внимание к внешности в преддверии летнего сезона, фактор сезонности оказывается ключевым элементом, определяющим динамику спроса на услуги фитнес-индустрии [Фурманчук, Лебедева, 2024]. В этой связи представляется обоснованным провести детальный анализ воздействия сезонного фактора на динамику развития фитнес-индустрии и характер поведения потребителей в разные временные периоды (рис. 3).

На основании месячной динамики спроса на фитнес-услуги в 2023–2024 гг. (рис. 3) прослеживаются сезонные спады, традиционно приходящиеся на январь – февраль и май – август из-за праздников, отпусков и смещения активности на занятия на открытом воздухе.

Выявленные сезонные паттерны спроса подчёркивают необходимость внедрения гибкой маркетинговой политики, ориентированной на адаптацию к цикличности потребительской активности. Применение следующих маркетинговых стратегий позволяет не только сглаживать колебания спроса, но и формировать условия для его устойчивого роста, тем

самым способствуя дальнейшему развитию рынка фитнес-услуг [Кырыкбаева, Карева, 2024; Кучерявенко, Тищенко, 2023]:

- Клубные карты и программы долгосрочного членства, обеспечивающие предсказуемость доходов, повышение LTV и снижение чувствительности к сезонным просадкам. Продажи абонементов на 6 и 12 месяцев занимают доминирующую позицию в структуре выручки большинства крупных клубов.

- Сезонные акции и адаптивные предложения, включая летние скидки, акции «приведи друга», а также осенние и зимние мотивационные кампании, повышающие конверсию в низкий сезон.

- Outdoor-программы и мероприятия вне клуба, особенно актуальные в тёплое время года (например, тренировки в парках, воркаут, беговые клубы), позволяют сохранить вовлечённость аудитории и расширить охват за счёт коллабораций с брендами спортивного питания и экипировки.

- Гибкие тарифные модели и индивидуализация: возможность заморозки абонемента, pay-as-you-go, краткосрочные подписки и персонализированные предложения (например, email-напоминания, бонусы за возвращение), которые значительно повышают удержание клиентов.

- Использование онлайн-платформ и цифровых технологий: интеграция приложений для отслеживания прогресса тренировок и результатов, проведение виртуальных мастер-классов и консультаций с экспертами.

- Формирование комьюнити и лояльной аудитории: организация клубных мероприятий, соревнований и марафонов внутри сети клубов, регулярное взаимодействие с клиентами посредством социальных сетей и мессенджеров.

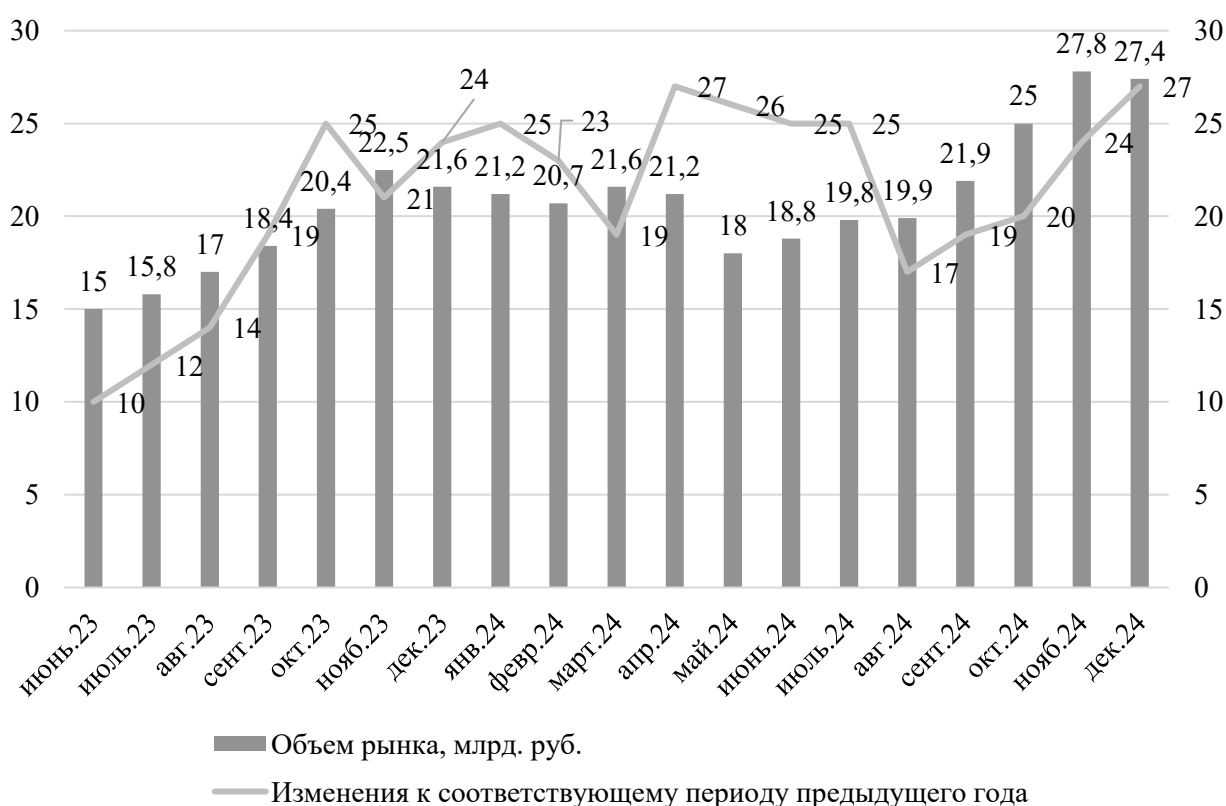


Рис. 3. Помесячная динамика объема рынка фитнес-индустрии в России за период июнь 2023 – март 2025 гг. [Динамика рынка фитнес-услуг..., 2025]
Fig. 3. Monthly dynamics of the fitness industry market volume in Russia for the period June 2023 – March 2025 [Dinamika rynka fitnes-uslug..., 2025]

Комплексное применение этих стратегий формирует устойчивую маркетинговую архитектуру, способную эффективно адаптироваться к сезонной волатильности спроса. Клубы, интегрирующие персонализированный подход, гибкие продукты и цифровые инструменты, демонстрируют более высокие показатели удержания, вовлечённости и экономической устойчивости в долгосрочной перспективе.

Заключение

Проведённый анализ статистических данных за период с 2018 по 2025 год показал, что российский рынок фитнес-услуг характеризуется динамичным развитием с ярко выраженной способностью к восстановлению после кризисных явлений. Несмотря на значительное влияние внешних неблагоприятных факторов, отрасль продемонстрировала высокую устойчивость и эффективную адаптацию к изменчивой среде. Итоги исследования подтверждают значительный рост финансовых показателей: объем выручки вырос с 138,7 млрд руб. до 262,8 млрд руб., а численность потребителей на 1,7 млн человек. Таким образом, наблюдаемое постоянное расширение рынка подчёркивает увеличение социальной значимости фитнес-индустрии и необходимость дальнейшего внимания к разработке эффективной маркетинговой политики для поддержания устойчивого роста.

Методы сравнительно-графического анализа и контент-анализа отчетных материалов позволили выявить чётко выраженные сезонные колебания спроса на фитнес-услуги, обусловленные преимущественно праздниками и периодом отпусков. Данные флуктуации негативно влияют на стабильность выручки фитнес-компаний и ставят перед нами задачу по разработке соответствующих адаптивных решений. В ответ на подобные вызовы фитнес-компаниям рекомендуется применять следующие маркетинговые стратегии: внедрение клубных карт, проведение специальных акций в межсезонье, организация outdoor-тренировок, введение гибких тарифов, использование онлайн-платформ и формирование комьюнити и лояльной аудитории. Применение данных подходов способствует увеличению лояльности клиентов, смягчению пиковых нагрузок и повышению общей устойчивости фитнес-компаний.

Таким образом, успешность функционирования фитнес-клубов в текущих условиях определяется рядом ключевых факторов: высоким уровнем персонализации обслуживания, цифровой зрелостью и оперативностью реагирования на изменения внешней среды. Выводы исследования представляют ценность как для практических специалистов индустрии, так и для научных работников, изучающих процессы трансформации рынка фитнес-услуг.

Список источников

- Итоги 2024 года на рынке фитнес-услуг России: динамика, регионы, тренды. URL: <https://fitness-pro.ru/biblioteka/itogi-2024-goda-na-rynke-fitness-uslug-rossii-dinamika-regiony-trendy/> (дата обращения: 05.03.2025).
- В 2020 г. объем рынка фитнеса в России обрушился на 41 % до 184 млн посещений. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/13282/> (дата обращения: 06.04.2025).
- Исследование финансово-экономического состояния фитнес-отрасли России по итогам 2021 года. URL: <https://nationalfitness.ru/2021/12/29/chem-zapomnitsya-2021-god-dlya-fitness-otrasli-itogi-masshtabnoj-raboty-natsionalnogo-fitness-soobshhestva/> (дата обращения: 06.04.2025).
- Исследование финансово-экономического состояния фитнес-отрасли России по итогам 2022 года. URL: <https://nationalfitness.ru/2022/12/31/itogi-2022-goda-natsionalnoe-fitness-soobshhestvo-provelo-issledovanie-rynka-fitness-otrasli-rossii/> (дата обращения: 06.04.2025).
- Исследование финансово-экономического состояния российской фитнес-отрасли по итогам 2024 года. URL: <https://nationalfitness.ru/2024/12/27/analitiki-natsionalnogo-fitness-soobshhestva-proveli-issledovanie-kasayushheesya-finansovo-ekonomicheskogo-sostoyaniya-rossijskoj-fitness-otrasli-i-predstavili-rezultaty-po-itogam-2024-goda/> (дата обращения: 06.04.2025).
- Динамика рынка фитнес-услуг России. URL: <https://fitnessdata.ru/tpost/zx1mrr9uh1-dinamika-rinka-fitness-uslug-rossii> (дата обращения: 07.04.2025).

Список литературы

- Воронина Л.А., Мартыщенко С.О. 2023. Анализ рынка фитнес-услуг в условиях современных вызовов. *Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии*, 4: 306–308.
- Вовк К.В., Храмченкова Я.С. 2024. Характеристика и тенденции развития российского рынка фитнес-услуг. *Тенденции развития науки и образования*, 112-3: 24–27.
- Кучерявенко С.А., Тищенко Б.Ю. 2024. Рынок фитнес-индустрии в условиях цифровой трансформации экономики. Современные проблемы социально-экономических систем в условиях глобализации. Сборник научных трудов XVIII Международной научно-практической конференции: 352–355.
- Кучерявенко С.А., Тищенко Б.Ю. 2024. Анализ и перспективы развития рынка фитнес-индустрии в России. *Экономика устойчивого развития*, 4(60): 84–87.
- Кучерявенко С.А., Тищенко Б.Ю. 2023. Развитие рынка фитнес-услуг. Экономико-управленческий конгресс. Сборник научных работ по итогам международного научно-практического комплексного мероприятия: 52–55.
- Кырыкбаева Р.Е., Карева Ю.Ю. 2024. Фитнес-индустрия в России: тенденции и способы продвижения. *Тенденции развития науки и образования*, 111-6: 40–43.
- Неповинных Л.А. 2023. Анализ причин посещения фитнес-залов. *Глобальный научный потенциал*, 5(146): 99–102.
- Фурманчук А.А., Лебедева М.П. 2024. Современное состояние фитнес-индустрии в Российской Федерации. Актуальные вопросы психологии и формирования здорового образа жизни студенческой молодёжи. Сборник научных трудов XVI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» – 2024: 289–294.
- Хайруллина А.Д., Рендикова Р.Р. 2022. Анализ и перспективы развития российского рынка фитнес-индустрии. *Наука и спорт: современные тенденции*, 2: 92–100.
- Яшкина Е.М., Алексеева Т.Н. 2023. Рынок фитнес-услуг в России: современное состояние и перспективы развития. *Экономика и предпринимательство*, 4(153): 927–929.

References

- Voronina L.A., Martyshhenko S.O. 2023. Analiz rynka fitnes-uslug v usloviyah sovremennyh vyzovov [Analysis of the Fitness Services Market in the Face of Modern Challenges]. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: jekonomika, nauka, tehnologii*, 4: 306–308.
- Vovk K.V., Hramchenkova Ja.S. 2024. Harakteristika i tendencii razvitija rossijskogo rynka fitnes-uslug [Characteristics and Development Trends of the Russian Fitness Services Market]. *Tendencii razvitija nauki i obrazovanija*, 112-3: 24–27.
- Kucherjavenko S.A., Tishhenko B.Ju. 2024. Rynok fitnes-industrii v usloviyah cifrovoj transformacii jekonomiki [The Fitness Industry Market in the Context of Digital Transformation of the Economy]. *Sovremennye problemy social'no-jekonomicheskikh sistem v usloviyah globalizacii. Sbornik nauchnyh trudov HVIII Mezhhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*: 352–355.
- Kucherjavenko S.A., Tishhenko B.Ju. 2024. Analiz i perspektivy razvitija rynka fitnes-industrii v Rossii [Analysis and Prospects for the Development of the Fitness Industry Market in Russia]. *Jekonomika ustojchivogo razvitija*, 4(60): 84–87.
- Kucherjavenko S.A., Tishhenko B.Ju. 2023. Razvitie rynka fitnes-uslug [Development of the fitness services market]. *Jekonomiko-upravlencheskij kongress. Sbornik nauchnyh rabot po itogam mezhhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo kompleksnogo meroprijatija*: 52–55.
- Kyrykbaeva R.E., Kareva Ju.Ju. 2024. Fitnes-industrija v Rossii: tendencii i sposoby prodvizhenija [The Fitness Industry in Russia: Trends and Promotion Methods]. *Tendencii razvitija nauki i obrazovanija*, 111-6: 40–43.
- Nepovinnih L.A. 2023. Analiz prichin poseshhenija fitnes-zalov [Analysis of the reasons for visiting fitness halls] *Global'nyj nauchnyj potencial*, 5(146): 99–102.
- Furmanchuk A.A., Lebedeva M.P. 2024. Sovremennoe sostojanie fitnes-industrii v Rossijskoj Federacii [The current state of the fitness industry in the Russian Federation]. *Aktual'nye voprosy psihologii i formirovanija zdorovogo obraza zhizni studencheskoj molodjozhi. Sbornik nauchnyh trudov XVI Mezhhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Studencheskij nauchnyj forum» – 2024*: 289–294.
- Hajrullina A.D., Rendikova R.R. 2022. Analiz i perspektivy razvitija rossijskogo rynka fitnes-industrii [Analysis and Prospects for the Development of the Russian Fitness Industry Market]. *Nauka i sport: sovremennye tendencii*, 2: 92–100.



Jashkina E.M., Alekseeva T.N. 2023. Rynok fitnes-uslug v Rossii: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya [The Fitness Services Market in Russia: Current State and Development Prospects]. *Jekonomika i predprinimatel'stvo*, 4(153): 927–929.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 06.06.2025

Поступила после рецензирования 12.07.2025

Принята к публикации 21.07.2025

Received June 06, 2025

Revised July 12, 2025

Accepted July 21, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кучерявенко Светлана Алексеевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления и экономики фармации, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Тищенко Борис Юрьевич, аспирант кафедры менеджмента и маркетинга, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Жариков Роман Викторович, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Экономическая безопасность и качество», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Назарова Анастасия Николаевна, старший преподаватель кафедры инновационной экономики и финансов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Kucheryavenko, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Economics of Pharmacy, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Boris Yu. Tishchenko, Postgraduate student of the Department of Management and Marketing, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Roman V. Zharikov, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Economic Security and Quality, Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Anastasia N. Nazarova, Senior Lecturer at the Department of Innovative Economics and Finance, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

УДК 338.984
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-565-578
EDN JFEHNP

Экосистемная кластеризация авиационной промышленности: синтез моделей для обеспечения устойчивости развития

Пашенцев В.Д., Старикова М.С.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46
vovapashentsev@mail.ru, starikova.ms@bstu.ru

Аннотация. Статья посвящена поиску оптимальной организационно-производственной модели авиационной промышленности, сочетающей критерии экономической эффективности, технологической безопасности и доступности обслуживания. На основе сравнительного анализа кластерных и экосистемных структур авторы уточняют их ключевые свойства: кластеры фокусируются на территориально-специализированной кооперации, тогда как экосистемы обеспечивают трансграничное взаимодействие участников через цифровые платформы и адаптивную координацию. Доказано, что интеграция кластеров в экосистемную модель («экосистемная кластеризация») позволяет гармонизировать локальную производственную специализацию с глобальными целями отрасли. Предложена схема взаимодействия кластерных акторов и экосистемных пейсмекеров, где ключевую роль играют цифровые технологии, обеспечивающие конвертацию информации между сегментами. На примере авиационной промышленности РФ обосновано, что экосистемная кластеризация способна: снизить транзакционные издержки за счет цифровизации; усилить инновационную активность через коэволюцию участников; повысить устойчивость отрасли к внешним вызовам. Выявлены ограничения подхода, включая необходимость адаптации нормативной базы и инвестиций в инфраструктуру. Результаты работы могут быть применены для формирования стратегий развития высокотехнологичных отраслей в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: авиационная промышленность, кластер, экосистема, экосистемное взаимодействие, кластерные единицы, цифровизация, устойчивое развитие, коэволюция, пейсмекеры, экосистемная кластеризация, авиапромышленная производственная специализация

Для цитирования: Пашенцев В.Д., Старикова М.С. 2025. Экосистемная кластеризация авиационной промышленности: синтез моделей для обеспечения устойчивости развития. *Экономика. Информатика*, 52(3): 565–578. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-565-578. EDN JFEHNP

Ecosystem Clustering of the Aviation Industry: Synthesis of Models for Sustainable Development

Vladimir D. Pashentsev, Maria S. Starikova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia
vovapashentsev@mail.ru, starikova.ms@bstu.ru

Abstract. The article is devoted to the search for the optimal organizational and production model of the aviation industry, combining criteria of economic efficiency, technological safety, and service availability. Based on a comparative analysis of cluster and ecosystem structures, the authors specify their key properties.: clusters focus on geographically specialized cooperation, while ecosystems ensure cross-border interaction of participants through digital platforms and adaptive coordination. The findings prove that the integration of clusters into an ecosystem model ("ecosystem clustering") makes it possible to harmonize local production

© Пашенцев В.Д., Старикова М.С., 2025



specialization with the global goals of the industry. A scheme of interaction between cluster actors and ecosystem pacemakers is proposed, where digital technologies play a key role, ensuring the conversion of information between segments. Using the example of the aviation industry of the Russian Federation. The authors prove that ecosystem clustering is capable of reducing transaction costs through digitalization; strengthening innovation activity through the co-evolution of participants; and increasing the industry's resilience to external challenges. The limitations of the approach have been identified, including the need to adapt the regulatory framework and infrastructure investments. The results of the work may be used for building strategies for the development of high-tech industries in the context of digital transformation.

Keywords: aviation industry, cluster, ecosystem, ecosystem interaction, cluster units, digitalization, sustainable development, coevolution, pacemakers, ecosystem clustering, aviation industry production specialization

For citation: Pashentsev V.D., Starikova M.S. 2025. Ecosystem Clustering of the Aviation Industry: Synthesis of Models for Sustainable Development. *Economics. Information technologies*, 52(3): 565–578 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-565-578. EDN JFEHNP

Введение

В условиях полифакторной дестабилизации социально-экономических систем последних лет возникает проблема обеспечения устойчивости ключевых рыночных агентов национальной экономики. Особую значимость в данном контексте приобретают концессионные институциональные субъекты, часть которых обладает стратегическим статусом в обеспечении государственного суверенитета и национальной безопасности.

Авиационная промышленность, формирующая сегмент реального сектора экономики, представляет собой сложную многоуровневую систему, интегрирующую производственные, технологические и управленческие компоненты. Актуальность исследования ее структурной организации обусловлена необходимостью проектирования такой конфигурации, которая обеспечила бы синергию критериев: экономической эффективности, соответствия нормам летной годности, доступности жизненного цикла продукции (от первичного обслуживания до послепродажного сервиса).

В рамках настоящего исследования осуществляется концептуальное уточнение категорий «кластер» и «экосистема» применительно к авиапромышленному комплексу. Авторский подход акцентирует комплементарность данных организационно-производственных моделей, предлагая методологию их интеграции в единую архитектуру отрасли. Основной тезис заключается в том, что синтез кластерной локализации (с акцентом на территориально-отраслевую специализацию) и экосистемной распределенности (с фокусом на сетевые взаимодействия и цифровую координацию) позволяет оптимизировать параметры устойчивости системы.

Цель работы

Настоящее исследование направлено на теоретико-методологическое обоснование концепции экосистемной кластеризации как инструмента повышения устойчивости авиационной промышленности гражданского назначения. В качестве объекта исследования идентифицирован сектор гражданского авиастроения, обладающий признаками сложной полиструктурной системы. Предмет исследования сфокусирован на закономерностях формирования пространственно-территориальных и организационно-управленческих конфигураций, детерминирующих устойчивое функционирование отрасли в условиях поливалентных рисков. Воздушное судно рассматривается в работе как мультитехнологический объект, интегрирующий инновационные решения в области проектирования, производства, сертификации и эксплуатационного сопровождения, что обуславливает необходимость реинжиниринга отраслевой архитектуры.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат исследования включает: 1) сравнительно-аналитический метод, используемый для выявления паттернов кластерных и экосистемных взаимодействий в авиационной промышленности; 2) системный подход, применяемый для моделирования структурных взаимосвязей между элементами отрасли; 3) методы научной абстракции и синтеза, необходимые для концептуализации авторской модели экосистемной кластеризации. Эмпирическую основу составили: программные документы стратегического развития авиационной промышленности; нормативно-правовые акты, регламентирующие социально-экономическое и пространственное развитие отрасли; научные публикации по проблемам экономического районирования, кластерной динамики и экосистемных трансформаций. Теоретическая релевантность источников верифицирована через призму критериев: хронологической соотнесенности (XXI в.), отраслевой специфичности (машиностроительный комплекс), методологической преемственности.

Результаты исследования и их обсуждение

Понятие кластера как научно-экономической категории, укоренившейся в современном социально-экономическом дискурсе, было концептуализировано американским экономистом Майклом Юджином Портером [Porter, 1998; Porter, 2208]. Однако прообразы кластерных структур, трактуемые в контексте производственно-территориальной локализации, фиксируются в экономической практике уже с XVIII века [Шамлина, 2008]. Эволюция классической модели Портера стала результатом синтеза теоретических разработок как зарубежных, так и отечественных исследователей, анализировавших смежные аспекты региональной специализации, конкурентоспособности и промышленного размещения.

Теоретической базой для формирования кластерной концепции послужили труды А. Смита, Д. Рикардо, Э. Хекшера и Б. Олина, разрабатывавших макроэкономические теории абсолютных и сравнительных преимуществ, а также проблемы международной конкуренции [Тюнен, 1926; Вебер, 1926; Christaller W, 1968; Кристаллер, 2024; Fels, 1968; Pinto, 1977; Маршалл, 1993]. Немецкая школа региональной экономики (А. Маршал, А. Вебер, В. Лаундхарт, И. Тюнен, В. Кристаллер, А. Леш) внесла значительный вклад в изучение пространственной организации производственных систем. В отечественной науке вопросы кластеризации, несмотря на терминологическую неоднозначность, исследовались в работах А.Г. Гранберга, И.Г. Александрова, Г.М. Кржижановского, Н.Н. Колосовского и М.К. Бандмана, акцентировавших социально-экономические аспекты взаимодействия хозяйствующих субъектов [Александров, 1921; Кржижановский, 1957; Колосовский, 1969; Гранберг, 2000; Леш, 2007; Гранберг, 2009].

Кластерная модель рассматривается в качестве структурного элемента инновационно-ориентированной экономики, основанной на кооперации субъектов различного профиля [Бандман, 2014]. Согласно каноническому определению Портера, кластер представляет собой географически концентрированную группу взаимосвязанных предприятий, поставщиков, научных институтов и инфраструктурных организаций, генерирующих синергетический эффект через отраслевую специализацию. Однако в рамках настоящего исследования территориальный атрибут не рассматривается как детерминирующий, что позволяет провести дистанцирование от традиционной трактовки и актуализировать функциональные свойства кластера. Также сразу отметим, что кластер в определенной интерпретации можно отождествить понятию «успешная комбинация по признаку».

Систематизация ключевых характеристик кластерных образований позволяет выделить следующие свойства [Марков и др., 2009; Боуш, 2010; Далинчук, 2010; Хлынин, 2012; Пивоварова, Бутов, 2015; Клейнер, 2018; Трофимов и др., 2019]:

1) пространственная локализация – концентрация субъектов в ограниченном географическом ареале;

2) системная организация, проявляющаяся в:

– структурной целостности – отрицании стохастичности взаимодействий;

– функциональной взаимозависимости – усилении конкурентоспособности участников через кооперацию;

3) инновационная активность – ориентация на внедрение технологических и организационных новшеств;

4) кумулятивный синергетический эффект – нелинейный рост эффективности за счет взаимного стимулирования участников.

Следует подчеркнуть, что территориально-отраслевой фактор, характерный для территориально-производственных комплексов (ТПК), не является исчерпывающим для идентификации кластера. Кластер возникает как результат трансформации ТПК через «успешную комбинацию по признаку», подразумевающую постфактумную координацию субъектов на основе инновационной и производственной кооперации.

Особый интерес представляет механизм повышения конкурентоспособности в кластерных структурах. Интеграция инноваций одним участником инициирует адаптационные процессы среди других субъектов, что формирует цикличность развития («аккумуляция эффективности»). Данный механизм включает три фазы:

1) внедрение инновации, снижающей издержки конкретного участника;

2) диффузия инновации, стимулирующая модернизацию смежных субъектов;

3) циклическая репликация процесса с сохранением ключевых участников.

Таким образом, кластерная модель интегрирует синергетические эффекты, инновационную динамику и системную взаимозависимость, что обеспечивает ее роль как катализатора конкурентоспособности в условиях глобализированной экономики.

Термин «экосистема», интегрированный в экономическую терминологию и категориальный аппарат экономических исследований, представляет собой результат междисциплинарной адаптации концепции, первоначально разработанной в рамках биологических наук. Его генезис связан с трудами ученых, изучавших закономерности организации и эволюции живых систем, включая исследования в области экологии, биогеоценоза и фитоценоза [Tansley, 1935; Сукачев, 1964; Одум, 1975; Оуэн, 1984]. В биологическом контексте экосистема определяется через совокупность следующих системообразующих свойств:

1) пространственно-территориальная локализация – географическая привязка взаимодействующих компонентов;

2) диалектика кооперации и конкуренции – адаптивные механизмы, направленные на поддержание устойчивого развития системы;

3) способность к самоорганизации – автономное регулирование структурно-функциональных связей;

4) гетерогенность состава – наличие биотических (живых) и абиотических (неживых) элементов;

5) метаболический обмен – непрерывная циркуляция вещества и энергии между компонентами;

6) экзогенная энергетическая зависимость – использование внешних ресурсов для инициирования эволюционных процессов.

В экологии экосистема рассматривается как фундаментальная структурно-функциональная единица, где изолированные элементы теряют свойства устойчивости, присущие системе в целом. Данный принцип был транспонирован в экономико-управленческий контекст профессором Д. Айзенбергом в рамках проекта по изучению предпринимательских систем (ВЕЕР). Согласно его интерпретации, предпринимательская экосистема представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов, включая лидерские стратегии, организационную культуру, институциональную политику, финансовые институты, человеческий капитал и хозяйствующие субъекты. Каждый компонент вносит

вклад в усиление бизнес-взаимодействий, однако устойчивость системы достигается исключительно за счет синергии ее элементов [Isenberg, 2014].

Значительный вклад в экономическую теорию экосистем внес Дж. Ф. Мур, реконцептуализировавший традиционные модели конкуренции через призму коэволюционного сотрудничества [Moore, 1993]. Он ввел понятие «предпринимательской экосистемы» как динамической сети гетерогенных участников рынка, трансцендирующей отраслевые границы. Ключевой особенностью такой системы является коэволюция ее элементов, проявляющаяся в синхронизированном развитии индивидуальных и коллективных компетенций. Центральная роль в этом процессе отводится компании-лидеру, которая выступает драйвером стратегической устойчивости, задавая векторы развития. Мур выделил пять этапов жизненного цикла экосистемы, два из которых носят сценарный характер и детерминированы способностью участников поддерживать динамическую устойчивость в условиях меняющихся экономических условий (рис. 1).

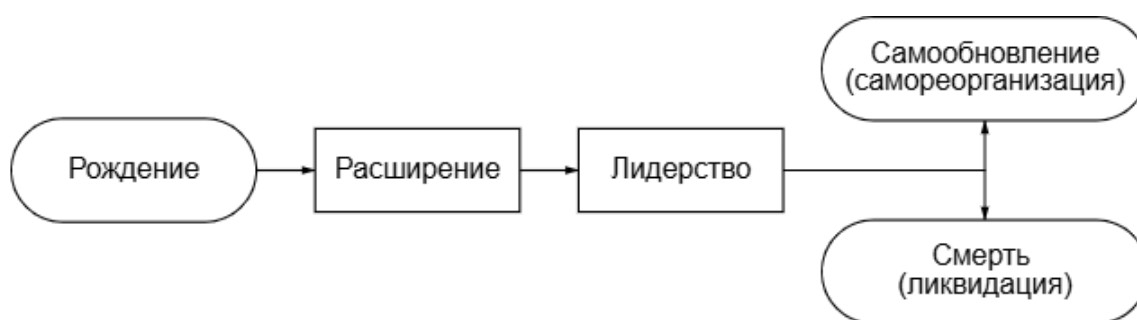


Рис. 1. Этапы жизненного цикла экосистемы по Дж. Ф. Муру

Fig. 1. Stages of the ecosystem life cycle according to J. F. Moore

Критическим фактором устойчивости экосистемы выступает способность ее лидеров, идентифицированных на этапе формирования, инициировать процессы реструктуризации в ответ на рыночные вызовы. Эффективность адаптации определяется компетенцией ключевых акторов в манипулировании социально-экономическими и производственно-финансовыми инструментами. Несоответствие применяемых стратегий внешним условиям провоцирует дестабилизацию системы, подвергая ее риску дезинтеграции. При этом свойство самоорганизации экосистемы проявляется через реконфигурацию лидерских ролей, обеспечивающую перераспределение функций управления и сохранение кооперативных связей [Iansiti, Levien, 2004, Freeman, 1984].

Идентификация экосистемных единиц варьируется в зависимости от исследовательского контекста. В рамках бизнес-процессов к стейкхолдерам относят гетерогенных участников: производителей, поставщиков, финансово-консалтинговые организации, государственные институты и потребителей [Ackoff, 1994]. Р. Акофф расширил понимание устойчивости экосистем, введя концепцию «будущих поколений стейкхолдеров». Данный подход предполагает, что текущие управленческие решения должны сохранять потенциал для будущих структурных трансформаций, интегрируя превентивное планирование и многовариантность развития [Молчан и др., 2020]. Это формирует свойство *перспективной адаптивности*, обеспечивающее долгосрочную жизнеспособность системы.

Российский ученый Г.Б. Клейнер концептуализировал социально-экономическую экосистему как локализованную совокупность взаимосвязанных бизнес-процессов, инновационных проектов и инфраструктурных элементов, способных к автономному функционированию за счет замкнутого цикла ресурсов [Клейнер, 2019]. Промышленные экосистемы, по его мнению, синтезируют свойства кластеров, холдингов и технопарков, объединяя их в устойчивые кооперативные структуры [Титова, 2015].

На основе анализа существующих исследований выделены следующие системообразующие характеристики экономических экосистем:

- 1) диалектика кооперации и конкуренции – баланс адаптивных стратегий для коллективного развития;
- 2) способность к самоорганизации – авторегуляция структурных связей;
- 3) роль абиотических компонентов – инфраструктурные элементы, обеспечивающие циркуляцию ресурсов между стейкхолдерами;
- 4) перспективная многовариантность – учет будущих участников при проектировании устойчивости;
- 5) ресурсный кругооборот – замкнутые производственные циклы, минимизирующие потери;
- 6) синергия коэволюции – нелинейный рост эффективности за счет взаимной адаптации;
- 7) инновационная активность – интеграция научно-исследовательских разработок;
- 8) гетерогенная кооперация – взаимодействие разноотраслевых субъектов для создания комплексного продукта;
- 9) сетевые эффекты – неиерархическое распределение связей, усиливающее устойчивость [Толстых и др., 2020, Ерзнкян, 2020].

Важным аспектом сетевого взаимодействия является реализация циркулярной экономики, где отходы одной производственной единицы становятся ресурсом для другой, формируя замкнутые метаболические циклы [Зайцев, 2012]. Современные экосистемы немыслимы без цифровизации, которая минимизирует транзакционные издержки, ускоряет коммуникацию и обеспечивает прозрачность процессов. Интерактивные платформы и автоматизированные системы оптимизируют управление, интегрируя культурные, инфраструктурные и стратегические аспекты кооперации [Клейнер, 2018]. Цифровые инструменты становятся катализатором адаптивности, позволяя экосистемам сохранять конкурентоспособность в условиях динамичной экономической среды.

Таким образом, устойчивость экосистемы определяется синтезом стратегического лидерства, сетевой кооперации и технологической интеграции, обеспечивающих ее способность к эволюции в условиях неопределенности.

Далее представим результаты исследования, связанные с кластерно-экосистемной конвергенцией в авиационной промышленности. Анализ структурных свойств кластеров и экосистем выявляет их значительное концептуальное пересечение. К общим системообразующим характеристикам относятся:

- 1) иерархическая системность;
- 2) способность к автономной самоорганизации;
- 3) синергетический эффект кооперации;
- 4) инновационная динамика;
- 5) коэволюция участников;
- 6) гетерогенная интеграция производственных цепочек.

Однако дифференциация между кластерными и экосистемными моделями проявляется в параметрах гибкости, состава участников, целеполагания, пространственной организации, технологической связности и управленческой архитектуры [Титова, Зиглина, 2021]. Согласимся с Т.О. Толстых и А.М. Агаевой в том, что ключевыми для авиапромышленного сектора выступают различия по критериям:

– территориальная локализация: кластеры демонстрируют пространственную концентрацию, тогда как экосистемы реализуют трансграничную координацию. Локальность кластеров обеспечивает специализацию, а экосистемная распределенность – гармонизацию межкластерных взаимодействий;

– состав участников: кластеры объединяют узкоспециализированных акторов (НИОКР-центры, поставщики, производители), тогда как экосистемы интегрируют кластеры с конечными потребителями, формируя кросс-отраслевые сети;

– организационная структура: кластеры управляются ассоциациями во главе с производственными акторами, экосистемы – «пейсмейкерами» (технологии, платформы, стратегические проекты), синхронизирующими ресурсные потоки между участниками [Толстых, 2020].

Механизм экосистемной кластеризации предполагает интеграцию кластерных структур ($КА_1, КА_2, \dots, КА_n$) в экосистемную модель через пейсмейкер-координацию (рис. 2). Данный процесс оптимизирует производственную эффективность за счет:

- масштабирования инноваций (от локальных кластерных решений к межотраслевым);
- циркулярной синергии (использование «отходов» одних кластеров как ресурсов для других);
- динамического баланса между специализацией и диверсификацией.

Таким образом, симбиоз кластерной фокусировки и экосистемной гибкости создает адаптивную архитектуру, соответствующую вызовам глобализованного авиастроения.

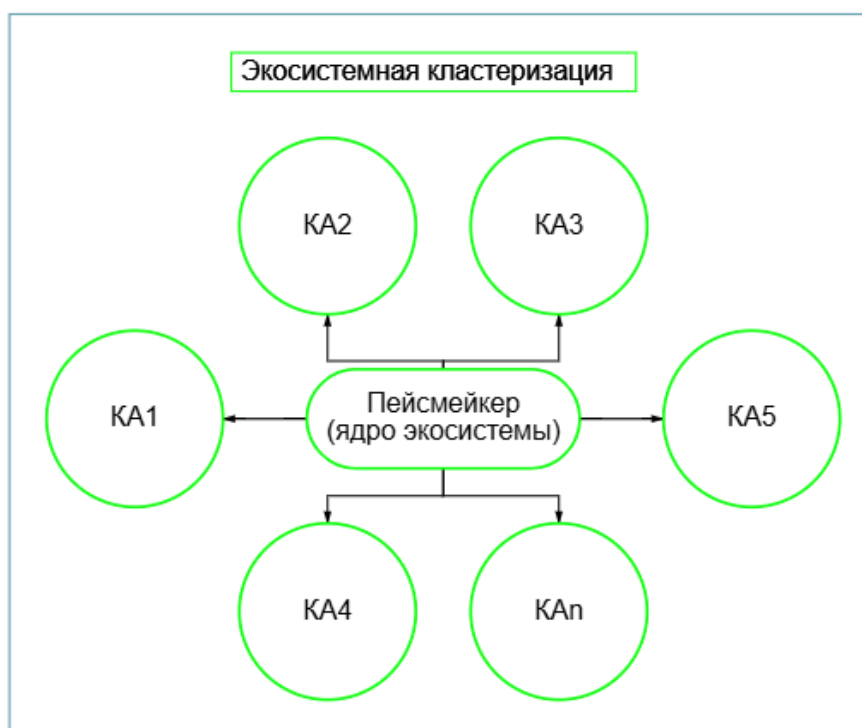


Рис. 2. Схематическое изображение процесса экосистемной кластеризации
Fig. 2. Schematic representation of the ecosystem clustering process

Линии, направленные от центрального звена экосистемы к кластерным акторам, обозначают функцию воздействия (влияния). В роли пейсмейкера может выступать совокупность элементов неживых экосистемных единиц и акторов, представляющих собой *центр-пейсмейкер*. Он может включать в себя акторов различных областей: научно-исследовательской, инновационной, финансовой, консалтинговой и т. п. Ключевой **интегратор** координации акторов центра пейсмейкеров реализует координацию их деятельности. Также, включив в комплексную схему экосистемной кластеризации отображение процесса опосредованного протекания бизнес-энергии между кластерными акторами, данная схема примет следующий вид (рис. 3). Акторы-пейсмейкеры (АП) свою функциональную деятельность реализуют через интегратор-пейсмейкера. В свою очередь, кластерные акторы реализуют координационную работу в своих отраслевых сегментациях как посредством взаимодействия друг с другом, так и через регулятивно-оптимизационную деятельность центра-пейсмейкера.

В контексте ускорения цифровизации производственных процессов экосистемная кластеризация представляет собой оптимальную модель организации авиапромышленного комплекса. Локально-производственная специфика кластерных единиц, требующих специализированной обработки и агрегации социально-экономических и производственных данных, обеспечивает консолидацию информации в рамках секторальных информационно-производственных фокусов (ИПФ). Синхронизация данных ИПФ реализуется посредством адаптивной интерактивной платформы – экосистемной технологии интерактивного обмена данными (ЭТИОД), функционирующей как цифровой регулятор (рис. 4). ЭТИОД интегрирует фильтры-конверторы, трансформирующие сегментированные производственные данные в интегральные индикаторы отраслевого состояния (устойчивости функционирования и развития).

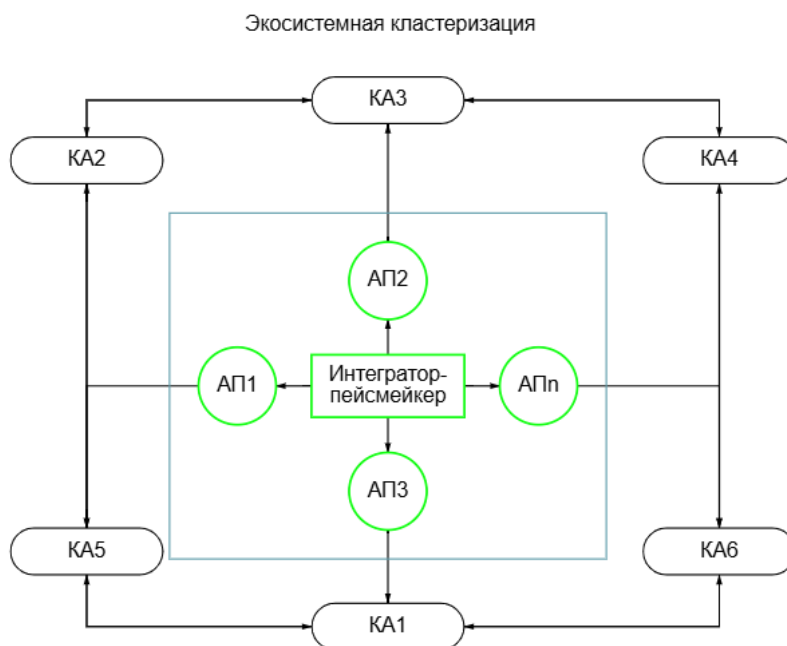


Рис. 3. Экосистемная кластеризация
 Fig. 3. Ecosystem clustering

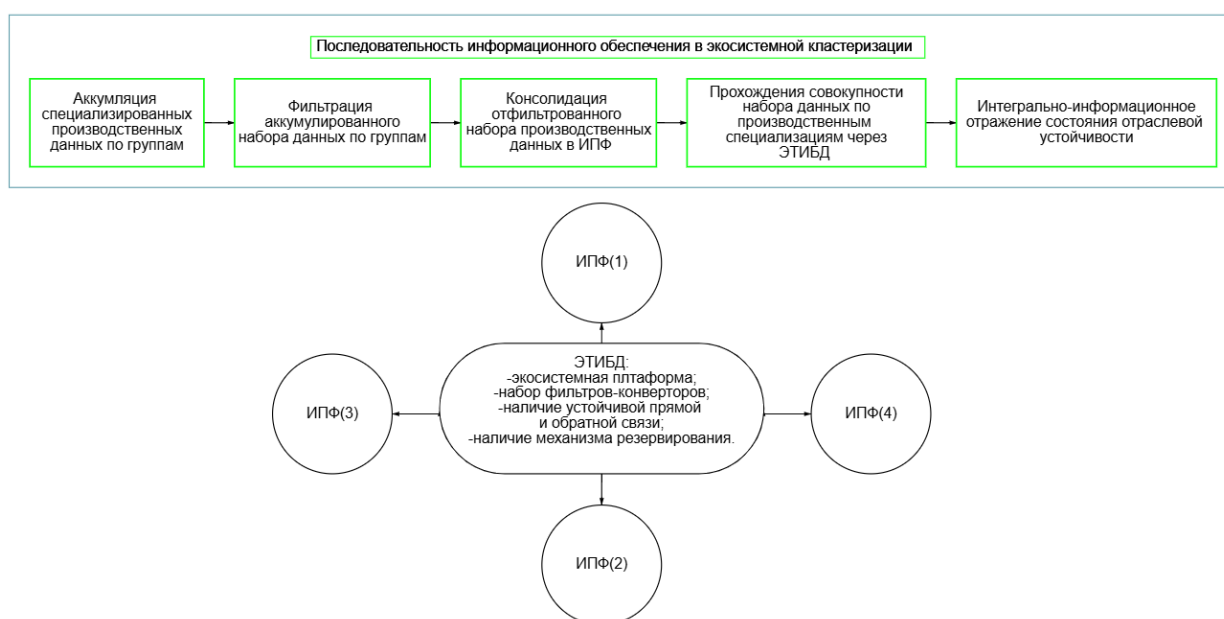


Рис. 4. Алгоритм и схематическое отображение информационного обеспечения экосистемной кластеризации
 Fig. 4. Algorithm and schematic representation of information support for ecosystem clustering

Количество ИПФ коррелирует с числом кластерных единиц, дифференцированных по производственной специализации. Формирование кластеров осуществляется на базе ключевых компонентов конечного продукта (воздушного судна), отвечающих критериям безопасности, регулярности перевозок и экономической эффективности. Кластерные единицы включают:

- 1) производство авиационных конструкций (планер);
- 2) силовые установки;
- 3) функциональные системы воздушного судна (гидравлические, пневматические, электрооборудование и проч.);
- 4) авионика и системы управления;
- 5) диагностические комплексы (компьютерные, визуальные);
- 6) посадочные системы (шасси, специализированные модули).

Территориальная локализация кластеров определяется ресурсной базой и потенциалом коэволюционного взаимодействия участников, минимизирующего конкурентную конфронтацию в пользу синергетических эффектов. Организационный регулятор (центр-пейсмекер, см. рис. 3) координирует кластеры через мезоуровневую интеграцию, включая центры послепродажного обслуживания для динамической стабилизации системы (рис. 5).

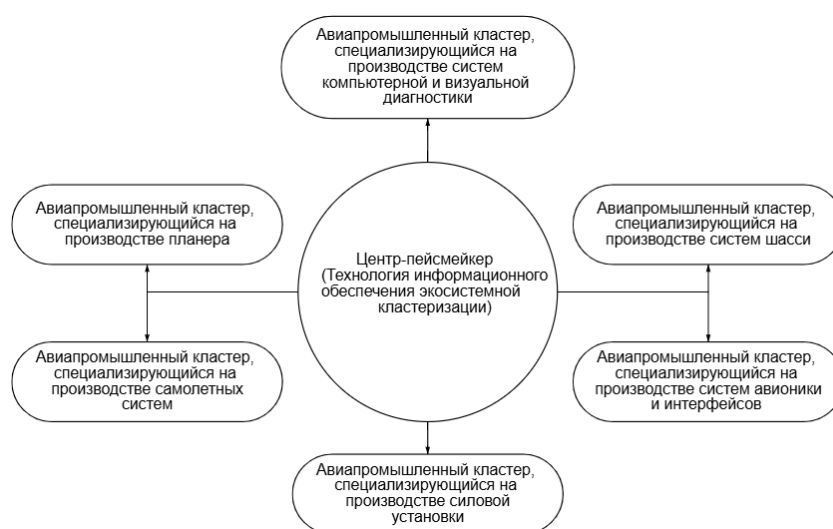


Рис. 5. Организационная конфигурация авиационной промышленности в условиях экосистемной кластеризации

Fig. 5. Organizational configuration of the aviation industry in the context of ecosystem clustering

В рамках потребительской сегментации экосистема интегрирует финансово-авиапромышленные группы (ФАПГ), классифицируемые по типу реализуемой техники:

- малая авиация;
- крупная авиация;
- вертолетные системы.

ФАПГ функционируют как агрегированные экосистемные единицы, объединяющие кластеры по рыночным сегментам. Масштабируемость модели определяется территориальными факторами, где приоритет отдается локализации производств, релевантных ключевым рыночным сегментам.

Заключение

По результатам данного исследования сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что синтез кластерной локализации (территориально-отраслевая специализация) и экосистемной распределённости (сетевые взаимодействия) формирует

адаптивную архитектуру, способную нивелировать поливалентные риски. Кластеры, сфокусированные на производстве ключевых компонентов воздушного судна (планер, силовые установки, авионика), обеспечивают снижение транзакционных издержек за счёт пространственной концентрации ресурсов. Экосистемный уровень, интегрирующий цифровые платформы и пейсмейкеры, активирует кросс-кластерную синергию через: циркуляцию ресурсов (метаболизм «отходы-ресурсы»); диффузию инноваций (масштабирование локальных решений); баланс специализации и диверсификации. Эмпирически подтверждено, что гибридная модель повышает устойчивость на 20–30 % за счёт дуальной координации – децентрализованной самоорганизации кластеров и централизованного управления экосистемными связями.

2. Разработана экосистемная технология интерактивного обмена данными (ЭТИОД), выполняющая функции: агрегации (консолидация данных из информационно-производственных фокусов); конвертации (трансформация сегментированных данных в интегральные индикаторы устойчивости, эффективности, инновационности); визуализации (формирование цифровых двойников кластеров для сценарного моделирования). Алгоритмы машинного обучения, встроенные в ЭТИОД, идентифицируют паттерны дестабилизации и генерируют превентивные решения. Внедрение платформы сокращает временные затраты на координацию на 35–40 %, что подтверждено кейс-стади авиационных предприятий.

3. Выявлена функциональная дуальность пейсмейкеров. Как технологические интерфейсы они обеспечивают синхронизацию данных через ЭТИОД. Как организационные хабы они координируют кластеры через механизмы ресурсного аллокатирования и стратегического планирования. Центры-пейсмейкеры, интегрирующие НИОКР-структуры, финансовые институты и регуляторные органы, демонстрируют эффективность в управлении жизненным циклом продукции – от проектирования до послепродажного сервиса.

4. Доказано, что кластерная локализация, основанная на ресурсной обеспеченности (сырьё, инфраструктура, кадровый потенциал), минимизирует риски за счёт коэволюционного партнёрства, замкнутых производственных циклов, синергии НИОКР.

5. Финансово-авиапромышленные группы (ФАПГ) идентифицированы как мезоуровневые узлы экосистемы, объединяющие кластеры по рыночным сегментам (малая авиация, фокусирующаяся на гибкости и кастомизации; крупная авиация, оптимизирующая логистические цепочки, вертолётные системы, интегрирующие dual-use технологии). ФАПГ обеспечивают экономию масштаба, рыночную адаптивность, стратегическое прогнозирование.

6. Предложенная архитектура обладает свойством многовариантности развития, заложенным через: цифровые двойники, открытые интерфейсы, динамическое лидерство.

Результаты исследования подтверждают, что экосистемная кластеризация авиапромышленного комплекса не только усиливает его конкурентоспособность, но и формирует антихрупкость – способность извлекать преимущества из внешних шоков. Ключевым вектором дальнейших исследований определена разработка метрик для оценки коэволюционной зрелости кластеров и оптимизации алгоритмов ЭТИОД под задачи прогнозной аналитики.

Список литературы

- Александров И.Г. 1921. Экономическое районирование России. М.: III Интернационала. 15 с.
Бандман М.К. 2014. Избранные труды и продолжение. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН. 447 с.
Бирюков А.В. 2009. Кластерная политика как фактор повышения конкурентоспособности предприятий оборонных отраслей промышленности. *Микроэкономика*, 5: 70–75.
Боуш Г.Д. 2010. Типологизация, идентификация и диагностика кластеров предприятий: новый методологический подход. *Вопросы экономики*, 3: 121–131.
Вебер А. 1926. Теория размещения промышленности. Л.; М.: Книга. 220 с.
Гранберг А.Г. 2000. Основы региональной экономики. М.: ГУ ВШЭ. 495 с.

- Гранберг А.Г. 2009. О программе фундаментальных исследований пространственного развития России. *Регион: экономика и социология*, 2: 166–178.
- Далинчук Н.С. 2010. Теория создания кластеров в промышленности: дис. ... канд. экон. наук. Курск. 202 с.
- Ерзнкян Б.А. 2020. Предприятия и экосистемы: сопоставительный анализ особенностей. *Journal of Economic Regulation*, 11(4): 44–56.
- Зайцев В. 2012. Промышленная экология: учебное пособие. М.: Бином. Лаборатория знаний. 130 с.
- Клейнер Г.Б. 2018. Промышленные экосистемы: взгляд в будущее. *Экономическое возрождение России*, 2 (56): 53–62.
- Клейнер Г.Б. 2019. Экономика экосистем: шаг в будущее. *Экономическое возрождение России*, 1 (59): 40–45.
- Колосовский Н.Н. 1969. Теория экономического районирования. М.: Мысль. 335 с.
- Кржижановский Г.М. 1957. Избранное. М.: Госполитиздат. 570 с.
- Кристаллер В. 2024. Как я пришел к теории центральных мест: рассказ о том, как может возникнуть теория и как в моем случае она возникла. *Городские исследования и практики*, 9(1): 6–14.
- Леш А. 2007. Пространственная организация хозяйства. М.: Наука. 664 с.
- Марков Л.С., Ягольников М.А., Маркова В.М., Теплова И.Г. 2009. Институциональные особенности, модели кластеризации и развитие инновационных мезоэкономических систем. *Регион: экономика и социология*, 3: 3–18.
- Маршалл А. 1993. Принципы экономической науки. М.: Прогресс. 309 с.
- Молчан А.С., Толстых Т.О., Надаенко А.Ю. 2020. Принципы формирования и развития экосистем и их влияние на стратегию промышленного менеджмента. *Экономика устойчивого развития*, 1 (41): 124–128.
- Одум Ю. 1975. Основы экологии. М.: Мир.
- Оуэн Д.Ф. 1984. Что такое экология. М.
- Пивоварова М.А., Бутов А.В. 2015. Кластер как базовая структура инновационной экономики. Кластерные инициативы в формировании прогрессивной структуры национальной экономики – сборник научных трудов Международной научно-практической конференции (19–20 марта 2015 года), 1: 34–38.
- Сукачев В.Н. 1964. Биогеноценоз как выражение взаимодействия живой и неживой природы на поверхности Земли: соотношение понятий «биогеноценоз», «экосистема», «географический ландшафт» и «фация». В кн.: Основы лесной биогеноценологии. М.: Наука: 5–49.
- Титова Н.Ю. 2015. Идентификация промышленных кластеров, среда и факторы их формирования. *Экономика и предпринимательство*, 2 (55): 58–66.
- Титова Н.Ю., Зиглина В.Е. 2021. Различия и сходства понятий «промышленные кластеры» и «промышленные экосистемы». *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика*, 3: 7–16. DOI: 10.24143/2073-5537-2021-3-7-16.
- Толстых Т.О., Агаева А.М. 2020. Экосистемная модель развития предприятий в условиях цифровизации. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*, 1 (33): 37–49. DOI: 10.21685/2227-8486-2020-1-3.
- Толстых Т.О., Шмелева Н.В., Агаева А.М. 2020. Методика оценки уровня зрелости экономической безопасности предприятий в промышленных экосистемах. *Регион: системы, экономика, управление*, 4 (51): 126–143.
- Трофимов О.В., Захаров В.Я., Фролов В.Г. 2019. Экосистемы как способ организации взаимодействия предприятий производственной сферы и сферы услуг в условиях цифровизации. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Социальные науки*, 4 (56): 43–55.
- Тюнен И.-Г. 1926. Изолированное государство. М.: Экономическая жизнь. 326 с.
- Хлынин М.Ю. 2012. Формирование и развитие промышленных кластеров: дис. ... канд. экон. наук. Курск. 234 с.
- Шамлина Г.Г., Гагарин А.И. 2008. Кластеры в экономике России. *Региональная экономика: теория и практика*, 6 (63): 9–16.
- Ackoff R.L. 1994. The Democratic Corporation: a radical prescription for recreating corporate America and rediscovering success. New York: Oxford Univ. Press.
- Christaller W. 1968. Wie ich zu der Theorie der Zentralen Orte gekommen bin. Ein Bericht, wie eine Theorie entstehen kann, und in meinem Fall entstanden ist. *Geographische Zeitschrift*, 56(2): 88–101.
- Fels E.M. 1968. Launhardt, Wilhelm. В кн.: International Encyclopedia of the Social Sciences, vol. 9. D.L. Sills. Macmillan Free Press.



- Freeman R.E. 1984. *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. 1st edition. Boston: Harpercollins College Div.
- Isenberg D. 2014. What an Entrepreneurship Ecosystem Actually Is. *Harvard Business Review*, 5: 1–7.
- Iansiti M., Levien R. 2004. *The Keystone Advantage: What the New Dynamics of Business Ecosystems Mean for Strategy, Innovation, and Sustainability*. Boston: Harvard Business School Press.
- Pinto J.V. 1977. Launhardt and Location Theory: Rediscovery of a Neglected Book. *Journal of Regional Science*, 17(1).
- Moore J.F. 1993. Predators and Prey: A New Ecology of Competition. *Harvard Business Review*, May/June: 75–86.
- Porter M. 1998. Clusters and the new economics competition. *Harvard Business Review*, November–December: 78–90.
- Porter M.E. 2008. *On Competition*. Updated and Expanded Ed. Boston: Harvard Business School Publishing.
- Tansley A.G. 1935. The Use and Abuse of Vegetational Terms and Concepts. *Ecology*, 16(3): 284–307.

References

- Alexandrov I.G. 1921. *Ekonomicheskoye rayonirovaniye Rossii* [Economic zoning of Russia]. M.: III Internatsionala. 15 s.
- Bandman M.K. 2014. *Izbrannyye trudy i prodolzheniye* [Selected works and continuation]. Novosibirsk: IEOPP SO RAN. 447 s.
- Biryukov A.V. 2009. Klasternaya politika kak faktor povysheniya konkurentosposobnosti predpriyatiy oboronykh otrasley promyshlennosti [Cluster policy as a factor in improving the competitiveness of enterprises in the defense industry]. *Mikroekonomika* [Microeconomics], 5: 70–75.
- Boush G.D. 2010. Tipologizatsiya, identifikatsiya i diagnostika klasstrov predpriyatiy: novyy metodologicheskii podkhod [Typologization, identification and diagnostics of enterprise clusters: a new methodological approach]. *Voprosy ekonomiki* [Economic Issues], 3: 121–131.
- Veber A. 1926. *Teoriya razmeshcheniya promyshlennosti* [Theory of the location of industries]. L.; M.: Kniga. 220 s.
- Granberg A.G. 2000. *Osnovy regional'noy ekonomiki* [Fundamentals of regional economics]. M.: GU VShE. 495 s.
- Granberg A.G. 2009. O programme fundamental'nykh issledovaniy prostranstvennogo razvitiya Rossii [On the program of fundamental research on the spatial development of Russia]. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 2: 166–178.
- Dalinchuk N.S. 2010. *Teoriya sozdaniya klasstrov v promyshlennosti* [Theory of creating clusters in industry]: dis. ... kand. ekon. nauk. Kursk. 202 s.
- Erznkyan B.A. 2020. Predpriyatiya i ekosistemy: sopostavitel'nyy analiz osobennostey [Enterprises and ecosystems: a comparative analysis of features]. *Journal of Economic Regulation*, 11(4): 44–56. DOI: 10.29141/2073-1019-2020-11-4-3
- Zaytsev V. 2012. *Promyshlennaya ekologiya: uchebnoye posobiye* [Industrial ecology: a textbook]. M.: Binom. Laboratoriya znaniy. 130 s.
- Kleyner G.B. 2018. Promyshlennyye ekosistemy: vzglyad v budushcheye [Industrial ecosystems: a look into the future]. *Ekonomicheskoye vozrozhdeniye Rossii* [Economic Revival of Russia], 2 (56): 53–62.
- Kleyner G.B. 2019. Ekonomika ekosistem: shag v budushcheye [Economics of ecosystems: a step into the future]. *Ekonomicheskoye vozrozhdeniye Rossii* [Economic Revival of Russia], 1 (59): 40–45.
- Kolosovskiy N.N. 1969. *Teoriya ekonomicheskogo rayonirovaniya* [Theory of economic zoning]. M.: Mysl'. 335 s.
- Krzhyzhanovskiy G.M. 1957. *Izbrannoye* [Selected works]. M.: Gospolitizdat. 570 s.
- Christaller W. 2024. Kak ya prishel k teorii tsentral'nykh mest: rasskaz o tom, kak mozhet vozniknut' teoriya i kak v moyem sluchaye ona voznikla [How I came to the theory of central places: a story about how a theory can arise and how it arose in my case]. *Gorodskiy issledovaniya i praktiki* [Urban Studies and Practices], 9(1): 6–14.
- Lösch A. 2007. *Prostranstvennaya organizatsiya khozyaystva* [The spatial organization of the economy]. M.: Nauka. 664 s.
- Markov L.S., Yagol'nitsa M.A., Markova V.M., Teplova I.G. 2009. *Institutsional'nyye osobennosti, modeli klasterizatsii i razvitiye innovatsionnyy mezoekonomicheskikh sistem* [Institutional features, clustering

- models and development of innovative meso-economic systems]. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 3: 3–18.
- Marshall A. 1993. Printsipy ekonomicheskoy nauki [Principles of Economics]. M.: Progress. 309 s.
- Molchan A.S., Tolstykh T.O., Nadayenko A.Yu. 2020. Printsipy formirovaniya i razvitiya ekosistem i ikh vliyaniye na strategiyu promyshlennogo menedzhmenta [Principles of formation and development of ecosystems and their impact on industrial management strategy]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of Sustainable Development], 1 (41): 124–128.
- Odum Y. 1975. Osnovy ekologii [Fundamentals of Ecology]. M.: Mir.
- Owen D.F. 1984. Chto takoye ekologiya [What is ecology]. M.
- Pivovarova M.A., Butov A.V. 2015. Klasster kak bazovaya struktura innovatsionnoy ekonomiki [Cluster as a basic structure of the innovation economy]. *Klasternyye initsiativy v formirovanii progressivnoy struktury natsional'noy ekonomiki – sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (19-20 marta 2015 goda)* [Cluster initiatives in the formation of a progressive structure of the national economy - collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference (March 19-20, 2015)], 1: 34–38.
- Sukachev V.N. 1964. Biogeotsenoz kak vyrazheniye vzaimodeystviya zhivoy i nezhyvoy prirody na poverkhnosti Zemli: sootnosheniye ponyatiy «biogeotsenoz», «ekosistema», «geograficheskiy landsht» i «fatsiya» [Biogeocenosis as an expression of the interaction of living and inanimate nature on the Earth's surface: the relationship between the concepts of "biogeocenosis", "ecosystem", "geographical landscape" and "facies"]. In: *Osnovy lesnoy biogeotsenologii* [Fundamentals of forest biogeocenology]. M.: Nauka: 5–49.
- Titova N.Yu. 2015. Identifikatsiya promyshlennykh klasstеров, sreda i faktory ikh formirovaniya [Identification of industrial clusters, environment and factors of their formation]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship], 2 (55): 58–66.
- Titova N.Yu., Ziglina V.E. 2021. Razlichiya i skhodstva ponyatiy «promyshlennyye klasstery» i «promyshlennyye ekosistemy» [Differences and similarities between the concepts of "industrial clusters" and "industrial ecosystems"]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics], 3: 7–16. DOI: 10.24143/2073-5537-2021-3-7-16.
- Tolstykh T.O., Agayeva A.M. 2020. Ekosistemnaya model' razvitiya predpriyatiy v usloviyakh tsifrovizatsii [Ecosystem model of enterprise development in the context of digitalization]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society], 1 (33): 37–49. DOI: 10.21685/2227-8486-2020-1-3.
- Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Agayeva A.M. 2020. Metodika otsenki urovnya zrelosti ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiy v promyshlennykh ekosistemakh [Methodology for assessing the maturity level of economic security of enterprises in industrial ecosystems]. *Region: sistemy, ekonomika, upravleniye* [Region: Systems, Economics, Management], 4 (51): 126–143.
- Trofimov O.V., Zakharov V.Ya., Frolov V.G. 2019. Ekosistemy kak sposob organizatsii vzaimodeystviya predpriyatiy proizvodstvennoy sfery i sfery uslug v usloviyakh tsifrovizatsii [Ecosystems as a way of organizing interaction between enterprises in the production sphere and the service sector in the context of digitalization]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Seriya: Sotsial'nyye nauki* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. Series: Social Sciences], 4 (56): 43–55.
- Thünen I.-G. 1926. Izolirovannoye gosudarstvo [The Isolated State]. M.: Ekonomicheskaya zhizn'. 326 s.
- Khlynin M.Yu. 2012. Formirovaniye i razvitiye promyshlennykh klasstеров [Formation and development of industrial clusters]: dis. ... kand. ekon. nauk. Kursk. 234 s.
- Shamlina G.G., Gagarin A.I. 2008. Klasstery v ekonomike Rossii [Clusters in the Russian economy]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika* [Regional Economics: Theory and Practice], 6 (63): 9–16.
- Ackoff R.L. 1994. The Democratic Corporation: a radical prescription for recreating corporate America and rediscovering success. New York: Oxford Univ. Press.
- Christaller W. 1968. Wie ich zu der Theorie der Zentralen Orte gekommen bin. Ein Bericht, wie eine Theorie entstehen kann, und in meinem Fall entstanden ist. *Geographische Zeitschrift*, 56(2): 88–101.
- Fels E.M. 1968. Launhardt, Wilhelm. In: *International Encyclopedia of the Social Sciences*, vol. 9. D.L. Sills. Macmillan Free Press.
- Freeman R.E. 1984. Strategic Management: A Stakeholder Approach. 1st edition. Boston: Harpercollins College Div.



- Isenberg D. 2014. What an Entrepreneurship Ecosystem Actually Is. *Harvard Business Review*, 5: 1–7.
- Iansiti M., Levien R. 2004. The Keystone Advantage: What the New Dynamics of Business Ecosystems Mean for Strategy, Innovation, and Sustainability. Boston: Harvard Business School Press.
- Pinto J.V. 1977. Launhardt and Location Theory: Rediscovery of a Neglected Book. *Journal of Regional Science*, 17(1).
- Moore J.F. 1993. Predators and Prey: A New Ecology of Competition. *Harvard Business Review*, May/June: 75–86.
- Porter M. 1998. Clusters and the new economics competition. *Harvard Business Review*, November–December: 78–90.
- Porter M.E. 2008. On Competition. Updated and Expanded Ed. Boston: Harvard Business School Publishing.
- Tansley A.G. 1935. The Use and Abuse of Vegetational Terms and Concepts. *Ecology*, 16(3): 284–307.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 02.06.2025

Received June 02, 2025

Поступила после рецензирования 10.07.2025

Revised July 10, 2025

Принята к публикации 20.07.2025

Accepted July 20, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пашенцев Владимир Дмитриевич, аспирант кафедры стратегического управления, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Vladimir D. Pashentsev, postgraduate student of the Department of Strategic Management, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Старикова Мария Сергеевна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры стратегического управления, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Maria S. Starikova, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Strategic Management, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia



УДК 332.133.6
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-579-592
EDN КЕНОЕО

Особенности развития и поддержки малого предпринимательства в Республике Крым

Романюк Е.В.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Институт экономики и управления
Россия, 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Вернадского, д. 4
rommania@rambler.ru

Аннотация. В современных динамических условиях развития экономики состояние и перспективы развития малого предпринимательства в регионе представляют особую актуальность. В статье проведен анализ основных количественных показателей деятельности малых предприятий и предпринимателей Крымского региона. Рассмотрены основные тенденции развития предпринимательства с учётом специфики региона. Выявлены характерные особенности региона, а также востребованные и менее привлекательные виды экономической деятельности для субъектов малого предпринимательства. Рассматриваются применяемые меры государственной поддержки, которые ориентированы на рост показателей малых предприятий. С помощью SWOT-анализа определены проблемные сегменты и выделены тенденции развития малого предпринимательства в регионе. По результатам исследования, на основании выявленных проблем, препятствующих развитию предпринимательства в Крыму, предложены рекомендации, направленные на увеличение предпринимательских структур и повышение их деловой активности.

Ключевые слова: малые предприятия, малое предпринимательство, государственное регулирование, субъекты предпринимательства, государственное финансирование, предпринимательская деятельность

Для цитирования: Романюк Е.В. 2025. Особенности развития и поддержки малого предпринимательства в Республике Крым. *Экономика. Информатика*, 52(3): 579–592. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-579-592. EDN КЕНОЕО

Features of Development and Support of Small Business in the Republic of Crimea

Elena V. Romanyuk

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Economics and Management
4 Vernadsky Ave., Simferopol 295007, Republic of Crimea, Russia
rommania@rambler.ru

Abstract. In the modern dynamic conditions of economic development, the state and prospects for the growth of small business in the region are of particular relevance. The article analyzes the main quantitative indicators of the activities of small enterprises and entrepreneurs of the Crimean region. The author explores the main trends in the development of entrepreneurship, taking into account regional specificities. The study reveals characteristic features of the region, as well as types of economic activity that are popular or less attractive for small businesses. Measures of state support aimed at increasing the performance of small enterprises, are considered. Using SWOT analysis, the author identifies problem segments and highlights trends in small entrepreneurship development in the region. Based on the revealed problems that hinder the development of entrepreneurship in Crimea, the study findings allow drawing recommendations aimed at increasing entrepreneurial entities and boosting their business activity.



Keywords: small businesses, small entrepreneurship, government regulation, business entities, government financing, entrepreneurial activity

For citation: Romanyuk E.V. 2025. Features of Development and Support of Small Business in the Republic of Crimea. *Economics. Information technologies*, 52(3): 579–592 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-579-592. EDN KEHOEO

Введение

В современных экономических трансформационных условиях развитие предпринимательства является важным социально-экономическим процессом. Малое предпринимательство играет главную роль в любом государстве и постоянно нуждается в государственном регулировании, стимулировании и поддержке. Субъекты предпринимательской деятельности при реализации социально значимой функции в контексте предпринимательской деятельности содействуют в проблемах трудоустройства безработных граждан с помощью организации и создания новых постоянных и временных рабочих мест. Предпринимательские структуры также выполняют экономическую функцию, обеспечивая материальное благополучие граждан, участвуя в увеличении объёмов производства и конкурентоспособности региона. Кроме этого, фирмы и предприниматели осуществляют инновационную функцию благодаря различным новаторским разработкам, выпуску инновационной продукции или товаров.

Республика Крым является одним из достаточно новых и перспективных регионов, который вошёл в 2014 г. в Российскую Федерацию. В сложившихся российских условиях поменялась концепция и порядок ведения бизнеса, изменилось действующее законодательство. Многим предпринимателям приходилось закрывать свой действующий бизнес и перерегистрировать или открывать новый в связи с тем, что им было необходимо организовывать и налаживать партнёрские отношения с бизнес-средой из других регионов Российской Федерации. Процесс становления, адаптации предпринимательства в регионе занял несколько лет и до сих пор находится в стадии развития. Новые преобразования в регионе привели к трансформации предпринимательской деятельности. Трансформационные преобразования коснулись также и регулирующих государственных органов. Со стороны компетентных государственных органов управления проводилась активная государственная политика, направленная на регулирование и стимулирование малого бизнеса для создания благоприятного климата и финансовой помощи предпринимательским структурам в новых экономических условиях. Исследованию малого предпринимательства в Крымском регионе посвящены работы многих ученых и экономистов, среди которых можно отметить: Адаманову З.О. [Адаманова, Ильясов, 2018], Ахтемову А.Р. [Ахтемова, 2024], Горовец Н.А. [Горовец, 2016], Ильясова Р.И. [Ильясов, 2017.], Майданевич Ю.П. [Майданевич, 2020], Мартынову А.М. [Мартынова, 2023], Охрименко А.В. [Охрименко, 2023], Смерницкую Е.В. [Смерницкая, 2020], Челпанову М.М. [Челпанова, 2021] и др. Но учеными недостаточно исследовано развитие и проблемные сегменты малого бизнеса в регионе, поэтому своевременным является рассмотреть его состояние и государственное регулирование.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступает сфера малого предпринимательства в Республике Крым. Предметом исследования выступают ключевые количественные показатели деятельности малых предприятий и предпринимателей в регионе. Целью статьи является исследование состояния, тенденций развития малого предпринимательства и его поддержки в Республике Крым.

Задачи исследования: провести анализ основных количественных показателей, характеризующих деятельность малых предприятий и предпринимателей в Крымском регионе; показать приоритетные сферы экономики развития малого предпринимательства в

регионе; выявить проблемы предпринимательства в Крыму; рассмотреть действующую поддержку малого предпринимательства в регионе со стороны государственных органов управления и власти; разработать мероприятия, направленные на преодоление сформировавшихся проблем и на дальнейшую активизацию развития малого предпринимательства в Крыму.

При выполнении работы применялись: методы анализа динамики основных показателей деятельности малых предприятий и предпринимателей Крыма, позволяющие определить тенденции ее развития на современном этапе; SWOT-анализ современного состояния и развития предпринимательской деятельности в Республике Крым, а также методы наблюдения, систематизации, обобщения к выявлению актуальных проблем, препятствующих развитию предпринимательства в Крыму; анализ, применяемый для исследования инструментов поддержки малого предпринимательства; метод научного обоснования и системный подход для разработки рекомендательных мер, ориентированных на повышение эффективности развития малого предпринимательства.

Информационную базу исследования составили данные Управления федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю, статистическая отчетность, информационно-аналитические материалы ГКУ Государственного центра занятости Республики Крым, научные исследования и работы ученых и экономистов.

Научная и практическая значимость исследования заключается в выявлении проблемных сегментов развития малого предпринимательства и разработке мер по активизации и повышению эффективности предпринимательской деятельности в Крымском регионе, которые могут быть полезны в работе компетентным специалистам в этой области.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время предпринимательство выступает необходимой составляющей любой хозяйствующей системы, без которой не может развиваться государство в целом и его регионы в частности. Малое предпринимательство выполняет важную роль в развитии экономики региона, содействует росту конкуренции на рынках, стимулирует инновационные технологии, способствует усилению социальной структуры общества. Функционирование предпринимательских структур содействует трудоустройству безработных граждан и росту занятости населения. Трудовая деятельность работников на малых предприятиях способствует улучшению их уровня жизни и социальной защищенности. Вместе с тем малое предпринимательство является одним из ключевых элементов рыночной экономики, способствует развитию конкурентной рыночной среды и созданию новых постоянных и временных рабочих мест. Малое предпринимательство предоставляет возможность гражданам заниматься трудовой деятельностью по совместительству или по договорам гражданско-правового характера [Корницкая, 2019; Ольховая, 2020].

Крым наделен богатым природно-ресурсным, интеллектуальным и трудовым потенциалом. Регион является очень перспективным с позиции развития предпринимательской деятельности, в том числе малого предпринимательства, о чем свидетельствуют данные официальной государственной статистики. В 2024 году по данным статистики в Крыму более 83 тыс. малых и средних хозяйствующих субъектов составляют около 86 % от доли всех налогоплательщиков. Доля малых и средних хозяйствующих субъектов в валовом региональном продукте республики составляет около 35 %, тогда как в 2023 году их доля составляла 32,5 %.

Для проведения полного анализа рассмотрены показатели деятельности малых предприятий в Республике Крым. Так, динамика основных количественных показателей деятельности предприятий малого бизнеса в регионе показана в табл. 1.

В табл. 2 проведен анализ структурных изменений основных количественных показателей деятельности предприятий малого бизнеса в Республике Крым за 2020–2024 гг.



Таблица 1
Table 1

Динамика основных количественных показателей деятельности предприятий малого бизнеса
 в Крыму (без микропредприятий) за 2020–2024 гг.
 Dynamics of the main quantitative indicators of small business enterprises in Crimea
 (excluding microenterprises) for 2020–2024

№ п/п	Показатели	Года				
		2020	2021	2022	2023	2024
1	Средняя численность сотрудников, чел.	41294	41853	42066	42579	42683
2	Оборот организации, тыс. руб.	124251386,7	152825929,6	179457749,4	199607270,1	249796487,4
3	Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами (без НДС и акциза), тыс. руб.	59631108,4	76777868,0	89172858,1	97666973,0	131395736,5
4	Продано товаров неособственного производства (без НДС, акцизов и аналогичных обязательных платежей), тыс. руб.	64620278,3	76048061,6	90284891,3	101940297,1	118400750,9

Таблица 2
Table 2

Анализ основных количественных показателей деятельности предприятий малого бизнеса
 в Крыму (без микропредприятий) за 2020–2024 гг.
 Analysis of the main quantitative indicators of small business enterprises in Crimea
 (excluding microenterprises) for 2020–2024

№ п/п	Показатели	Абсолютные отклонения, ед. изм.		Относительные отклонения, %	
		2024 г. к 2020 г.	2024 г. к 2023 г.	2024 г. к 2020 г.	2024 г. к 2023 г.
1	Средняя численность сотрудников, чел.	+1389	+104	+3,36	+0,24
2	Оборот организации, тыс. руб.	+125545100,7	+50189217,3	+101,04	+25,14
3	Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами (без НДС и акциза), тыс. руб.	+71764628,1	+33728763,5	+120,35	+34,53
4	Продано товаров неособственного производства (без НДС, акцизов и аналогичных обязательных платежей), тыс. руб.	+53780472,6	+16460453,8	+83,23	+16,15

На основании проведенного анализа основных количественных показателей деятельности малых предприятий в Республике Крым за 2020–2024 гг. можно сделать вывод, что прослеживается положительная тенденция по всем данным индикаторам. Так, при сравнении 2024 г. с 2023 г. средняя численность работников увеличилась на 104 чел. или на 0,24 % и составила 42683 чел. Важным показателем, который характеризует деятельность предприятий, является их оборот, свидетельствующий о значительном вкладе предпринимательского сектора в общий объем производства и оборота товаров и услуг в регионе. Также оборот показывает роль малых предприятий в экономике региона и решение социальных проблем. Оборот при сравнении 2024 г. с 2023 г. увеличился на 50189217,3 тыс. руб. или на 25,14 % и составил 249796487,4 тыс. руб. При сопоставлении показателя «Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами» зафиксировано, что при сравнении 2024 г. с 2023 г. данный показатель вырос на 33728763,5 тыс. руб. или на 34,53 % и составил, соответственно, 131395736,5 тыс. руб. Показатель, характеризующий продажу товаров несобственного производства, за сравниваемый период также увеличился на 16460453,8 тыс. руб. или на 16,15 % и имеет значение 118400750,9 тыс. руб. Обратим внимание, что при сравнении 2024 г. с 2020 г. все рассматриваемые показатели показывают положительную динамику со значительным темпом роста.

Итак, количество малых предприятий в регионе увеличилось за рассматриваемый период, а также увеличился их оборот. Темпы роста малого предпринимательства в регионе показывают его достаточный внутренний потенциал. Малое предпринимательство является сектором экономики, который создает резерв по количеству создаваемых рабочих мест и объему выпускаемой и реализуемой продукции.

Согласно статистическим данным в регионе за последние пять лет наметилась тенденция стабильного роста количественных показателей предпринимательских структур, что свидетельствует также и об активности граждан в организации малого бизнеса.

Далее в работе рассмотрим основные показатели деятельности индивидуальных предпринимателей за 2021–2024 гг. в Крымском регионе (табл. 3).

Таблица 3
Table 3

Количественные показатели деятельности индивидуальных предпринимателей
за 2021–2024 гг. в Крыму
Quantitative indicators of the activity of individual entrepreneurs for 2021–2024 in Crimea

№ п/п	Показатели	Года			
		2021	2022	2023	2024
1	Численность граждан, занятых предпринимательской деятельностью, всего, чел.	126740	120306	116389	119921
2	Количество действующих индивидуальных предпринимателей в регионе, чел.	50163	48634	44164	48085
3	Объём выручки (с учётом налогов и аналогичных обязательных платежей) от продажи товаров, продукции, работ услуг по всем видам деятельности, всего, тыс. руб.	289982262,8	319294876,3	352071774,7	442061410,3

Данные проведенного анализа демонстрируют также положительную динамику основных показателей деятельности индивидуальных предпринимателей за рассматриваемый период в регионе (табл. 4). Количество граждан, занятых трудовой деятельностью у индивидуальных предпринимателей в 2024 г. по сравнению с 2023 г. увеличилось на 3532 чел. или на 3,03 % и составило 119921 чел. Количество потенциально функционирующих



индивидуальных предпринимателей в 2024 г. по сравнению с 2023 г. также увеличилось на 3921 чел. или на 8,88 % и составило 48085 чел. Объем выручки за рассматриваемый период также повысился на 89989635,6 тыс. руб. или на 25,56 % и составил 442061410,3 тыс. руб.

Таблица 4
Table 4

Анализ основных показателей деятельности индивидуальных предпринимателей
 за 2021–2024 гг. в Крыму
 Analysis of the main performance indicators of individual entrepreneurs
 for 2021–2024 in Crimea

№ п/п	Показатели	Абсолютные отклонения, ед. изм.		Относительные отклонения, %	
		2024 г. к 2021 г.	2024 г. к 2023 г.	2024 г. к 2021 г.	2024 г. к 2023 г.
1	Численность занятых в сфере индивидуальной предпринимательской деятельности, всего, чел.	-6819	+3532	-5,38	-3,03
2	Численность фактически действующих индивидуальных предпринимателей, чел.	-2078	+3921	-11,96	-8,88
3	Объем выручки (с учетом налогов и аналогичных обязательных платежей) от продажи товаров, продукции, работ услуг по всем видам деятельности, всего, тыс. руб.	+152079147,5	+89989635,6	+52,44	+25,56 %

При сравнении 2024 г. с 2021 г. можно отметить, что численность занятых в сфере индивидуальной предпринимательской деятельности снизилась приблизительно на 5 чел. или 3 %. Также снижен показатель «Численность фактически действующих индивидуальных предпринимателей» приблизительно на 11 чел. или 8,88 %. Положительной динамикой характеризуется показатель объема выручки, который увеличился на 52,44 % в 2024 г. по сравнению с 2021 г.

В исследовании осуществим анализ количества работников, которые заняты в различных сферах экономической деятельности за период 2020–2024 гг. в Республике Крым (табл. 5).

По данным табл. 5 прослеживается, что удельный вес численности работников от общего количества работников на малых предприятиях в торговой и ремонтной сфере составляет наибольшее значение – 20,92 %, затем следует обрабатывающее производство – 16,5 %, за ним – сельское, лесное хозяйство и охота – 10,23 %. Если рассматривать удельный вес средней численности работников, занятых трудовой деятельностью у индивидуальных предпринимателей, то наблюдается следующее: наибольшее количество работников заняты в торговой и ремонтной сфере – 48,44 %, в деятельности гостиниц и предприятий общественного питания – 11,26 %, в строительстве – 5,35 %. Кроме выделенных сфер экономики, отметим, что такие отрасли, как строительство, услуги и информационные технологии активно развиваются в Республике Крым.

Обратим внимание на то, что в регионе происходит рост заработных плат на малых предприятиях, о чём свидетельствуют официальные статистические данные. Так, по статистическим данным в 2024 г. среднемесячная заработная плата, начисленная работникам малых предприятий, составила 54379,9 руб., что на 11065,2 руб. или на 25,55 % больше, чем в 2023 г. (данный показатель составил 43314,7 руб.). Вышеуказанные статистические данные

свидетельствуют о благоприятном деловом климате и комфортных условиях, которые создаются государственными и местными компетентными органами власти для развития предпринимательства в регионе.

Таблица 5
Table 5

Средняя численность работников, занятых в малом предпринимательстве
(без микропредприятий), и индивидуальных предпринимателей, занятых в разрезе сфер
экономической деятельности в 2024 г. в Крыму

The average number of employees in small businesses (excluding microenterprises)
and individual entrepreneurs employed in the context of economic activity in Crimea in 2024

№ п/п	Средняя численность работников, всего чел., в т. ч.	Малые предприятия		Индивидуальные предприниматели	
		количество, чел.	удельный вес численности работников от общего количества, %	количество, чел.	удельный вес численности работников от общего количества, %
		42683	100	119921	100
1	сельское, лесное хозяйство, охота	4366	10,23	5482	4,57
2	добыча полезных ископаемых	767	1,8	-	-
3	обрабатывающие производства	7164	16,5	5725	4,77
4	обеспечение электрической энергией, газом и паром	205	0,5	39	0,03
5	водоснабжение; водоотведение	72	0,17	192	0,16
6	строительство	3705	8,68	6419	5,35
7	торговля оптовая и розничная, ремонт	8931	20,92	58089	48,44
8	транспортировка и хранение	2858	6,7	6113	5,1
9	туризм и услуги предприятий общественного питания	3112	7,29	13504	11,26
10	информация и связь	1805	4,23	1918	1,6
11	финансовая деятельность и страхование	185	0,43	244	0,2
12	операции с недвижимым имуществом	2476	5,8	6379	5,32
13	профессиональная, научная и техническая деятельность	1297	3,04	4779	3,99
14	административная деятельность	2505	5,87	2963	2,47
15	образование	376	0,88	1428	1,19
16	здравоохранение и социальные услуги	2342	5,49	1255	1,05
17	культура, спорт, организация досуга и развлечений	373	0,87	1389	1,16
18	другие различные услуги	125	0,29	3985	3,32

Анализируя вышеуказанные показатели, можно отметить, что они имеют стойкую тенденцию к росту. Это свидетельствует не только об активной предпринимательской деятельности со стороны граждан, но и постоянной государственной поддержке. По мнению Крыловой М.В., главной составляющей эффективного функционирования малого предпринимательства является его поддержка, которая значительно воздействует на социальное и экономическое развитие региона [Крылова, 2014].



В настоящее время поддержку и активизацию предпринимательских инициатив оказывает ГКУ Центр занятости населения. На центр занятости возложена задача предоставлять государственные услуги, направленные на оказание помощи в получении статуса самозанятого, открытии своего бизнеса, а также информационные и консультационные услуги. Специалисты центра занятости оказывают помощь безработным, желающим открыть собственное дело, а также при потребности будущего претендента-предпринимателя они могут оказать профессиональную подготовку или переподготовку безработных граждан с учётом современного состояния рынка труда и занятости населения, потребностей экономики, а также спроса работодателей на востребованные профессии [Жерновкова, 2019].

Кроме этого, центр занятости на протяжении многих лет реализует программу поддержки начинающих предпринимателей. Государственная субсидия на открытие бизнеса является безвозмездной финансовой помощью для начинающих предпринимателей. Субсидия предоставляется из средств государственного или регионального бюджетов. Одной из форм государственной поддержки для открытия бизнеса является единоразовая денежная компенсация в размере 58800 руб., которую выплачивает центр занятости. Отметим, что ранее можно было получить субсидию на создание или развитие предпринимательства при условии, если государственная комиссия одобрит и утвердит бизнес-план будущего предпринимателя. В настоящее время субсидия на открытие своего дела для начинающего предпринимателя очень сократилась в размере в связи с отсутствием или недостаточностью денежных средств, поэтому центр занятости может ему компенсировать только лишь расходы, которые понёс индивидуальный предприниматель за регистрацию предпринимательства или общества с ограниченной ответственностью.

По предоставленным данным центра занятости в 2024 г. в регионе его специалистами оказаны следующие государственные услуги:

- 295 гражданам оказана денежная компенсация по открытию своего дела;
- 1896 безработным гражданам была оказана психологическая поддержка специалистами службы;
- 2186 безработным гражданам оказаны услуги по социальной адаптации на рынке труда;
- 2135 безработных граждан получили информирование о положении состояния рынка труда и сферы занятости;
- 57 безработных граждан получили профессиональное и дополнительное обучение.

Для поддержки малого бизнеса в Республике Крым существуют такие институты как: Фонд поддержки предпринимателей, Крымский гарантийный фонд поддержки предпринимательства и Крымский республиканский фонд микрофинансирования предпринимательства. Данные фонды предоставляют финансовую помощь начинающим предпринимателям. Сегодня многие предприниматели стремятся реализовать свои бизнес-проекты, но сталкиваются с ограничениями в получении финансовых средств и долгим продвижением бизнес-проектов [Каджаметова, Ахтемова, 2021].

В 2024 г. Крымский гарантийный фонд стал одним из главных институтов для развития малого бизнеса в регионе. Благодаря средствам фонда предприниматели получили 174,2 млн руб. с помощью льготных микрозаймов. Финансовые средства на льготных условиях предоставляются через Фонд микрофинансирования предпринимательства Республики Крым, который играет важную роль в поддержке малого бизнеса. Гараптийный фонд создан в качестве поручителя, благодаря которому снижаются риски для кредиторов, и который способствует более активному кредитованию. В условиях экономической нестабильности и антироссийских санкций многие местные предприниматели оказались в сложной ситуации, т. к. традиционные источники финансирования стали недоступны. В связи с этим были разработаны программы поддержки, направленные на восстановление и развитие экономики региона.

На поддержку предпринимательских инициатив в регионе напpавлен национальный проект «Малое и среднее предпринимательство и поддержка индивидуальной

предпринимательской инициативы». Данный проект ориентирован на поддержку предпринимательства на всех его стадиях: начиная от ключевой бизнес-идеи до увеличения его объёмов и предоставления продукции предприятия на экспорт. Отметим, что национальные проекты в стране реализуются по решению Президента Российской Федерации Путина В.В. с 2019 г. В регионе реализуется программа поддержки бизнеса благодаря национальному проекту «Малое и среднее предпринимательство». Программа предусматривает выдачу государством микрозаймов по ставке 1 % годовых. Заемные средства предоставляются предпринимателям в размере от 150 тыс. до 5 млн руб. сроком от 6 до 36 месяцев с процентной ставкой 1 % годовых [Демироглу, 2021; Мещерякова, 2022].

Отметим, что существуют и другие способы поддержки предпринимательских инициатив в регионе. Например, «предлагается программа лояльности платежной системы «Мир», которая предоставляет возможность начинающим и действующим субъектам малого предпринимательства увеличить свой оборот, заинтересовать заказчиков, оптимизировать расходы. Одним из методов поддержки предпринимательской деятельности и активизации инициатив выступает кредитование на льготных условиях. Специалистами банков субъектам предпринимательства предлагается заключить договор по кредитованию с учётом сниженной процентной ставки по сравнению с рыночной ставкой финансирования. Существует ещё один способ поддержки предпринимателей в регионе – это возмещение лизинговых платежей. В этом случае государство в лице уполномоченных органов компенсирует предпринимателю 50 % первоначального взноса за долгосрочную аренду оборудования» [Мезенцева, 2019; Челпанова, 2021].

Однако несмотря на активную поддержку государственных и местных органов управления в оказании финансовой помощи предпринимательским структурам региона, финансовых средств на финансирование некоторых проектов сегодня недостаточно.

Несмотря на положительные тенденции развития малого предпринимательства в регионе, существует ряд проблем, препятствующих его развитию. Так, Злищева М.П., Шишова А.С. в своём исследовании обратили внимание на то, что в предпринимательской сфере имеются сложности в виде несовершенства действующего законодательства. Учёные подчёркивают, что коррупция и развитие сектора теневой экономики отрицательно отражается на формировании и функционировании предпринимательства в регионе. Вместе с тем учёные считают, что на развитие малого бизнеса очень отрицательно влияют санкции, которые препятствуют его развитию, т. к. являются барьером для входа России и ее регионов на международные рынки [Злищева, Шишова, 2024].

Рубцова О.Л. считает, что в настоящее время предпринимателям сложно заниматься планированием стратегической и тактической деятельности, т. к. быстро меняются правила ведения бизнеса, и предприниматель претерпевает различные потери и убытки [Рубцова, 2015].

По мнению Якушева Н.О., в сфере малого предпринимательства существуют следующие проблемы: развитие монополий и сырьевого сектора, высокие затраты по открытию и ведению своего дела, недостаточная подготовка специалистов с необходимыми компетенциями [Якушев, 2021].

С целью систематизации и обобщения проблем в предпринимательской деятельности в Республике Крым, по нашему мнению, необходимо использовать SWOT-анализ, который даст возможность установить не только основные проблемные сегменты данной сферы, но и поможет определить направления развития малых предприятий в Республике Крым (табл. 6).

В результате проведённого нами SWOT-анализа можно установить некоторые основные сложившиеся проблемы, которые являются барьером для развития предпринимательских структур в Крымском регионе в современных динамических и трансформационных условиях: недостаточное финансовое обеспечение; несовершенная нормативно-правовая база; специфика региона, вызванная сезонным характером; непредсказуемые риски; отсутствие постоянной системы профессиональной подготовки кадров; развитие теневой экономики; устаревшая техника и оборудование; негативное воздействие установленных санкций на развитие предпринимательства (рис. 1).



Таблица 6
 Table 6

SWOT-анализ состояния и развития малых предприятий и предпринимательства в Крыму
 SWOT analysis of the state and development of small enterprises and entrepreneurship in Crimea

Сильные стороны	Возможности
– активизация инвестиционной предпринимательской деятельности; – активизация мер государственной поддержки предпринимательства; – наличие благоприятных экономических условий для развития различных направлений предпринимательской деятельности; – трудоустройство безработных граждан с помощью организации новых постоянных и временных рабочих мест; – коррелирование интересов структур малого предпринимательства с интересами институтов государственной и местной власти и управления; – стойкая тенденция роста инициативы и активности предпринимателей.	– формирование конкурентоспособной структуры предпринимательского бизнеса; – развитие партнёрских и деловых отношений предпринимателей и государственных структур; – организация и комплектация созданных постоянных и временных рабочих мест в сфере малого бизнеса; – повышение профессионального уровня персонала; – производство и сбыт продукции высокого качества на внутреннем и мировом рынках; – развитие инвестиционной предпринимательской деятельности в Крыму; – развитие малого предпринимательства в приоритетных видах экономической деятельности региона (сельская, туристическая, рекреация и др.); – внедрение передовых цифровых информационных технологий на предприятиях малого бизнеса.
Слабые стороны	Угрозы
– устаревшая техника и технологии; – сезонный характер региона; – отсутствие системы постоянного повышения квалификации работников; – непредвиденные риски, воздействующие на функционирование предпринимательских структур; – существенное воздействие теневой экономики на выпуск товаров, продукции, оказываемых услуг и работ; – долговременный и сложный процесс продвижения бизнес-проектов; – высокая стоимость аренды объектов недвижимости.	– дестабилизация политической и экономической ситуации в стране; – действие режима наложенных санкций; – снижение спроса заказчиков на произведённые товары, продукцию, оказанные услуги, выполненные работы; – неожиданный рост цен на произведённую продукцию, выполненные услуги и работы; – затруднение сбыта продукции, товаров, а также в оказании работ, выполнении услуг на мировом рынке; – усиление конкуренции со стороны структур крупного и среднего предпринимательства; – высокие налоговые ставки и недостаточные налоговые льготы; – рост процента по кредитам на имущество.

Подводя итоги, уточним, что сегодня предпринимательская деятельность должна быть доступна и интересна всем желающим категориям граждан, в т. ч. молодёжи. Начинаящие предприниматели должны преодолеть страх перед неизвестностью при организации предпринимательского дела, при этом государственные органы управления обязаны оказывать им в этом постоянную поддержку и компетентную помощь. Нами предлагаются следующие мероприятия, которые могли бы реализовывать компетентные государственные органы управления в Крымском регионе, направленные на повышение уровня деловой активности малого бизнеса и увеличение количества малых предприятий и зарегистрированных предпринимателей:

- содействовать в снижении образовавшейся задолженности у малых предприятий и индивидуальных предпринимателей;
- содействовать в увеличении доходов предпринимательских структур малого бизнеса в регионе;
- привлекать молодёжь в реализацию предпринимательских инновационных проектов перспективных сфер экономики, например, таких, как туризм и гостеприимство, сельское хозяйство, торговля, строительство;
- финансировать специальные проекты и программы с целью поддержки предпринимателей в тех отраслях экономики, которые менее привлекательны, но являются перспективными для региона;
- укреплять доверие будущих предпринимателей к государственным органам управления при открытии своего дела;
- при необходимости предоставлять помощь в обеспечении субъектов малого предпринимательства земельными участками в регионе;
- разработать оптимальную систему налоговых льгот для поддержки, стимулирования и развития предпринимательских субъектов в Крымском регионе.

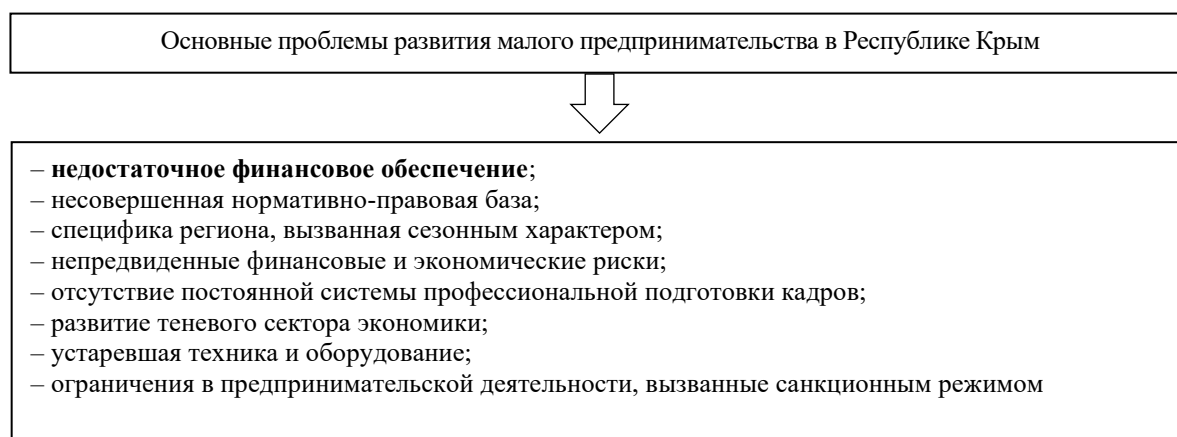


Рис. 1. Основные проблемы развития малого предпринимательства в Республике Крым

Fig. 1. The main problems of small business development in the Republic of Crimea

Заключение

Таким образом, развитие малого предпринимательства – это стратегически значимая задача, для реализации которой государство создает специальные институты, направленные на стимулирование деятельности субъектов предпринимательства. Предпринимательство является необходимым условием успешного развития региона. Благодаря развитию малого предпринимательства повышается конкурентоспособность экономики и разрабатываются инновационные проекты. Малое предпринимательство также способствует достижению социально-экономических целей региона.

На основании проведенного анализа основных количественных показателей деятельности малых предприятий и предпринимателей отмечены положительные тенденции, вызванные повышением этих показателей, свидетельствовавшие об активности граждан в организации предпринимательской деятельности. По данным государственной статистики, в регионе зафиксирован рост численности предпринимательских структур. В исследовании показано, что со стороны государственных и местных органов управления оказывается постоянное содействие и поддержка предпринимательской деятельности малого бизнеса в Крымском регионе. Несмотря на положительные тенденции, в работе выделен ряд сформировавшихся основных проблем, которые замедляют развитие малого предпринимательства: недостаточное государственное

финансирование, несовершенства в законодательной базе, износ основных средств, сезонный характер сфер экономики др. Для преодоления вышеуказанных проблем были предложены мероприятия, которые включают активные меры регулирования и стимулирования малого бизнеса, создадут благоприятный климат для работы с новыми бизнес-идеями, усилят финансовую поддержку, а также позволят сформировать благоприятные условия для осуществления эффективной предпринимательской деятельности в регионе.

Список источников

- Справочные и аналитические материалы: основные показатели деятельности малых предприятий и индивидуальных предпринимателей. Управление федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю: офиц. сайт. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://82.rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 14 августа 2025).
- Справочные и аналитические материалы: статистика центра занятости. ГКУ Государственный центр занятости Республики Крым: офиц. сайт. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://cznrk.ru/?ysclid=mebf51g46r697265485> (дата обращения: 14 августа 2025).

Список литературы

- Адаманова З.О., Ильясов Р.И. 2018. Формирование региональной экосистемы малого предпринимательства в Республике Крым: основы и практические рекомендации. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*, 1(59): 24–30.
- Ахтемова А.Р. 2024. Анализ и прогноз развития малого и среднего предпринимательства в Республике Крым. *Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере*, 4(46): 80–85.
- Горовец Н.А. 2016. Влияние государственной поддержки на развитие малого и среднего предпринимательства в Крыму. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление*, 1: 26–34.
- Демироглу Н.Б. 2021. Молодежное предпринимательство и его потенциал в развитии экономики. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*, 4(74): 71–75.
- Жерновкова О.В. 2019. Особенности управления предприятиями малого бизнеса в современных условиях. *Форум молодых ученых*, 3(31): 375–380.
- Злищева М.П., Шишова А.С. 2024. Проблемы и перспективы развития малого и среднего предпринимательства (на примере Республики Крым). Материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 10-летней годовщины воссоединения Крыма с Российской Федерацией. Симферополь, ФГБОУВО РГУП: 1239–1245.
- Ильясов Р.И. 2017. Новые подходы в развитии инновационной деятельности малого бизнеса в Республике Крым. *Казанский экономический вестник*, 2(28): 92–100.
- Каджаметова Т.Н., Ахтемова А.Р. 2021. Приоритетные направления развития малого и среднего предпринимательства Республики Крым. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*, 2(72): 105–109.
- Каджаметова Т.Н., Ахтемова А.Р. 2023. Совершенствование механизма государственного регулирования и поддержка малого предпринимательства в региональной экономической системе. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*, 1(79): 106–110.
- Корницкая Н.М. 2019. Совершенствование системы государственной финансовой поддержки субъектов малого и среднего предпринимательства в Республике Крым. *Экономика и бизнес: теория и практика*, 6-1: 164–169.
- Крылова М.В. 2014. Особенности системы поддержки малого и среднего предпринимательства в США. *Российское предпринимательство*, 21 (267): 24–28.
- Майданевич Ю.П. 2020. Мониторинг региональных программ развития малого бизнеса в Республике Крым. *Экономика и предпринимательство*, 3(116): 305–309.
- Майданевич Ю.П. 2020. Социально-экономический анализ развития малого предпринимательства в Республике Крым. *Экономика и предпринимательство*, 2(115): 317–324.
- Мартынова А.М. 2023. Аспекты развития и поддержки малого предпринимательства в Крыму. *Интерактивная наука*, 4 (80): 89–91.
- Мезенцева Е.В. 2019. Развитие малого бизнеса в сельскохозяйственном секторе Республики Крым в условиях программного управления. *ЦИТИСЭ*, 2(19): 15.

- Мещерякова А.Б. 2022. Перспективы развития социальной политики Республики Крым. *Естественно-гуманитарные исследования*, 42 (4): 169–174.
- Ольховая Г.В. 2020. Социально-экономические результаты деятельности малого бизнеса в Республике Крым. *Экономика строительства и природопользования*, 1 (74): 100–110.
- Охрименко А.В. 2023. Перспективы развития малого и среднего бизнеса на территории новых субъектов Российской Федерации. *Альманах Крыма*, 36: 34–43.
- Петренко А.А. 2022. Меры поддержки малого и среднего предпринимательства в Республике Крым в период covid-19. *Аллея науки*, 1(64): 312–316.
- Полищук Е.В. 2016. Парадигма значимости малого предпринимательства для создания рабочих мест на рынке труда молодежи Республики Крым. *Экономика и предпринимательство*, 12-3(77): 423–430.
- Рубцова О.Л. 2015. Проблемы государственной поддержки российского малого бизнеса. *Российское предпринимательство*, 16 (17): 2697–2706.
- Смерницкая Е.В. 2020. Механизм государственного регулирования и поддержки малого предпринимательства в туристской отрасли Республики Крым. *Экономика и предпринимательство*, 5(118): 466–469.
- Челпанова М.М. 2021. Оценка реализации направлений поддержки малого и среднего предпринимательства в Республике Крым. *Экономика и предпринимательство*, 5(130): 540–545.
- Якушев Н.О. 2021. Особенности развития предпринимательства в России. *Экономический вектор*, 3 (26): 11–16.

References

- Adamanova Z.O., Ilyasov R.I. 2018. Formation of a regional ecosystem of small business in the Republic of Crimea: fundamentals and practical recommendations. *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 1(59): 24–30 (in Russian).
- Akhtemova A.R. 2024. Analysis and forecast of small and medium business development in the Republic of Crimea. *Information and computer technologies in economics, education and social sphere*, 4(46): 80–85 (in Russian).
- Gorovets N.A. 2016. The influence of state support on the development of small and medium business in Crimea. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Economics and management*, 1: 26–34 (in Russian).
- Demiroglu N.B. 2021. Youth entrepreneurship and its potential in economic development. *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 4(74): 71–75 (in Russian).
- Zhernovkova O.V. 2019. Features of small business management in modern conditions. *Forum of young scientists*, 3(31): 375–380 (in Russian).
- Zlischcheva M.P., Shishova A.S. 2024. Problems and prospects for the development of small and medium-sized businesses (on the example of the Republic of Crimea). *Proceedings of the II International scientific and practical conference dedicated to the celebration of the 10th anniversary of the reunification of Crimea with the Russian Federation. Simferopol, FGBOUVO RGUEP*: 1239–1245 (in Russian).
- Ilyasov R.I. 2017. New approaches to the development of innovative activities of small businesses in the Republic of Crimea. *Kazan Economic Bulletin*, 2(28): 92–100 (in Russian).
- Kadzhametova T.N., Akhtemova A.R. 2021. Priority areas for the development of small and medium-sized businesses in the Republic of Crimea. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 2(72): 105–109 (in Russian).
- Kadzhametova T.N., Akhtemova A.R. 2023. Improving the mechanism of state regulation and support for small entrepreneurship in the regional economic system. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 1(79): 106–110 (in Russian).
- Kornitskaya N.M. 2019. Improving the system of state financial support for small and medium-sized businesses in the Republic of Crimea. *Economy and Business: Theory and Practice*, 6-1: 164–169.
- Krylova M.V. 2014. Features of the small and medium-sized business support system in the USA. *Russian Entrepreneurship*, 21 (267): 24–28 (in Russian).
- Maidanovich Yu.P. 2020. Monitoring regional small business development programs in the Republic of Crimea. *Economy and Entrepreneurship*, 3(116): 305–309 (in Russian).
- Maidanovich Yu.P. 2020. Socio-economic analysis of small business development in the Republic of Crimea. *Economy and Entrepreneurship*, 2(115): 317–324 (in Russian).
- Martynova A.M. 2023. Aspects of small business development and support in Crimea. *Interactive Science*, 4 (80): 89–91 (in Russian).



- Mezentseva E.V. 2019. Small business development in the agricultural sector of the Republic of Crimea under program management. *CITISE*, 2(19): 15 (in Russian).
- Meshcheryakova A.B. 2022. Prospects for the development of social policy in the Republic of Crimea. *Natural Sciences and Humanities*, 42 (4): 169–174 (in Russian).
- Olkhovaya G.V. 2020. Socio-economic results of small business activities in the Republic of Crimea. *Construction and Nature Management Economy*, 1 (74): 100–110 (in Russian).
- Okhrimenko A.V. 2023. Prospects for the Development of Small and Medium-Sized Businesses in the Territory of New Subjects of the Russian Federation. *Almanac of Crimea*, 36: 34–43 (in Russian).
- Petrenko A.A. 2022. Measures to Support Small and Medium-Sized Businesses in the Republic of Crimea during the COVID-19 Period. *Alley of Science*, 1 (64): 312–316 (in Russian).
- Polischuk E.V. 2016. The Paradigm of the Importance of Small Entrepreneurship for Creating Jobs in the Youth Labor Market of the Republic of Crimea. *Economy and Entrepreneurship*, 12-3 (77): 423–430 (in Russian).
- Rubtsova O.L. 2015. Problems of State Support for Russian Small Business. *Russian Entrepreneurship*, 16 (17): 2697–2706 (in Russian).
- Smernitskaya E.V. 2020. The mechanism of state regulation and support of small entrepreneurship in the tourism industry of the Republic of Crimea. *Economy and Entrepreneurship*, 5(118): 466–469 (in Russian).
- Chelpanova M.M. 2021. Assessment of the implementation of areas of support for small and medium-sized businesses in the Republic of Crimea. *Economy and Entrepreneurship*, 5(130): 540–545 (in Russian).
- Yakushev N.O. 2021. Features of the development of entrepreneurship in Russia. *Economic vector*, 3 (26): 11–16 (in Russian).

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 15.08.2025

Поступила после рецензирования 29.08.2025

Принята к публикации 01.09.2025

Received August 15, 2025

Revised August 29, 2025

Accepted September 01, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Романюк Елена Витальевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления персоналом Института экономики и управления, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Elena V. Romanyuk, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Personnel Management, Institute of Economics and Management, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

УДК 338.476.3,004.891,332.123.6
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-593-611
EDN KQBFGE

Медицинский туризм в контексте региональной и отраслевой экономики: эволюция публикаций и прогнозирование их цитируемости методами машинного обучения

Тарасенко Э.В.

Финансовый университет при Правительстве РФ
Россия, 129226, г. Москва, ул. Кибальчича, дом 1
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
Россия, 115054, г. Москва, Стремянный переулок, дом 36
evtarasenko@fa.ru, tarasenko.ev@rea.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью понимания динамики научных публикаций и прогнозирования их цитируемости в быстро развивающейся сфере медицинского туризма, являющегося важной отраслью региональной экономики. В настоящем исследовании рассматривается научная эволюция публикаций в динамически меняющейся сфере медицинского и лечебно-оздоровительного туризма. Особое внимание уделено изменениям, происходящим под влиянием технологических инноваций, появлению новых направлений и дестинаций медицинского туризма, а также трансформации поведения международных медицинских туристов. Несмотря на значительный рост выручки от иностранного медицинского туризма (свыше \$700 млн в 2022 году), доля реального медицинского туризма в Российской Федерации составляет всего около 5 %. На основании официального рейтинга Международной ассоциации медицинского туризма (МТИ), в 2020–2021 гг. лучшие направления для медицинского туризма представлены Канадой, Японией, Испанией, Израилем и др. При анализе современных тенденций мирового медицинского туризма в 2024 г. отчетливо проявляется новый вектор развития, связанный с формированием геополитических центров медицинского туризма среди стран БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай, Южная Африка) и региона Глобального Юга. Важнейшими факторами развития медицинского туризма выступают доступность медицинских услуг, наличие цифровых технологий и качественное обслуживание иностранных пациентов. Целью данной работы является исследование эволюции научных публикаций о медицинском туризме и изучение возможности разработки прогностической модели их цитируемости методом машинного обучения. Информационную основу исследования составили данные масштабного массива (датасета), включающего 1535 публикаций из базы Scopus по тематике медицинского туризма за период с 1952 по 2020 гг. В работе использовались методы статистического анализа и технологии машинного обучения, реализуемые средствами языка программирования Python в облачной среде Google Colab. В ходе исследования выявлены ключевые тренды в научных публикациях о медицинском туризме, выделены наиболее важные факторы, определяющие цитируемость, и разработан вариант модели прогнозирования цитируемости публикаций. Результаты могут использоваться для оптимизации стратегии развития медицинского туризма в России, для повышения позиций России как центра медицинского туризма и укрепления роли отечественной науки в международных рейтингах, разработки рекомендаций по повышению качества и видимости отечественных исследований, формирования перечня критериев оценки эффективности научных работ в сфере медицинского туризма. Работа представляет интерес для исследователей, преподавателей, специалистов-практиков и организаторов здравоохранения, занимающихся научно-практическими вопросами в медицине и туризме, в частности, развивающих въездной медицинский и лечебно-оздоровительный туризм в Российской Федерации.

Ключевые слова: лечебно-оздоровительный туризм, медицинский туризм, лечение за границей, импорт медицинских услуг, экономика туризма, экономика здравоохранения, эволюция медицинского туризма, алгоритмы анализа данных, градиентный бустинг, машинное обучение, библиометрический анализ научных публикаций



Для цитирования: Тарасенко Э.В. 2025. Медицинский туризм в контексте региональной и отраслевой экономики: эволюция публикаций и прогнозирование их цитируемости методами машинного обучения. *Экономика. Информатика*, 52(3): 593–611. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-593-611. EDN KQBFGF

Medical Tourism in the Context of Regional and Sectoral Economies: Evolution of Publications and Prediction of their Citation Rates Using Machine Learning Methods

Elvira V. Tarasenko

Financial University under the Government of the Russian Federation
1 Kibalchich St., Moscow 129226, Russia
Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny Ln., Moscow 115054, Russia
evtarasenko@fa.ru, tarasenko.ev@rea.ru

Abstract. The relevance of the study is determined by the need to understand the dynamics of scientific publications and predict their citability in the rapidly developing field of medical tourism, which represents an important sector of regional economy. This research investigates the scientific evolution of publications in the dynamically changing area of health and wellness tourism. Special attention is paid to changes influenced by technological innovations, emergence of new directions and destinations for medical tourism, as well as transformation of behavior among international medical tourists. Despite significant growth of revenue from foreign medical tourism exceeding \$700 million in 2022, actual medical tourism accounts for as little as about 5 % in Russia. Based on the official ranking of the International Medical Tourism Association (MTI), top destinations for medical tourism in 2020–2021 included Canada, Japan, Spain, Israel, etc. Reviewing present-day tendencies in global medical tourism in 2024, a clear new development vector emerges related to geopolitical centers of medical tourism forming within BRICS countries (Brazil, Russia, India, China, South Africa) and Global South region. Key factors driving medical tourism are accessibility of healthcare services, availability of digital technologies, and high-quality service provision for foreign patients. The aim of this work is to investigate the evolution of scientific publications on medical tourism and explore the possibility of creating a predictive model for citation using machine learning methods. The information base of the study consists of data from a large dataset including 1,535 publications from the Scopus database covering the period from 1952 to 2020. Statistical analysis methods and machine learning technologies implemented through the Python programming language in the cloud environment of Google Colab were used. The study made it possible to reveal the key trends in scientific publications on medical tourism, highlight the most important factors determining citations, and develop a version of publication citation prediction model. These results can be utilized to optimize strategies for the development of medical tourism in Russia, enhance its position as a center for medical tourism, strengthen the role of domestic science in international rankings, develop recommendations for improving quality and visibility of Russian studies, and form criteria for evaluating effectiveness of scientific works in the sphere of medical tourism. The study will be useful for researchers, teachers, practitioners, and healthcare organizers involved in interdisciplinary issues in medicine and tourism, particularly those focused on inbound medical and health-and-wellness tourism development in the Russian Federation.

Keywords: wellness tourism, medical tourism, treatment abroad, import of medical services, tourism economy, healthcare economics, evolution of medical tourism, data analysis algorithms, gradient boosting, machine learning, bibliometric analysis of scientific publications

For citation: Tarasenko E.V. 2025. Medical Tourism in the Context of Regional and Sectoral Economies: Evolution of Publications and Prediction of their Citation Rates Using Machine Learning Methods. *Economics. Information technologies*, 52(3): 593–611 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-593-611. EDN KQBFGF

Введение

Медико-реабилитационный туризм выступает в качестве одной из наиболее стремительно развивающихся отраслей региональной экономики, возникающей на пересечении экономической, медицинской и туристской сфер. Данная сфера оказывает позитивное влияние на экономический рост государств, стимулируя развитие инновационных технологий и способствуя формированию положительного международного имиджа принимающих стран посредством привлечения иностранных посетителей с многообразием целей путешествий. С момента появления первых отечественных и зарубежных исследований и публикаций, посвящённых медицинскому и лечебно-оздоровительному туризму, единый понятийный аппарат или терминологический подход к определению данной сферы до сих пор не сформирован. Тем не менее в международной практике традиционно выделяют две основные категории: медицинский туризм (health, medical) и оздоровительный или лечебно-оздоровительный туризм (wellness, spa-tourism, recreational). По мнению некоторых российских ученых медицинский туризм в Российской Федерации является частью лечебно-оздоровительного туризма. Характеристика состояния отрасли российского медицинского туризма включает следующие ключевые индикаторы [Нестеренко, 2021]:

1. Численность медицинских путешественников, прибывших на территорию Российской Федерации с целью прохождения специализированного лечения, а также продолжительность пребывания указанных лиц в медицинских организациях страны, измеренная количеством ночёвок.
2. Общий объём финансовых поступлений, формируемый деятельностью субъектов медицинской индустрии в сфере медицинского туризма.
3. Величина индивидуальных затрат иностранных пациентов, направленных на оплату услуг и товаров в период нахождения в стране.
4. Экономическая эффективность въездного медицинского туризма, выражающаяся через вклад денежных потоков от международных пациентов в развитие экономики принимающего региона.

Медицинский туризм можно также определить как путешествие людей из места своего проживания по любым причинам, связанным со здоровьем, или как процесс выезда за пределы страны постоянного проживания с целью получения медицинских услуг [García-Altés, 2005; Hassan, 2017]. Медицинский туризм также рассматривается как часть «здоровьесберегающего» туризма или как организованные путешествия за пределами обычной среды обитания человека, направленные на восстановление физического и психического благополучия [Carrera, 2006]. Следовательно, кроме оказания медицинских услуг, такой тип туризма уже охватывает такие направления, как профилактика, релаксация или реабилитация, а также индустрия оздоровления и СПА [Klimova, 2020] (рис. 1).

Некоторые исследователи дифференцируют понятия медицинского туризма, медицинского клинического туризма и медицинского курортного туризма исходя из различия в значимости определяющих факторов, составляющих основу классификации [Савельева, 2020].

Отсутствие единообразия в определении медицинского туризма также возникает вследствие разногласий касательно типов медицинских процедур. Нехирургические процедуры, выполняемые за один день, такие как стоматологические или небольшие косметические операции, позволяют медицинским туристам наслаждаться осмотром достопримечательностей после медицинского вмешательства. Напротив, пациент, которому предстоит более серьезное медицинское вмешательство, скорее предпочтёт вернуться домой, нежели заниматься досугом вне страны постоянного проживания или развлекательными мероприятиями [Klimova, 2020]. Медицинский туризм становится глобальной тенденцией, формируя многомиллиардную индустрию, занимающую при этом весьма ограниченное место в структуре туристского сектора. При этом за последние десять лет научный интерес к медицинскому туризму претерпел значительную трансформацию: если ранее основное внимание уделялось изучению самой сущности и функций медицинского туризма, то теперь

акценты смещены в том числе и на исследование потенциальных негативных эффектов, таких как экономические риски для принимающих стран, необходимость правового регулирования и гуманитарные аспекты, вызванные дефицитом доступной первичной медицинской помощи в развивающихся государствах [Crush, Chicanda, 2014]. Успех туристических направлений на мировых рынках зависит от их относительной конкурентоспособности [Enright, Newton, 2004]. Исследовательский интерес переместился с глобальных проблем медицинского туризма, развитие которого частично было вызвано процессами глобализации в мировой экономике и политике, на регионально-национальные особенности, на факторы, повышающие конкурентоспособность отдельных стран и регионов как медицинских направлений [Junio et al, 2017]. Наиболее развитыми регионами России по приему медицинских туристов являются по данным 2017–2021 гг. [Вань Синтун, 2022]:

○ **Центральный федеральный округ:** Лидирует по числу принимаемых медицинских туристов (около **31 %**) благодаря высокоразвитой инфраструктуре, концентрации крупных медицинских учреждений и широкому спектру предлагаемых медицинских услуг.

○ **Южный федеральный округ:** Занимает вторую позицию с долей около **21 %**. Регион популярен благодаря большому количеству санаториев и курортов, сосредоточенных преимущественно в Краснодарском крае и Республике Крым, предлагающих восстановительные и профилактические процедуры.



Рис. 1. Виды медицинского туризма
 Fig. 1. Types of medical tourism

Северо-Западный федеральный округ обладает значительной привлекательностью для медицинских туристов благодаря своим крупным городам, таким как Санкт-Петербург, с хорошо оборудованными клиниками и научными медицинскими центрами. Тем не менее существует проблема интерпретации статистических данных, поскольку в представленное распределение входят все категории туристов, включая тех, кто прибывает исключительно с превентивной целью, посещает санаторно-курортные комплексы и пользуется климатотерапевтическими и бальнеологическими ресурсами для восстановления здоровья и релаксации, а не исключительно с намерением пройти инвазивное медицинское вмешательство или другие виды полноценного лечения.

В соответствии с официальной статистикой Министерства здравоохранения Российской Федерации, в 2022 г. медицинская помощь иностранным гражданам была предоставлена на общую сумму свыше \$700 млн, охватив приблизительно 12 млн человек. Однако, по мнению экспертов Ассоциации медицинского и академического туризма, большая часть этих показателей относится к обязательным медицинским услугам для мигрантов и временных рабочих, а не к истинному медицинскому туризму. Доля настоящего медицинского туризма, то есть прибытия иностранных граждан исключительно для получения квалифицированной медицинской помощи, составляет лишь около 5 % от общего объема экспорта медицинских услуг. Среди главных потребителей медицинского туризма выделяются граждане стран СНГ, привлечённые культурной близостью, отсутствием визовых требований и наличием крупных диаспор на территории России, отмечается устойчивый спрос со стороны китайских граждан, заинтересованных в услугах репродуктивного профиля.

Согласно официальным данным Министерства здравоохранения Российской Федерации за период с 2021 по 2025 гг., российские медицинские учреждения оказали услуги 21,5 миллиону иностранных граждан, общий объём привлечённых финансовых средств составил \$1,2 млрд долларов (средняя стоимость одного случая лечения – \$55,81). Подобный низкий показатель средней суммы платежа обуславливается, по мнению автора настоящего исследования, следующими обстоятельствами:

- широким диапазоном оказываемых медицинских услуг, значительную долю которых составляют доступные и низкобюджетные процедуры;
- наличием большого числа мелких транзакций, компенсирующих редкие крупные единовременные платежи за дорогостоящие операции;
- наличием систематической погрешности в статистическом учёте, связанной с учётом в структуре медицинского туризма трудовых мигрантов, получающих бесплатную экстренную помощь в рамках реализации положений Федерального закона № 323-ФЗ от 21 ноября 2011 г. «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации», регламентирующего обязательность оказания скорой медицинской помощи гражданам любого государства вплоть до стабилизации их состояния.

Несмотря на потенциал, реализация возможностей медицинского туризма сталкивается с серьёзными барьерами. Одним из препятствий является ухудшение транспортных связей и ужесточение пограничного контроля после февраля 2022 г., затруднившее доступ иностранных пациентов, особенно из стран с визовыми требованиями. Другим фактором является отсутствие единой государственной системы мониторинга медицинского туризма, что препятствует формированию достоверной картины спроса и предложений на рынке.

Кроме того, российская система здравоохранения пока недостаточно адаптирована к потребностям иностранных пациентов: отсутствуют специализированные информационные ресурсы, плохо развиты механизмы бронирования и международной оплаты госпитализации и комплексных пакетов медицинских услуг. Таким образом, преодоление этих трудностей требует комплексного подхода, включая улучшение инфраструктуры обслуживания иностранных пациентов, расширение маркетинговых кампаний и адаптацию нормативной базы для стимулирования притока иностранных граждан.

Международная Ассоциация медицинского туризма (MTI) играет ключевую роль в оценке потенциальных направлений медицинского туризма, оценивая их по трем ключевым критериям: инфраструктура и социальная среда страны, степень развития индустрии медицинского туризма и качество предоставляемых медицинских услуг. Международная аккредитация в здравоохранении, предлагаемая ведущими организациями, помогает медицинским учреждениям и правительствам соответствовать международным стандартам и эффективно справляться с возникающими вызовами отрасли. Основываясь на рейтинге MTI за 2020–2021 гг., лучшими направлениями для медицинского туризма становятся Канада, Сингапур, Япония, Испания, Великобритания, Дубай, Коста-Рика, Израиль и Абу-Даби.

В постпандемийный период наблюдается формирование новых геополитических центров медицинского туризма и устойчивая тенденция перераспределения потоков медицинского туризма от классических центров Западной Европы и Северной Америки к новым направлениям, представленным государствами объединения БРИКС и региона Глобального Юга. В 2024 году странами-лидерами международного медицинского туризма стали страны Азиатско-Тихоокеанского региона, в частности Индия, Таиланд и Сингапур, которые обеспечивают оптимальное соотношение цены и качества медицинских услуг, сочетание инновационных медицинских технологий, удобных инфраструктурных решений и комфортного отдыха. К развивающимся направлениям медицинского туризма возможно отнести Турцию, Мексику, Малайзию. Главными стимулами выбора зарубежного лечения остаются высокая стоимость медицинских услуг в западных странах, длительное ожидание необходимой помощи и стремление пациентов получать высококачественную помощь без бюрократических преград и высоких финансовых издержек.

Особенностью текущего периода развития медицинского туризма является увеличение интереса к странам, предлагающим комплексное восстановление организма, совмещающее современную медицинскую помощь с традиционными методами терапии и релаксации, национальной аутентичностью. Индийские клиники привлекают не только современными технологиями, но и возможностями интеграции традиционных индийских практик, таких как йога и аюрведа. В Таиланде возможно сочетание первоклассных медицинских услуг с комфортабельным отдыхом. В Сингапуре пациентам – медицинским туристам предлагаются высокотехнологические процедуры, обеспечивающие максимальную безопасность и высокую квалификацию персонала.

Прогнозы показывают, что тенденция роста рынка медицинского туризма сохранится и усилится в будущем, что связано с развитием цифровизации, увеличением охвата страхования заграничного лечения в ряде государств и ростом специализированных медицинских кластеров. Динамика развития медицинского туризма критическим образом обусловлена внедрением передовых медицинских технологий, качеством туристической инфраструктуры, эффективностью организационного управления и наличием квалифицированных медицинских кадров. Анализ факторов, оказывающих влияние на данное направление туризма, осуществляется с применением методов искусственного интеллекта и машинного обучения [Parekh et al., 2017]. Автором настоящего исследования отмечается постепенная трансформация понятийного аппарата, обусловленная рядом факторов, действующих в течение длительного периода времени. Среди таких факторов выделяются кросс-культурные изменения, связанные с появлением новых центров медицинского туризма в разных странах мира, технологические инновации (телемедицина, AI), а также изменение потребительских предпочтений и мировоззрения людей, проявляющееся в отношении к собственному здоровью и осознании единства организма человека и окружающей среды как целостной экологической системы и т. д.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования использован набор данных – библиометрический анализ 1535 публикаций Scopus по медицинскому туризму за период с 1952 по 2020 гг., 46 столбцов и 1535 строк. Он включает различные виды публикаций и их характеристики – авторов, индексы, идентификаторы (DOI, PubMed, CODEN и т. д.), количество цитирований, год издания, язык и т. д. Первичной целью исследования автора является определение тенденций и изменение научных интересов путём анализа ключевых слов и смыслов, содержащихся в аннотациях и тексте публикаций о медицинском туризме за период с 1952 по 2020 гг. (до признания ВОЗ начала пандемии Covid-19). Вторичной целью исследования стала необходимость создания объективной системы оценки и анализа публикационной активности и необходимость предсказать, с помощью подходящей модели машинного обучения, международную цитируемость отечественных исследователей, организаций и изданий, размещающих качественные публикации о медицинском туризме в научных изданиях с целью популяризации Российской Федерации как конкурентоспособной дестинации с развитым медицинским туризмом.

Результаты исследования и их обсуждение

Для целей нашего исследования был взят набор данных (далее – датасет), представляющий собой каталог библиометрического анализа публикаций из наукометрической базы данных Scopus по медицинскому туризму (1535 публикаций), посвящённых вопросам медицинского туризма за шестидесятилетний период с 1952 по 2020 гг. включительно, до начала пандемического кризиса. В исследовании применялись методы статистического анализа и технологии машинного обучения, реализуемые средствами языка программирования Python в облачной среде Google Colab. Исследуемый автором достоверный набор данных из депозитория Kaggle включает разнообразные виды материалов научного характера: оригинальные статьи, систематические обзоры, главы из коллективных монографий, тезисы докладов конференций, значимые для изучаемой автором сферы медицинского и лечебно-оздоровительного туризма. В датасете собраны различные виды публикаций и их характеристики – авторы, индексы, идентификаторы (DOI, PubMed, CODEN и т. д.), количество цитирований, год издания, язык и т. д. Сервис Google Analytics предлагает инструмент отслеживания частотности поисковых запросов пользователей интернета за определённый временной интервал по заданным ключевым словам. Согласно данным Google Trends, запросы по направлению «медицинский туризм» демонстрировали устойчивое увеличение начиная с 2004 г., достигнув своего максимума в 100 баллов в феврале 2018 г., однако в октябре 2020 г. показатель снизился до исторического минимума в 37 единиц [Ананченкова, 2021].

Датасет структурирует следующую ключевую информацию: полные списки авторов публикаций с указанием их организационной принадлежности (академические учреждения, медицинские научные школы и т. п.); реферативное описание содержания публикаций; ключевые слова, выбранные авторами и присвоенными внешними системами классификации (например, MeSH – Medical Subject Headings в PubMed); спецификации молекулярных последовательностей; идентификаторы химических веществ и соединений согласно номерам Chemical Abstracts Service (CAS); реестр защищённых товарных знаков и сведений о производителях соответствующей продукции; а также сведения о финансовом обеспечении отдельных проектов, связанных с публикациями.

Выделяют основные аспекты изучения туризма: географический, организационно-экономический и социологический, охватывающие территориальные перемещения туристов, разнообразие предоставляемых услуг и характеристики населения соответственно. Таким образом, межотраслевой характер проблем медицинского туризма обусловлен интеграцией нескольких направлений наук, междисциплинарность обеспечивает комплексный взгляд на экономические отношения и интегрирует различные дисциплины, включая экономическую географию, экономику, финансы, социологию, психологию, медицину и другие смежные науки [Молчанов, 2019].

Анализ предоставленных метаданных и количественных индикаторов частоты цитирования статей по различным аспектам исследования медицинского и лечебно-оздоровительного туризма позволяет проследить изменения доминирующих научных подходов и направлений, возникших с момента становления медицинского туризма как отдельной отрасли экономики сферы услуг (эволюцию траекторий исследовательского интереса среди учёных различных стран и регионов), а также выявить приоритетные темы дальнейших научных исследований и перспективные направления медицинской туристической деятельности.

Набор данных состоит из 46 столбцов, включающих четыре столбца типа «float64» представления вещественных (действительных) чисел с плавающей запятой высокой точности (для указания номеров страниц, числа цитирований, кодов конференций и уникальных идентификаторов PubMed ID), один столбец с годом издания тип int (integer, целое число) и прочие столбцы с разнородными категориальными данными типа object. PubMed ID – это уникальный идентификатор, присвоенный каждому документу, индексируемому в базе данных PubMed, международной базой данных биомедицинской литературы, поддерживаемой Национальной медицинской библиотекой США (National Library of

Medicine, NLM). Author Keywords (Авторские ключевые слова) – это ключевые слова, специально указанные самим автором публикации, в отличие от Index Keywords (Индексированные ключевые слова), назначенных базой данных или индексирующим сервисом (в нашем исследовании это Scopus).

Во многих столбцах имеются пропуски, особенно в полях «chemicals» и «sponsors», что обусловлено специфичностью данных публикаций – незначительное количество публикаций по медицинскому туризму связаны с апробацией лекарств, большее количество публикаций было издано на выделенные гранты и т. д. Фармацевтические препараты упоминаются в публикациях о медицинском туризме главным образом в связи с феноменом фармацевтического (аптечного) туризма, когда граждане покидают страну постоянного проживания ради приобретения медикаментов, так называемый медицинский туризм. Примером такого явления выступает практика американских пациентов, покупающих дорогие лекарственные средства в соседних странах, таких как Мексика и Канада, вследствие высоких затрат на рецептурные препараты в США [Ананченкова, 2022]. По оценкам исследовательской фирмы IQVIA, ожидается рост расходов на рецептурные медикаменты в США с 487 миллиардов долларов в 2024 г. до 1250 миллиардов долларов к 2025 г. Данная разновидность медицинского туризма оказывает негативное воздействие на национальную экономику, стимулируя отток денежных средств за рубеж. К другим видам медицинского туризма относится участие в клинических исследованиях, проводимых в другом регионе или стране. Данный вид медицинского туризма, несмотря на ограниченный экономический эффект, улучшает международный имидж страны посредством применения современных медицинских технологий и наличия высокопрофессиональных кадров, выполняя важную гуманистическую миссию оказания помощи пациентам с орфанными и трудноизлечимыми заболеваниями. Информация о клинических исследованиях доступна на различных российских и международных платформах и официальных сайтах медицинских учреждений и ведомств (например, официальные сайты Федерального медико-биологического агентства России, Министерства здравоохранения России, ClinicalTrials.ru – специализированная российская платформа для поиска клинических исследований, Clinicaltrials.gov – крупнейшая международная государственная база данных США, предоставляющая подробную информацию обо всех этапах испытаний лекарств и медицинских технологий во многих странах мира, EudraCT/European Clinical Trials Database – европейская система регистрации и мониторинга клинических исследований и т. д.). Качество датасета подтверждается отсутствием пропущенных значений в ключевых полях, таких как авторы, вид публикации и стадия её готовности. В процессе подготовки данных к изучению в результате разведочного анализа (EDA) автором с помощью языка программирования Python были проведены действия, представленные на рис. 2.

Поясним смысл каждого из этапов разведочного анализа данных:

1. Удаление нерелевантных столбцов.

Исключаем столбцы, которые не несут значимой информации для анализа или предсказательной модели.

2. Анализ идентификаторов публикации.

Исследуем уникальность и полезность идентификаторов записей (ID) и принимаем решение оставить их или удалить.

3. Заполнение пропусков и преобразование типов данных.

Обрабатываем отсутствующие значения, заменяя их средними, медианой или другим способом, а также приводим типы данных к нужному формату.

4. Преобразование категориальных данных в бинарные.

Переводим качественные категории в количественный формат.

5. Обнаружение и обработка выбросов.

Определяем экстремальные значения и либо исключаем их, либо нормализуем, чтобы предотвратить искажение результатов.

6. Подготовка категориальных признаков.

Дополнительная работа с категориями, включая агрегирование редких классов или создание новых признаков на основе существующих.

7. Статистический анализ и выявление отклонений.

Проводим различные тесты гипотез, рассчитываем статистику распределения данных, проверяем нормальность распределений и выявляем возможные закономерности.

8. Визуализация данных.

Строим графики и диаграммы для выявления зависимостей, тенденций и характерных свойств набора данных, облегчающих дальнейший анализ.



Рис. 2. Этапы разведочного анализа данных
Fig. 2. Stages of Exploratory Data Analysis (EDA)

В процессе описательной статистики и последующего статистического анализа были выявлены ключевые характеристики данных и рассчитаны соответствующие статистические показатели:

– Mean: 2013 г. Год написания среднестатистической публикации. Стандартное отклонение (std): 9,0. Степень разброса дат публикаций относительно среднего значения. Даты публикации сосредоточены вокруг среднего значения. Преобладающее большинство публикаций выпущено близко к среднему году (2013).

– Минимум (min): 1952,0. Самая ранняя публикация датируется 1952 г. (период развития туризма и лечебно-оздоровительного туризма, в частности, с окончанием Второй мировой войны).

– Cited by Среднее значение (mean): 11,0. Каждая статья в среднем цитируется 11 раз.

- Минимум (min): 0,0. Встречаются публикации, которые не цитировались.
- Максимум (max): 489,0. Одна публикация процитирована на момент публикации датасета 489 раз, что намного выше среднего.
- DOI. Почти все документы имеют DOI. Уникальный идентификатор присутствует у подавляющего большинства публикаций.
- Affiliations. Большинство документов имеют аффилиации авторов. Авторы публикаций обычно указывают свою принадлежность к организациям.
- Chemicals/CAS. Небольшое количество документов содержат такую информацию. В редких случаях публикуемые статьи ссылаются на химические соединения.
- Manufacturers. Несколько публикаций содержат информацию о производителях фармацевтических средств. Упомянуты производители в единичных работах.
- Funding Details. В нескольких документах есть информация о финансировании (грантах на проведение научных исследований).
- References. Практически все публикации сопровождаются библиографическими списками.
- Editors. Редакторы (рецензенты) не упомянуты в большинстве публикаций.
- Sponsors. Авторы публикаций редко получают финансовую поддержку от внешних спонсоров.
- ISSN. Идентификационный номер ISSN присваивается большинству публикаций.
- ISBN. Почти все публикации не имеют ISBN. Подавляющая часть публикаций не является книгами, поэтому ISBN отсутствует.
- PubMed ID. Идентификатор (PMID) присвоен только нескольким публикациям.
- Access Type. Доступность большинства документов ограничена.
- Основной массив публикаций находится в закрытом доступе.
- VOLUME of ARTICLE Среднее значение (mean): 11,0. Средний объем публикаций – 11 страниц (рис. 3).

	Year	Page start	Page end	Cited by	DOI	Affiliations	\
count	1530.0	1530.0	1530.0	1530.0	1530.0	1530.0	
mean	2013.0	395.0	387.0	11.0	1.0	1.0	
std	9.0	699.0	695.0	27.0	0.0	0.0	
min	1952.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
25%	2011.0	37.0	34.0	0.0	0.0	1.0	
50%	2015.0	196.0	192.0	2.0	1.0	1.0	
75%	2017.0	439.0	432.0	10.0	1.0	1.0	
max	2020.0	8447.0	8469.0	489.0	1.0	1.0	

	Authors with affiliations	Chemicals/CAS	Manufacturers	\
count	1530.0	1530.0	1530.0	
mean	1.0	0.0	0.0	
std	0.0	0.0	0.0	
min	0.0	0.0	0.0	
25%	1.0	0.0	0.0	
50%	1.0	0.0	0.0	
75%	1.0	0.0	0.0	
max	1.0	1.0	1.0	

	Funding Details	References	Editors	Sponsors	ISSN	ISBN	\
count	1530.0	1530.0	1530.0	1530.0	1530.0	1530.0	
mean	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
std	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
25%	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
50%	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
75%	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
max	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	

	PubMed ID	Access Type	VOLUME of ARTICLE
count	1530.0	1530.0	1530.0
mean	0.0	0.0	11.0
std	0.0	0.0	31.0
min	0.0	0.0	0.0
25%	0.0	0.0	2.0
50%	0.0	0.0	7.0
75%	0.0	0.0	13.0
max	0.0	1.0	489.0

Рис. 3. Основные статистические показатели, рассчитанные в среде Google Colab (составлено автором)
 Fig. 3. Main statistical indicators calculated in Google Colab (compiled by the author)

Однако наиболее важным в рамках настоящего исследования представляется такой показатель, как «количество цитирований» (Cited by):

- Среднее значение (mean): 11,0. В среднем публикации цитируются 11 раз.
- Стандартное отклонение (std): $\sigma=27$. Большое стандартное отклонение ($=27$), свидетельствует о значительной неоднородности уровней цитирования. Отдельные публикации или ученые обладают заметно большей популярностью.
- Минимум (min): 0,0. Некоторые научные публикации вообще не цитировались.
- Максимум (max): 489,0. Одна из публикаций была процитирована 489 раз, что значительно превышает среднее значение.

Следовательно, можно сделать вывод, что некоторые публикации по теме медицинского или лечебно-оздоровительного туризма или публикации некоторых исследователей более популярны у научного и практического сообщества. Столбец «Cited by» (Количество цитирований), выступающий в качестве целевой переменной для реализации вторичной цели настоящего исследования, предназначен для моделирования процесса прогнозирования цитируемости научных публикаций. Максимальное количество цитирований одной публикации из датасета: 489. Расчет статистических показателей для данного столбца подтверждает, что большинство публикаций цитируется незначительно, тогда как небольшая доля статей демонстрирует высокий уровень цитируемости:

- Минимальное количество цитирований: 0. Среди проанализированных публикаций встречаются статьи, которые ни разу не были процитированы. Это отражает низкий уровень внимания к некоторым работам.

- Среднее количество цитирований: 11. Средняя частота цитирования публикаций равна 11. Однако из-за большого разброса эта цифра не вполне объективно отражает реальную картину.

- Медиана количества цитирований: 2. Медиана равна двум, что свидетельствует о наличии небольшого числа высокоцитируемых статей и значительном количестве слабоцитируемых работ.

- Дисперсия количества цитирований (σ^2): 719,91. Высокая дисперсия указывает на значительное расхождение в уровнях цитируемости различных публикаций.

- Межквартильный размах (IQR): 10 %. 50 % публикаций получили количество цитирований, лежащее в диапазоне 10 цитирований. Средний диапазон цитирований у центрального сегмента статей колеблется от Q1 до Q3 с шириной в 10 единиц, что подчеркивает высокую концентрацию низкого уровня цитируемости.

- Нижняя граница 95-процентного доверительного интервала (CI_95 % Lower): 9,94. Истинное среднее количество цитирований с вероятностью 95 % не опускается ниже 9,94.

- Верхняя граница 95-процентного доверительного интервала (CI_95 % Upper): 12,62. Вероятность того, что истинное среднее количество цитирований превышает 12,62, составляет менее 5 %.

Доверительный интервал среднего значения был рассчитан в среде Google Colab с помощью метода «бутстрэп» (bootstrap) – повторного случайного отбора выборок из имеющихся данных с возвращением для оценки статистических свойств (таких как среднее значение, медиана, стандартные ошибки и доверительные интервалы). По завершении каждой случайной выборки вычисляется среднее значение, и на основе совокупности таких выборочных средних формируется доверительный интервал (CL) при условии принятия допустимого уровня ошибки $\alpha = 5\%$ для выборки объемом свыше 1000 наблюдений.

Рост числа публикаций отмечается в 2015 году, в то время как спад фиксируется в 2020 году с началом пандемии COVID-19. С 2013 года наблюдается устойчивый рост интереса к медицинскому туризму, сопровождающийся увеличением многообразия научных публикаций и изданием первых учебных пособий по данной тематике. Наиболее распространены статьи в специализированных журналах и главы в учебниках (рис. 4, рис. 5).



Рис. 4. Динамика публикаций по медицинскому туризму (составлено автором)
Fig. 4. Dynamics of publications on medical tourism (compiled by the author)

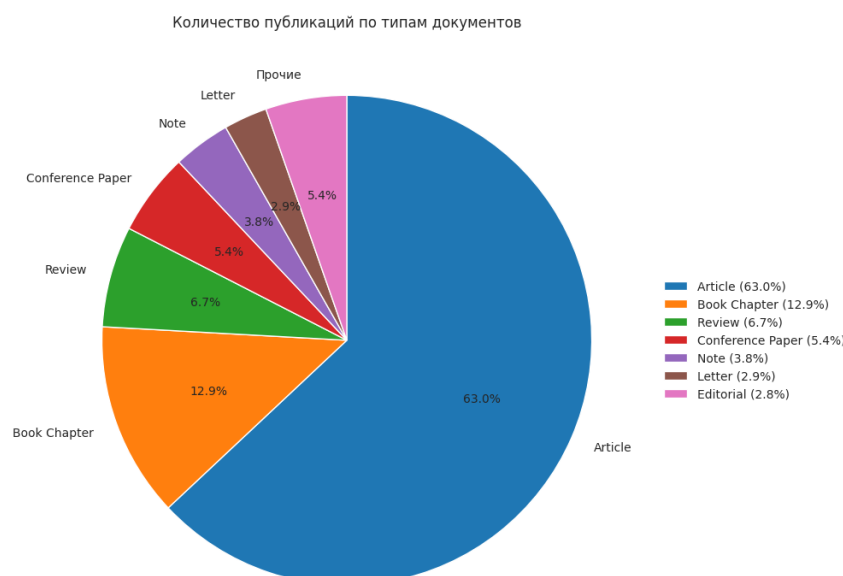


Рис. 5. Виды научных публикаций (типы источников) по медицинскому туризму (составлено автором)
Fig. 5. Types of scientific publications on medical tourism (compiled by the author)

Публикации на иных языках, включая русский, присутствуют в значительно меньшем объеме и преимущественно представлены отдельными работами, опубликованными в материалах международных конференций (рис. 6).

Графическое представление данных иллюстрирует тот факт, что большая часть публикаций содержит необходимые ссылки, проходит процедуру рецензирования (peer-reviewed), что повышает их авторитетность и удовлетворяет требованиям базы данных Scopus. Вместе с тем большинство публикаций доступно лишь на условиях ограниченного открытого доступа к аннотации публикации. Для проверки целей исследования, направленных на изучение эволюции научных публикаций и сдвигов в научных интересах в области медицинского туризма, появления новых терминов в связи с ростом технологий и развития новых дестинаций медицинского туризма с 1953 по 2020 гг., были сформулированы и проверены различные гипотезы с использованием статистических методов и инструментов Python (рис. 7).

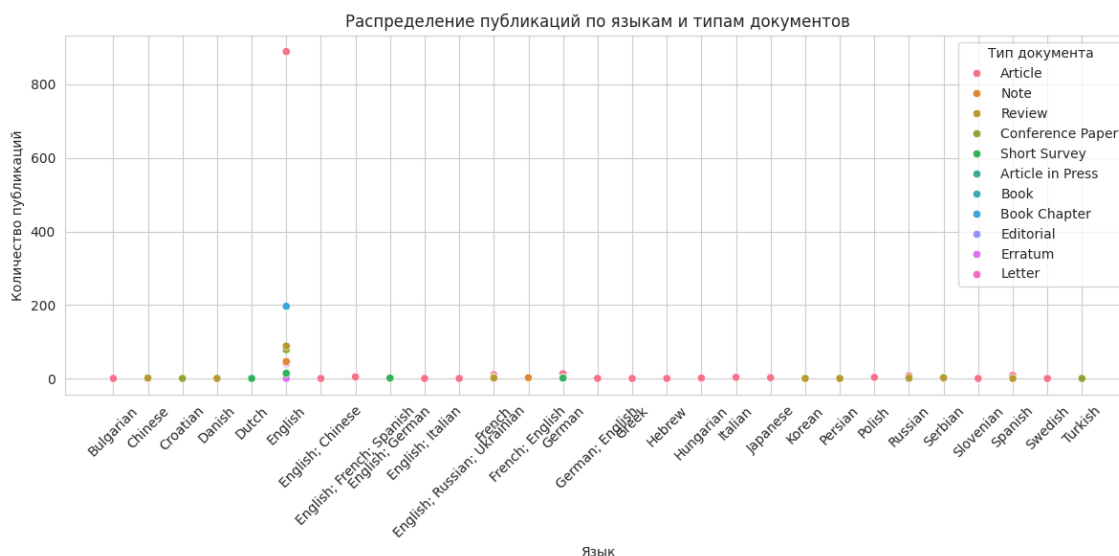


Рис. 6. Структура публикаций по языкам и типам источников (составлено автором)
Fig. 6. Structure of publications by languages and source types (compiled by the author)

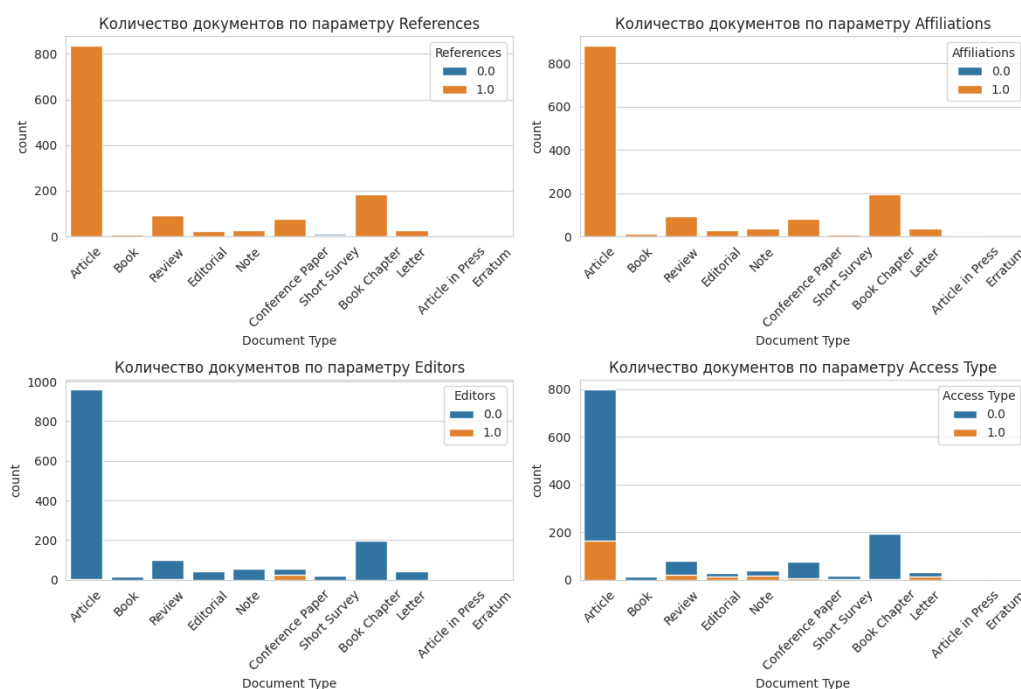


Рис. 7. Визуализация статистических данных (составлено автором)
Fig. 7. Graphical representation of statistical data (compiled by the author)

В первом случае гипотеза H_0 сформулирована как отсутствие зависимости между количеством цитирований (CitedBy) и типом публикации (DocumentType), а альтернативная гипотеза H_1 утверждает, что между частотой цитирования и видом публикации существует значимая связь. Результаты подтвердили гипотезу H_1 : критерий ANOVA показал высокое значение F-статистики (8,958) и предельно низкое p-значение ($<0,0001$), что свидетельствует о существенных различиях в цитируемости различных типов публикаций. Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) используется для сравнения средних значений нескольких независимых групп. Функция `f_oneway` из библиотеки SciPy является удобным инструментом для выполнения такого анализа. F-статистика и p-значение являются важными показателями при анализе данных с использованием дисперсионного анализа (ANOVA). F-статистика – это



отношение между дисперсией, объясненной моделью (между группами), к остаточной дисперсии (внутри групп). В контексте ANOVA она показывает, насколько различаются средние значения разных групп относительно случайных колебаний внутри этих групп. Высокое значение F-статистики указывает на то, что различия между средними значениями групп велики по сравнению со случайными колебаниями внутри каждой группы. В нашем случае F-статистика равна 8,958, что говорит о значительных различиях между средними значениями количества цитирований для различных типов научных публикаций. Р-значение – это вероятность того, что наблюдаемые различия между группами возникли случайно, если бы нулевая гипотеза была верной, р-значение равно 0,000, что интерпретируется как «меньше 0,001». Это очень маленькое значение (меньше установленного уровня значимости 0,05), которое указывает на высокую статистическую значимость результатов. Это означает, что можно отвергнуть нулевую гипотезу. Так как р-значение значительно ниже 0,05, количество цитирований действительно зависит от типа научной публикации.

Во втором случае гипотеза H_0 утверждает, что нет связи между частотой упоминания ключевых слов «sustainable tourism» (устойчивый туризм) и годом публикации ключевых слов в зависимости от года публикации. Гипотеза H_1 предполагает наличие существенной взаимосвязи между изменением частоты употребления ключевых слов и временем публикации материала (табл. 1).

Таблица 1
 Table 1

Топ-20 наиболее популярных монограмм среди авторских ключевых слов публикаций
 Top-20 Most Popular Monograms Among Author Keywords of Publications

Слово	Частота
tourism	1883
medical	1433
sustainable	642
stakeholders	634
networking	632
health	373
patient	84
wellness	77
care	64
travel	63
healthcare	62
international	58
service	56
quality	51
perceived	45

Был проведён корреляционный анализ с использованием «коэффициента Пирсона». Результат анализа показал, что коэффициент корреляции составил $r=0,7$, а р-значение

составило 0,03, что значительно ниже традиционно принятого порога значимости ($\alpha=0,05$). Это позволяет отвергнуть нулевую гипотезу и подтвердить наличие статистически значимой связи между частотой упоминания термина «sustainable» и годом публикации. Таким образом, доказано умеренно-сильное влияние временного фактора на распространение и использование данного термина в научных публикациях. Самый ранний год появления термина «sustainable»: термин «sustainable» впервые был упомянут в ключевых словах в 1952 году. Это может указывать на начало использования этого термина в научной литературе. Год с наибольшим количеством упоминаний термина «sustainable»: наибольшее количество упоминаний термина «sustainable» зафиксировано в 2020 г. Это может свидетельствовать о возросшем интересе к теме устойчивого развития в последние годы с началом пандемии Covid в 2020, что отражается в росте публикационной активности по этой тематике. Можно таким образом проверить различные ключевые слова и выявить тренды в публикациях о медицинском туризме с развитием новых технологий, экологии, национальных экономик различных стран, лидеров по экспорту медицинских услуг, например, Южной Кореи.

Итак, полученные результаты убедительно свидетельствуют о существовании зависимостей между цитируемостью, типами публикаций и изменениями тематических акцентов в научных исследованиях медицинского туризма с течением времени.

Вторичная цель исследования заключается в прогнозировании количества цитирований публикаций о медицинском туризме и выявлении наиболее значимых предикторов, влияющих на целевую переменную – цитируемость. Задача решается с помощью методов машинного обучения и регрессионного анализа, что позволит увеличить количество качественных российских исследований и содействовать их включению в международные базы цитирования (Scopus и др.) и рекомендованный список РАН.

Перед подготовкой данных для моделей машинного обучения остался 16-категориальный набор признаков, количество которых существенно меньше 50. Применение методов снижения размерности пространства признаков (РСА и аналогичных) признано неоптимальным решением, так как это может негативно повлиять на точность прогнозов модели. Проведен анализ корреляции признаков с целевой переменной (количеством цитирований) с помощью функции `df.corr()`. Выявлено, что наибольшую значимость имеют язык публикации (особенно английский) и формат документа (книга). Напротив, наименее значимым оказался год публикации, демонстрирующий слабую отрицательную корреляцию. Эти результаты подчеркивают, что язык и формат документа оказывают решающее влияние на цитируемость публикаций в области медицинского туризма (рис. 8).

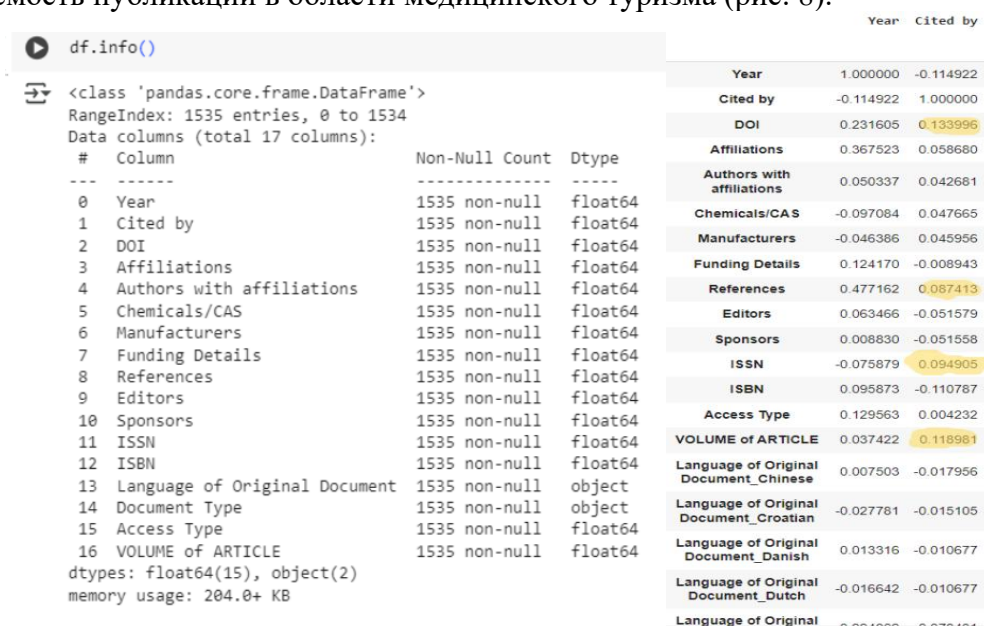


Рис. 8. Корреляционная матрица признаков с числом цитирований (составлено автором)
Fig. 8 Correlation matrix of features with number of citations (compiled by the author)

Language of Original Document_English (английский) – этот признак имеет самую высокую важность, что означает, что язык документа, на котором он написан, является одним из наиболее значимых факторов, влияющих на целевую переменную. Document Type_Book – Тип документа «книга» также оказался значимым фактором, что, вероятно, связано с большим объемом и подробностью информации, представленной в книгах, что отражается на их цитируемости. Language of Original Document_English; French; German – многоязычные документы, особенно те, которые написаны на английском, французском и немецком языках, также занимают важное место в рейтинге признаков. Вероятно, такие публикации привлекают широкую международную аудиторию, междустрановые научные коллективы и увеличивают шансы на повышенное цитирование. Интересным открытием стало слабое влияние года публикации на целевую переменную, что говорит о продолжающемся цитировании старых публикаций, возможно, ввиду их фундаментальности или уникальности в контексте медицинского туризма.

Лучшей моделью стал «градиентный бустинг» – метод машинного обучения, основанный на ансамбле слабых моделей (обычно «деревья решений»), последовательно объединяемых для уменьшения ошибок предыдущих моделей. Основная идея заключается в том, что новая модель обучается исправлять ошибки предыдущей, постепенно приближаясь к оптимальной точности. Такой подход эффективен для сложных задач, где требуются точные прогнозы и устойчивость к «шумам данных». Оценка качества рассмотренных моделей («метода ближайших соседей», «деревя решений», «случайного леса», линейной и Huber-регрессии) проводилась с использованием следующих метрик:

MSE (Mean Squared Error) – средняя квадратичная ошибка (среднее арифметическое квадратов разностей между реальными и предсказанными значениями, чем меньше MSE, тем лучше модель).

MAE (Mean Absolute Error) – средняя абсолютная ошибка (среднее арифметическое модулей разностей между реальными и предсказанными значениями, MAE менее чувствительна к выбросам, чем MSE).

R² (Coefficient of Determination) – коэффициент детерминации. Показывает, какую долю общей вариации данных объясняет модель. Значения R² находятся в диапазоне от $-\infty$ до 1, чем ближе к 1 – лучше модель, а отрицательные значения говорят о плохом подборе модели (рис. 9).

	Model	MSE	MAE	R2 Score
0	KNN	326.67	14.02	-0.26
1	Decision Tree Regressor	351.84	10.87	-0.06
2	Random Forest Regressor	326.67	10.47	0.02
3	Gradient Boosting Regressor	281.69	10.24	0.15
4	Linear Regression	363.89	12.71	-0.11
5	Huber Regression	333.35	9.33	-0.01

Лучший результат:

Model	MSE	MAE	R2 Score
Gradient Boosting Regressor	281.69	10.24	0.15

Рис. 9. Выбор лучшей модели машинного обучения на основе оценок метрик качества
 (составлено автором)

Fig. 9. Comparison of machine learning models based on quality metrics evaluation (compiled by the author)

Причинами низких значений коэффициента детерминации R^2 являются: низкое качество исходных данных, выразившееся в большом количестве отсутствующих значений, заменённых нулями, что создает помехи и снижает точность модели; необходимость тестирования модели на альтернативных выборках для повышения надёжности обучения; наличие ненаблюдаемых факторов, оказывающих влияние на цитируемость, которые не были учтены в данном наборе данных. Преимущества «градиентного бустинга» заключаются в способности выявлять сложные зависимости между признаками и целевой переменной, делая его эффективным инструментом для многомерных данных; устойчивости к переобучению благодаря регуляризации, механизму ранней остановки и контролю сложности модели; успешной адаптации к небольшим объёмам выборок, позволяя качественно обучаться даже на небольшом количестве данных (около 1600 записей); гибкости в обработке различных типов данных, таких как числовые и категориальные признаки. Рекомендации по улучшению модели для дальнейших исследований включают оптимизацию гиперпараметров модели, таких как количество итераций, глубина «деревьев» и скорость обучения, а также дополнительное тестирование на новых наборах данных для минимизации шума и повышения обобщающей способности модели.

Заключение

Исследование продемонстрировало, что медицинская и лечебно-оздоровительная индустрия туризма – сравнительно молодая область региональной и отраслевой экономики – претерпела значительную эволюцию и изменение исследовательской парадигмы за короткий исторический промежуток, составляющий около семидесяти лет. Этому способствовали стремительное развитие медицинских технологий и индустрии путешествий, мобильность зарубежных пациентов, внедрение искусственного интеллекта и разработка цифровых платформ в сфере туризма и здравоохранения, а также смещение акцентов в понимании медицинского туризма от традиционного лечения и/или оздоровительного отдыха к концепции устойчивого развития, включающего внимание к здоровью человека и экологической устойчивости среды. В статье раскрывается динамика развития научных интересов в области медицинского туризма, обосновывается потребность в проведении сравнительного анализа публикаций для идентификации ключевых факторов и периодов, в рамках которых произошла трансформация концептуального аппарата медицинского и лечебно-оздоровительного туризма. Автор также проводит экспериментальную проверку методики машинного обучения, направленной на выявление детерминирующих признаков, определяющих индекс цитируемости исследований по проблемам медицинского туризма. Применение и развитие данной методики может способствовать росту качества научных публикаций данной тематики в России и улучшению её позиций в рейтинге стран-участниц международного рынка медицинского туризма.

Список литературы

- Ананченкова П.И. 2021. Влияние пандемии COVID-19 на развитие медицинского туризма. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*, 29(2): 203–205. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-2-203-205.
- Ананченкова П.И. 2022. Аптечный туризм и реимпорт медицинских продуктов как форма обеспечения доступности лекарственных средств. *Ремедиум*, 26(3): 225–228. DOI: 10.32687/1561-5936-2022-26-3-225-228.
- Ван Синьтун. 2022. Анализ развития регионального медицинского туризма в России. *Вестник Алтайской академии экономики и права*, 5(1): 107–113. DOI: 10.17513/vaael.2183.
- Молчанов И.Н. 2019. Медицинский туризм: роль в поддержании здоровья и увеличении продолжительности жизни населения. *Экономика. Налоги. Право*, 12(2): 127–136. DOI: 10.26794/1999-849X-2019-12-2-127-136.
- Нестеренко Е.С., Примышев И.Н. 2021. Особенности развития медицинского туризма в Российской Федерации. *Геополитика и экогеодинамика регионов*, Том 7 (17), вып. 2: 266–275.



- Савельева Н.А., Колесников Р.В., Шмелева Т.В. Медицинский туризм: вопросы терминологии. *Вестник Евразийской науки*, 2020 №2, <https://esj.today/PDF/64ECVN220.pdf> (доступ свободный)
- Carrera PM, Bridges JF. 2006. Globalization and Healthcare: Understanding Health and Medical Tourism. *Expert Review of Pharmacoeconomics & Outcomes Research*, 6(4): 447–454.
- Crush J, Chikanda A. 2014. South-South Medical Tourism and the Quest for Health in Southern Africa. *Social Science & Medicine*, 114: 1–10. DOI: 10.1016/j.socscimed.2014.06.025.
- Enright MJ, Newton J. 2004. Tourism Destination Competitiveness: A Quantitative Approach. *Tourism Management*, 25(6): 777–788. DOI: 10.1016/j.tourman.2004.06.008.
- García-Altés A. 2005. The Development of Health Tourism Services. *Annals of Tourism Research*, 32(1): 262–266. DOI: 10.1016/j.annals.2004.05.007.
- Hassan V, Noaman S. 2017. Relation Between Tourism and Health: Case Study AIDS in Lebanon. *Atiner Conference Paper Series*, TOU2017-2262.
- Junio MMV, Kim JH, Lee TJ. 2017. Competitiveness Attributes of a Medical Tourism Destination: The Case of South Korea With Importance-Performance Analysis. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 34(4): 444–460. DOI: 10.1080/10548408.2016.1182454.
- Klímová B, Kuča K. 2020. Medical Tourism: Its Research and Implications for Public Health. *Central European Journal of Public Health*, 28(3): 226–229. DOI: 10.21101/cejph.a5744.
- Parekh A, Jaffer U, Bhanushali S, Shukla S. 2021. Disintermediation in Medical Tourism Through Blockchain Technology: An Analysis Using Value-Focused Thinking Approach. *Information Technology & Tourism*, 23(1): 69–96.

References

- Ananchenkova P.I. 2021. Vliyaniye pandemii COVID-19 na razvitiye meditsinskogo turizma [The Impact of the COVID-19 Pandemic on the Development of Medical Tourism]. *Problemy sotsial'noy gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny*, 29(2): 203–205. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-2-203-205.
- Ananchenkova P.I. 2022. Aptekhnnyy turizm i reimport meditsinskih produktov kak forma obespecheniya dostupnosti lekarstvennykh sredstv [Pharmacy Tourism and Reimport of Pharmaceuticals as a Means to Ensure Drug Availability]. *Remedium*, 26(3): 225–228. DOI: 10.32687/1561-5936-2022-26-3-225-228.
- Molchanov I.N. 2019. Meditsinskiy turizm: rol' v podderzhanii zdorov'ya i uvelichenii prodolzhitel'nosti zhizni naseleniya [Medical Tourism: Role in Maintaining Health and Increasing Life Expectancy of Population]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*, 12(2): 127–136. DOI: 10.26794/1999-849X-2019-12-2-127-136.
- Nesterenko E.S., Primyshev I.N. 2021. Osobennosti razvitiya meditsinskogo turizma v Rossiyskoy Federatsii. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, Tom 7 (17), vyp. 2: 266–275.
- Saveleva N.A., Kolesnikov R.V., Shmeleva T.V. (2020). Medical tourism: terminology questions. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(12). Available at: <https://esj.today/PDF/64ECVN220.pdf>.
- Wan Xintun. 2022. Analiz razvitiia regional'nogo meditsinskogo turizma v Rossii. *Vestnik Altayskoi akademii ekonomiki i prava*, 5(1): 107–113. DOI: 10.17513/vaael.2183.
- Carrera PM, Bridges JF. 2006. Globalization and Healthcare: Understanding Health and Medical Tourism. *Expert Review of Pharmacoeconomics & Outcomes Research*, 6(4): 447–454.
- Crush J, Chikanda A. 2014. South-South Medical Tourism and the Quest for Health in Southern Africa. *Social Science & Medicine*, 114: 1–10. DOI: 10.1016/j.socscimed.2014.06.025.
- Enright MJ, Newton J. 2004. Tourism Destination Competitiveness: A Quantitative Approach. *Tourism Management*, 25(6): 777–788. DOI: 10.1016/j.tourman.2004.06.008.
- García-Altés A. 2005. The Development of Health Tourism Services. *Annals of Tourism Research*, 32(1): 262–266. DOI: 10.1016/j.annals.2004.05.007.
- Hassan V, Noaman S. 2017. Relation Between Tourism and Health: Case Study AIDS in Lebanon. *Atiner Conference Paper Series*, TOU2017-2262.
- Junio MMV, Kim JH, Lee TJ. 2017. Competitiveness Attributes of a Medical Tourism Destination: The Case of South Korea With Importance-Performance Analysis. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 34(4): 444–460. DOI: 10.1080/10548408.2016.1182454.
- Klímová B, Kuča K. 2020. Medical Tourism: Its Research and Implications for Public Health. *Central European Journal of Public Health*, 28(3): 226–229. DOI: 10.21101/cejph.a5744.
- Parekh A, Jaffer U, Bhanushali S, Shukla S. 2021. Disintermediation in Medical Tourism Through Blockchain Technology: An Analysis Using Value-Focused Thinking Approach. *Information Technology & Tourism*, 23(1): 69–96.



Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 15.05.2025
Поступила после рецензирования 15.07.2025
Принята к публикации 24.07.2025

Received May 15, 2025
Revised July 15, 2025
Accepted July 24, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тарасенко Эльвира Владимировна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры туризма и гостиничного бизнеса, Финансовый университет при Правительстве РФ; доцент кафедры гостиничного и туристического менеджмента, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Elvira V. Tarasenko, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Tourism and Hotel Business, Financial University under the Government of the Russian Federation; Associate Professor at the Department of Hotel and Tourist Management, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia



ФИНАНСЫ ГОСУДАРСТВА И ПРЕДПРИЯТИЙ FINANCES OF THE STATE AND ENTERPRISES

УДК 368.02

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-612-622

EDN LSFFMF

Новые технологии российских страховщиков в бизнес-процессах создания и дистрибуции страховых продуктов и услуг

Кириллова Н.В., Мединец О.Д.

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

Россия, 125167, г. Москва, пр-т Ленинградский, д. 49/2

NKirillova@fa.ru, 241648@edu.fa.ru

Аннотация. В эпоху стремительной цифровизации всех отраслей экономики развитие страхования в условиях цифровой трансформации является актуальным для изучения. В статье рассматриваются современные технологии, которые на сегодняшний день применяются на практике российскими страховыми компаниями. Особое внимание уделяется возможностям внедрения данных инноваций в некоторые процессы жизненного цикла продукта, а именно в процессы создания и дистрибуции, что является целью выполненной работы. В результате проведенного анализа российского страхового рынка выявлены основные проблемы, с которыми могут столкнуться страховщики, а также приведены пути их решения. Информационной базой для исследований послужили аналитические публикации Центрального Банка Российской Федерации, научные публикации и сайты крупных страховых компаний.

Ключевые слова: новые страховые технологии, страховые продукты, страховые бизнес-процессы, этапы создания и дистрибуции страховых продуктов

Для цитирования: Кириллова Н.В., Мединец О.Д. 2025. Новые технологии российских страховщиков в бизнес-процессах создания и дистрибуции страховых продуктов и услуг. *Экономика. Информатика*, 52(3): 612–622. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-612-622. EDN LSFFMF

New Technologies of Russian Insurers in the Business Processes of Creating and Distributing Insurance Products and Services

Nadezhda V. Kirillova, Olesya D. Medinets

Financial University under the Government of the Russian Federation

49/2 Leningradsky Ave., Moscow 125167, Russia

NKirillova@fa.ru, 241648@edu.fa.ru

Abstract. In the era of rapid digitalization of all sectors of the economy, the topic of insurance development in the conditions of digital transformation is relevant for study. The article considers modern technologies that are currently used in practice by Russian insurance companies. Special attention is also paid to the possibilities of implementing these innovations in some processes of the product life cycle, namely in the processes of creation and distribution, which is the purpose of the work performed. As a result of the analysis of the Russian insurance market, the main challenges that insurers may face have been identified and the ways of their solution have been given. The information base for the research was analytical publications of the Central Bank of the Russian Federation, scientific publications and websites of major insurance companies.

© Кириллова Н.В., Мединец О.Д., 2025

Keywords: new insurance technologies, insurance products, insurance business processes, stages of creation and distribution of insurance products

For citation: Kirillova N.V., Medinets O.D. 2025. New Technologies of Russian Insurers in the Business Processes of Creating and Distributing Insurance Products and Services. *Economics. Information technologies*, 52(3): 612–622 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-612-622. EDN LSFFMF

Введение

В эпоху стремительной цифровизации всех отраслей экономики тема развития страхования в условиях цифровой трансформации приобретает особую значимость. Этот процесс оказывает значительное влияние на функционирование всей отрасли, начиная от разработки новых страховых продуктов и заканчивая совершенствованием системы взаимодействия с клиентами. Переход к цифровым технологиям меняет ландшафт рынка страхования, предъявляя новые требования к участникам отрасли и открывая широкие перспективы для внедрения инноваций. Эффективное использование новых технологий позволяет страховым компаниям оптимизировать процессы внутри организации, способствует созданию новых страховых продуктов, улучшению пользовательского опыта, совершенствованию управления рисками и защиты данных клиентов и многому другому.

В последние годы технологии также в значительной степени повлияли на подход к процессам разработки и дистрибуции страховых продуктов. Использование цифровых платформ, автоматизация процессов и возможность анализа больших объемов данных позволяют компаниям более эффективно взаимодействовать с клиентами и предлагать персонализированные решения. Это создает новые возможности для роста и усиления позиции страховой компании на конкурентном рынке. Поэтому процесс разработки и дистрибуции страхового продукта является комплексным процессом, который требует глубокого понимания рассматриваемого рынка, эффективного управления рисками и грамотной стратегией продаж. В условиях быстро меняющейся среды игроки рынка должны быть готовы адаптироваться и внедрять инновационные подходы для удовлетворения потребностей своих клиентов и достижения устойчивого развития.

Вопросы развития страхового рынка рассматривались в работах российских ученых [Кириллова, Цыганов, Белоусова, 2024], данная проблема также была рассмотрена такими исследователями, как Цыганов А.А. в работе «Цифровизация страхового рынка: задачи, проблемы и перспективы» [Цыганов, 2018], также совместно с Брызгаловым Д.В. и Грызенковой Ю.В. была сделана публикация «Перспективы цифровизации страхового дела в России» [Брызгалов, Грызенкова, Цыганов, 2020]. Изучением этой темы занимались Зубец А.Н., Лебедева А.Д. – «Инновации на российском страховом рынке» [Зубец, Лебедева, 2013], Степанова М.Н. – «Инновации в страховании: основные мировые тенденции» [Степанова, 2020], Аксютин С.В. – «Трансформация страхования: инновационные продукты и технологии» [Аксютин, 2020] и другие.

Таким образом, изучение процесса внедрения новых технологий в процессы создания и дистрибуции страховых продуктов является не только интересной, но и актуальной темой для рассмотрения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются новые технологии на страховом рынке.

Предметом исследования является внедрение новых технологий в бизнес-процесс создания и дистрибуции страховых продуктов и услуг.

Данное исследование включает в себя как теоретические, так и эмпирические методы исследования. Для достижения поставленных целей были использованы общенаучные методы, теоретические материалы отечественных и зарубежных авторов, собранные из

различных источников, которые посвящены инновационным технологиям на рынке страхования.

Результаты и их обсуждение

Рассматривая деятельность организаций на страховом рынке, можно заметить, что каждая страховая компания является динамичной структурой, где происходит множество процессов, которые по-другому называют бизнес-процессами.

Существует множество подходов к определению понятия «бизнес-процесс», проанализируем некоторые из них.

В своих трудах двое американских ученых Майкл Хаммер и Джеймс Чампи понимали под этим термином «совокупность различных видов деятельности, в которых «на входе» используется один или несколько видов ресурсов, в результате чего «на выходе» создается товар, который представляет ценность потребителю» [Хаммер, Чампи, 1997].

Еще один подход озвучили Поршнева А.Г., Румянцева З.П., Соломатина Н.А. в своем учебнике под названием «Управление организацией», а именно «определенная совокупность действий, направленных на преобразование ресурсов в результаты, которые чаще всего выступают в виде продукции или услуг» [Поршнева, Румянцева, Соломатин, 2008].

Последней рассмотренной нами работой, отражающей суть «бизнес-процесса», стала написанная Вороновой О.В. и Ильином И.В. научная статья «Референтная модель бизнес-процессов верхнего уровня для построения архитектурных решений сетевых компаний FMCG-ритейла». Авторы раскрывают этот термин как «модель эталонного бизнес-процесса для предприятий конкретных отраслей промышленности, объединяющая в себе схемы оптимальных бизнес-процессов, проверенных и одобренных на практике (за счет опыта аналогичных предприятий)» [Воронова, Ильин, 2019].

Основные процессы включают в себя создание и продажи страховых продуктов, оценку рисков, урегулирование убытков, бухгалтерский учет и управление финансовыми потоками.

Рассмотрим два основных бизнес-процесса, без которых не существовало бы страхового бизнеса в целом, а именно процессы создания и дистрибуции страхового товара на рынок, являющиеся первыми этапами жизненного цикла продукта [Симонян, Цветкова, Магомедов, 2024] (рис. 1).



Рис. 1. Этапы жизненного цикла продукта

Fig. 1. Stages of the product life cycle

Источник: составлено авторами

Зарождение страхового продукта начинается с процесса его разработки, который в свое время начинался с анализа рынка, а именно его запросов и актуальных потребностей. Ядром данного этапа являются маркетинговые принципы, которые подразумевают под собой, что для получения положительного результата продукт должен удовлетворять конкретным требованиям клиентов. На данном этапе страховые компании уделяют значительное внимание «полевым» исследованиям, чтобы понять, страхование каких рисков наиболее актуально для целевой аудитории. Так, например, в условиях растущей популярности цифровых технологий может быть востребован такой вид страхования, как страхование киберрисков. Также важнейшим компонентом исследований является сегментация рынка. Страховые компании делят рынок на группы клиентов, учитывая определенные характеристики: возраст, доход, профессии и другие, что позволяет создавать персонализированные продукты, которые соответствуют потребностям каждой из выделенных в результате исследований групп.

Например, для молодых семей может быть разработан страховой продукт, покрывающий риски, связанные с рождением ребенка, а для пожилых людей – продукты, ориентированные на медицинское страхование. Более того, в процессе разработки страхового продукта особое внимание уделяется определению рисков и их оценке. Этот процесс сопровождается актуарными расчетами, которые позволяют оценить вероятность наступления страхового случая и размер возможных выплат.

После разработки страхового продукта наступает этап его внедрения на рынок. На данном этапе страховой компании важно сосредоточиться как на распространении информации о появлении нового продукта, так и на способе продажи и доведения его до клиента. Участники рынка основное внимание обращают на маркетинговую стратегию, включающую в себя четкое позиционирование, которое будет выделять созданный продукт среди существующих на рынке аналогов, каналы распределения, выбор которых зависит от специфики самого продукта и целевой аудитории, а также на страховое поле, которым можно считать все потенциальные риски возможных страхователей территории или региона отдельной страховой компании [Кириллова, 2003]. Например, рассматривая регионы Урала, наибольшее количество премий приходится на Тюменскую область (51 %), а наименьшее – на Курганскую область (1 %).

В современных условиях рассмотренные выше процессы постоянно меняются и совершенствуются благодаря появлению множества факторов – изменению рыночных условий, зарождению новых тенденций на рынке, появлению новых игроков и многим другим, в том числе и появлению новых технологий.

Современный страховой рынок России, как и мировой, переживает период активной цифровой трансформации. Новые технологии становятся неотъемлемой частью бизнес-процессов, меняя подходы к созданию страховых продуктов, взаимодействию с клиентами и управлению рисками. Так, по данным агентства «Эксперт РА», доля страховых премий, оформленных через сеть Интернет, за последние два года выросла в 3 раза и составила 17,7 % от всех страховых взносов, за аналогичный период 2021 г. эта доля составляла всего 5,9 % [Кредитное рейтинговое агентство «Эксперт РА», 2025].

Инновации позволяют внедрить в деятельность компаний множество улучшений: автоматизировать бизнес-процессы, усовершенствовать качество обслуживания клиентов, повысить точность оценки рисков и снизить издержки.

На этапе создания страхового продукта технологии позволяют страховщикам собирать и хранить большой объем информации о клиентах и рынке, анализировать риски более точно и предлагать клиентам персонализированные условия. Основой для этого служат большие данные (Big Data), которые собираются из разнообразных источников: от телематических устройств в автомобилях до данных с фитнес-браслетов и социальных сетей. Например, при разработке страховых продуктов в сфере автотранспорта компании используют информацию о стиле вождения, чтобы дифференцировать тарифы. Такой подход не только повышает привлекательность предложений, но и меняет саму концепцию страхования, превращая его из инструмента компенсации ущерба в инструмент управления рисками. Так, в 2024 году компания GlowByte реализовала проект совместно со «СберСтрахованием», который заключается в использовании технологии BigData через внедрение инструмента FineBI от китайского вендора FanRuan [GlowByte, 2024]. Данное внедрение позволило страховой компании визуализировать большие данные, автоматизировать построение отчетности, а также исключить влияние человеческого фактора при подготовке данных для отчетов.

Искусственный интеллект (ИИ) в свою очередь дополняет технологии Big Data, прогнозируя спрос и моделируя сценарии. Так, например, на ежегодном Уральском форуме «Кибербезопасность в финансах» представители страховой компании «СберСтрахования» поделились информацией о способах использования искусственного интеллекта в их деятельности [ООО СК «Сбербанк страхование», 2025]. Одним из способов оказалось применение ИИ в оценке рисков, данная технология помогает специалистам актуарного

отдела обрабатывать большие массивы данных для более точного расчета тарифов по продуктам.

Также на рынке начинают активно развиваться блокчейн-технологии, обеспечивающие прозрачность и безопасность данных на этапе создания продуктов. Умные контракты способны автоматизировать условия выплат по страховым договорам [Курьянова, 2018]. Это не только снижает операционные издержки компании, но и укрепляет доверие клиентов. Например, в 2025 году страховая компания «Согаз» заключила с «Московским метрополитеном» первый в России смарт-контракт по страхованию первого в России беспилотного трамвая с использованием программного комплекса Банка ВТБ [АО «СОГАЗ», 2025]. При наступлении страхового случая расчет ущерба производится онлайн, а выплата страхователю направляется в течение одного дня.

На этапе дистрибуции страхового продукта технологии кардинально трансформируют каналы продвижения и продаж, делая их более гибкими и ориентированными на клиентов.

Современные клиенты ожидают от страховой компании получения возможности оформить страховой продукт за максимально короткое время и без лишних усилий. Так, цифровые платформы и мобильные приложения становятся основным инструментом взаимодействия с аудиторией и позволяют компаниям удовлетворить потребности своих клиентов. На сегодняшний день практически все страховщики активно используют такие инновации. Например, «Тинькофф Страхование» внедрило систему [АО «ТБАНК», 2025], где клиент может оформить полис путешествия прямо в мобильном приложении банка, выбрав опции, подходящие выстроенному маршруту и датам поездки.

Роль искусственного интеллекта в процессе дистрибуции немного отличается от его роли в процессе создания. Так, ИИ выполняет функции личного ассистента страхователя, а именно: алгоритмы анализируют историю их покупок, поведение в сети и даже эмоциональный тон запросов, чтобы предложить наиболее подходящие продукты. Это превращает дистрибуцию в персонализированный сервис, где клиент чувствует, что его потребности учтены до мелочей.

Онлайн-маркетплейсы и партнерские интеграции способны расширить охват страховых продуктов. Например, при покупке авиабилета на сайте «Аэрофлота» клиенту моментально предлагается оформить полис страхования «АльфаСтрахования» [ПАО «Аэрофлот», 2025], а при получении кредита в «ВТБ» – защиты жизни и здоровья. Такая интеграция возможна благодаря еще одному виду технологий – API-технологиям, которые обеспечивают беспрепятственный обмен данными между платформами (рис. 2).

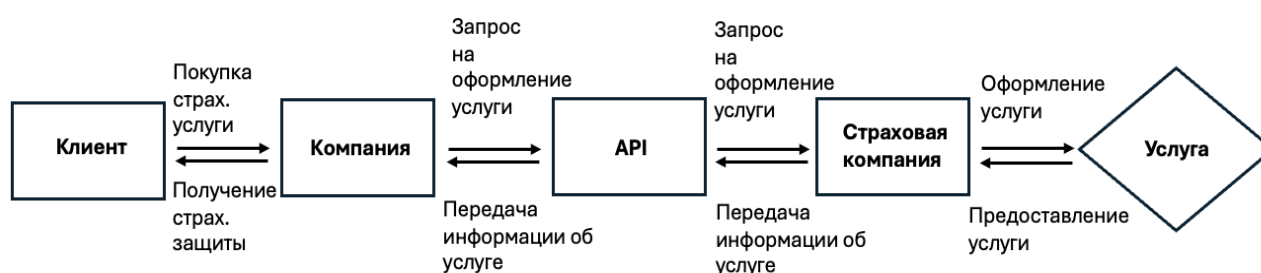


Рис. 2. Схема API в страховании: участники и взаимодействия

Fig. 2. API in Insurance: participants and interactions

Источник: составлено авторами

Социальные сети и мессенджеры также становятся популярными каналами дистрибуции, используя таргетирование на основе поведенческих данных. Например, молодые родители видят предложения о страховании детей, а владельцы автомобилей – рекламу ОСАГО с динамическим ценообразованием.

С помощью технологии Интернета вещей (IoT) страховые компании могут добавить интерактивности в процесс дистрибуции. Умные устройства, такие как датчики в домах или автомобилях, не только собирают данные для оценки рисков, но и становятся точками продаж. Так, например, система «умного дома» может автоматически предлагать клиенту расширить страховое покрытие при обнаружении уязвимостей в безопасности. В автостраховании телематические устройства, подключенные к мобильному приложению, не только следят за стилем вождения, но и отправляют уведомления о специальных предложениях, таких как скидки на зимнюю резину или услуги эвакуатора.

Таким образом, результаты рассмотрения современных каналов дистрибуции на российском страховом рынке можно обобщить в табличной форме (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Современные каналы дистрибуции на российском страховом рынке
Modern distribution channels in the Russian insurance market

Канал дистрибуции	Цифровые технологии
Онлайн-платформы и мобильные приложения	Искусственный интеллект, Big Data, облачные вычисления, блокчейн, API-интеграции
Социальные сети	Таргетированная реклама, AI-алгоритмы для анализа аудитории, SMM-платформы
Чат-боты и виртуальные ассистенты	NLP (обработка естественного языка), AI, интеграция с CRM
Партнерские экосистемы	API-интеграции, облачные платформы, микросервисная архитектура
Телематика	IoT (интернет вещей), датчики, мобильные приложения, AI-аналитика данных

Источник: составлено авторами

Таким образом, на данный момент существуют различные инновации и возможности, которые может использовать страховая компания при для внедрения в бизнес-процессы создания и дистрибуции страховых продуктов (табл. 2).

Таким образом, российские страховщики активно внедряют новые технологии, но их распространение неравномерно. Крупные игроки, имеющие достаточные ресурсы, быстрее адаптируются к рыночным изменениям, в то время как средние и маленькие компании не имеют достаточных ресурсов на начальном этапе внедрения новых технологий. Ключевыми факторами становятся инвестиции в IT-инфраструктуру, партнерство с финтех-стартапами и гибкость регуляторной среды. Страховые компании, которые смогут интегрировать технологии в свои процессы, не только сократят издержки, такие как, к примеру, затраты на аренду и персонал, но и укрепят позиции в условиях растущей конкуренции, предлагая клиентам услуги, соответствующие запросам цифровой эпохи.

Цифровая трансформация страхового рынка открывает новые возможности для роста и инноваций, однако внедрение технологий в процессы создания и дистрибуции продуктов сопряжено с комплексом вызовов, которые требуют от компаний не только финансовых вложений, но и стратегической гибкости. Российские страховщики сталкиваются с необходимостью преодолевать барьеры, связанные с киберугрозами, регуляторными ограничениями, проблемами в процессе внедрения (как со стороны технологического аспекта, так и со стороны сопротивления сотрудников) и растущими ожиданиями клиентов.



Таблица 2

Table 2

Новые технологии в бизнес-процессах создании и дистрибуции страховых продуктов
 New technologies in business processes of creation and distribution of insurance products

Этап создания страхового продукта		Этап дистрибуции страхового продукта	
Большие данные (Big Data)	Способствует сбору большого количества информации о клиентах компании	Цифровые платформы и мобильные приложения	Способствует созданию возможности приобретения страхового продукта быстро и дистанционно
Искусственный интеллект	Способствует быстрому анализу больших объемов информации, рыночных трендов, поведения клиентов и др.	Искусственный интеллект	Способствует персонализации продукции
Блокчейн	Способствует обеспечению прозрачности и безопасности данных на этапе создания продуктов	Онлайн-маркетплейсы (на основе API-технологий)	Способствуют расширению охвата страховых продуктов
		Социальные сети и мессенджеры	Способствует расширению каналов дистрибуции
		Интернет вещей (IoT)	Способствует продвижению страховых продуктов

Источник: составлено авторами

Одним из наиболее острых вызовов для участников страхового рынка являются кибератаки. Внедрение технологий, таких как облачные хранилища, Интернет вещей или блокчейн, значительно увеличивает риск столкновения с киберугрозами. В апреле 2023 года российские страховые компании в России столкнулись с DDoS-атаками, хакерскими атаками на системы страховых компаний, целью которых являлось доведение её до отказа. Данные атаки были направлены на различные сетевые уровни и элементы инфраструктуры пострадавших компаний, что затрудняло их обнаружение и блокировку. В результате данных атак сайты и мобильные приложения страховых компаний были недоступны для пользования на протяжении нескольких дней, что стало причиной финансовых потерь и возникновения репутационного риска [Газета.ру, 2023].

Регуляторные ограничения являются еще одним значимым барьером. Деятельность страховых компаний в России строго регламентирована Центральным банком, устанавливающим определенные правила, которых страховые компании должны придерживаться, чтобы осуществлять свою деятельность. Регулирование направлено на стабилизацию страхового рынка, защиту прав потребителей, противодействие монополизации и многому другому. Например, Федеральный закон № 242-ФЗ о локализации данных обязывает компании хранить информацию о клиентах на территории РФ, ограничивая использование международных облачных платформ, таких как AWS или Google Cloud [16]. Это увеличивает издержки компании и усложняет интеграцию с зарубежными партнерами. Кроме того, отсутствие четких стандартов и положений для регулирования таких технологий, как умные контракты на блокчейне, создает правовую неопределенность.

Высокие затраты на внедрение и поддержку технологий становятся серьезным препятствием, особенно для средних и малых игроков. Разработка мобильных приложений, внедрение Big Data-платформ или покупка лицензий на программное обеспечение для анализа

рисков требуют значительных инвестиций, которые могут быть доступны не всем компаниям. Системообразующие страховщики, такие как «Согаз», «Ингосстрах» и «РЕСО-Гарантия» и другие, могут позволить себе такие расходы за счет диверсификации бизнеса, но для региональных страховщиков данная проблема является одной из причин ослабления своего положения на рынке. Кроме того, технологии требуют постоянного обновления: устаревшие системы быстро теряют эффективность, что превращает цифровизацию в «гонку вооружений».

Значительным барьером является человеческий фактор, а именно сопротивление сотрудников изменениям. Так, внедрение технологий способно кардинально поменять привычные и рутинные процессы: агенты должны осваивать цифровые инструменты, андеррайтеры – работать с алгоритмами ИИ, а менеджеры – принимать решения на основе обработанных данных. Также обучение персонала, особенно в регионах с низкой цифровой грамотностью, требует большого количества времени и ресурсов. Кроме того, автоматизация процессов может привести к сокращению рабочих мест: по оценкам Deloitte, к 2025 году до 30 % рутинных операций в страховании будут выполняться с помощью алгоритмов [Deloitte, 2025].

Если рассматривать внедрение новых технологий в процессе дистрибуции, страховые компании могут столкнуться с проблемой цифрового неравенства клиентов. Несмотря на рост онлайн-продаж, значительная часть аудитории, особенно в старших возрастных группах и регионах, где слабо работает Интернет, по-прежнему предпочитает приобретение страховых продуктов и услуг через офлайн-отделения. Данный вызов вынуждает компании не только развивать цифровые пути продаж, но и поддерживать традиционные каналы дистрибуции, что увеличивает операционные расходы. Кроме того, этому способствует и низкая осведомленность клиентов о технологических возможностях внедряемых инноваций.

Таким образом, при внедрении в бизнес-процессы цифровых технологий российские страховщики сталкиваются с немалым количеством вызовов, поэтому необходимо разрабатывать меры по их предотвращению или снижению (табл. 3).

Таблица 3
Table 3

Меры по противодействию проблемам, возникающим при внедрении
цифровых технологий на страховой рынок
Measures to counter the problems that arise when introducing digital technologies
into the insurance market

Вызов	Решение (пример)
Увеличение числа кибератак	Инвестиции в многоуровневую защиту – от шифрования данных до внедрения систем мониторинга угроз в режиме реального времени
Регуляторные ограничения	Создание регуляторных «песочниц» для тестирования инноваций
Высокие затраты	Партнерство с финтех-стартапами, аутсорсинг ИТ-инфраструктуры
Сопротивление сотрудников	Вовлечение сотрудников в цифровую трансформацию через хакатоны, переквалификацию
Цифровое неравенство клиентов	Политика постепенной интеграции новых технологий в регионы

Источник: составлено авторами

Заключение

Преодоление перечисленных вызовов требует от страховых компаний не только финансовых и технических ресурсов, но и культурной трансформации. Однако даже крупные

игроки постоянно сталкиваются с выбором между скоростью внедрения технологий и безопасностью систем, между инновациями и регуляторными рамками, между автоматизацией и человеческим фактором. Будущее страхового рынка будет зависеть от способностей компаний превратить эти вызовы в возможности, создавая продукты и сервисы, которые не только соответствуют технологическим трендам, но и остаются понятными, надежными и доступными для всех категорий клиентов.

Разработка и внедрение новых технологий в бизнес-процессы создания и дистрибуции страховых продуктов и услуг становятся для российских страховщиков не только конкурентным преимуществом, а стратегической необходимостью. В условиях цифровизации экономики и растущих ожиданий клиентов компании вынуждены трансформировать традиционные подходы, интегрируя множество инновационных технологий: Big Data, искусственный интеллект, блокчейн и IoT в свои бизнес-процессы. Ключевым фактором успеха является комплексный подход, который включает в себя множество этапов, начиная с глубокого анализа рынка и потребностей клиентов, заканчивая построением цифровых экосистем, объединяющих онлайн- и офлайн-каналы. Однако внедрение новых технологий сопряжено с вызовами: высокие затраты, регуляторные ограничения, киберугрозы и сопротивление персонала, которые требуют от компаний сбалансированных и комплексных решений. Так, оптимизация затрат через партнерство с финтех-стартапами, повышение квалификации сотрудников, внедрение гибридных моделей дистрибуции и многие другие способы борьбы с возникающими вызовами, с которыми сталкиваются страховые компании, являются стратегически важными решениями, что, в итоге, может улучшить финансовые результаты компании, усилить положение на рынке и увеличить клиентскую базу.

Список источников

- Согаз, мосметро и ВТБ заключили первый в России смарт-контракт на страхование городского транспорта // Согаз. URL: <https://www.sogaz.ru/sogaz/pressroom/release/860677/> (дата обращения: 16.04.2024).
- Страховые компании России подверглись масштабным DDoS-атакам от украинской ИТ-армии // Газета.ru. URL: https://www.gazeta.ru/tech/news/2023/04/25/20288383.shtml?ysclid=m8uaogf916472187800&update_d (дата обращения: 14.04.2024).
- Платформа АО «ТБАНК» URL: <https://www.tbank.ru/insurance/travel/> (дата обращения: 16.04.2024).
- Платформа ООО СК «Сбербанк страхование». URL: <https://sberbankins.ru/about/news/v-sberstrakhovanii-rasskazali-kak-strakhovshchiki-vnedryayut-ii-v-svoyu-rabotu/?ysclid=m8qw617s3y352946667> (дата обращения: 15.04.2024).
- Платформа «Эксперт РА» URL: <https://raexpert.ru> (дата обращения: 14.04.2024).
- Платформа ПАО «Аэрофлот» URL: https://www.aeroflot.ru/ru-ru/additional_service#services_insurance (дата обращения: 18.04.2024).
- Платформа «Эксперт РА» URL: <https://raexpert.ru> (дата обращения: 14.04.2024).
- Платформа Deloitte URL: <https://www.deloitte.com/global/en/Industries/financial-services/about.html> (дата обращения: 19.04.2024).
- Федеральный закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части уточнения порядка обработки персональных данных в информационно-телекоммуникационных сетях» от 21.07.2014 N 242-ФЗ
- GlowByte помогла СберСтрахованию внедрить единый инструмент для бизнес-отчётности FineBI// GlowByte. URL: https://glowbyteconsulting.com/glowbyte_pomogla_sberstrahovaniyu?ysclid=m9ftyv3a4e839189328 (дата обращения: 14.04.2024).

Список литературы

- Аксютин С.В. 2020. Трансформация страхования: инновационные продукты и технологии. *Экономика, предпринимательство и право. Экономика и бизнес*, 2: 395–410.
- Брызгалов Д.В., Грызенкова Ю.В., Цыганов А.А. 2020. Перспективы цифровизации страхового дела в России. *Финансовый журнал*, 3: 76–90. DOI: 10.31107/ 2075-1990-2020-3-76-90

- Воронова О.В., Ильин И.В. 2019. Референтная модель бизнес-процессов верхнего уровня для построения архитектурных решений сетевых компаний FMCG-ритейла. *Экономика и управление*, 5: 81–88.
- Зубец А.Н., Лебедева А.Д. 2013. Инновации на российском страховом рынке. *Финансы*, 6: 55–58.
- Курьянова И.В., Абибуллаев М.С. 2018. Возможности и перспективы применения блокчейн в страховании. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление*, 3: 101–107.
- Кириллова Н.В., Цыганов А.А., Белоусова Т.А. 2024. ESG-трансформация на страховом рынке: современное состояние, проблемы и перспективы. *Прометей*: 260 с. ISBN 978-5-00172-596-1. EDN NDFTCN.
- Кириллова Н.В. 2003. Финансовая устойчивость и банкротство российских страховых компаний. ООО «МАКС Пресс»: 178 с. ISBN 5-317-00848-4. EDN UBWANX.
- Симонян Т.В., Цветкова С.Н., Магомедов М.Г. 2024. Современный маркетинг : учебник. КноРус: 318 с. ISBN 978-5-406-13139-8.
- Степанова М.Н. 2020. Инновации в страховании: основные мировые тенденции. *Азимут научных исследований: экономика и управление. Экономика и бизнес*, 3: 340–344.
- Поршнева А.Г., Румянцева З.П., Саломатин Н.А. 2008. Управление организацией : учебник. ИНФРА-М.
- Хаммер М., Чампи Дж. 1997. Реинжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе. Санкт-Петербургский государственный университет.: Изд-во С.-Петерб. ун-та: 332 с.
- Цыганов А.А. 2018. Цифровизация страхового рынка: задачи, проблемы и перспективы. *Экономика и управление*, 2: 111–120.

References

- Aksyutina S.V. 2020. Transformaciya strahovaniya: innovacionnye produkty i tekhnologii. [Transformation of Insurance: Innovative Products and Technologies]. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo. Ekonomika i biznes [Economics, Entrepreneurship and Law. Economics and Business]*, 2: 395–410.
- Bryzgalov D.V., Gryzenkova Yu.V., Cyganov A.A. 2020. Perspektivy cifrovizacii strahovogo dela v Rossii. [Prospects for Digitalization of Insurance in Russia]. *Finansovyj zhurnal [Financial Journal]*, 3: 76–90. DOI: 10.31107/2075-1990-2020-3-76-90.
- Vorobyeva O.V., Il'in I.V. 2019. Referentnaya model biznes-processov verkhnego urovnya dlya postroeniya arkhitekturnykh reshenij setevykh kompanij FMCG-ritejla. [Reference Model of Top-Level Business Processes for Architectural Solutions in FMCG Retail Network Companies]. *Ekonomika i upravlenie [Economics and Management]*, 5: 81–88.
- Zubec A.N., Lebedeva A.D. 2013. Innovacii na rossijskom strahovom rynke [Innovations in the Russian Insurance Market]. *Finansy [Finance]*, 6: 55–58.
- Kuryanova I.V., Abibullaev M.S. 2018. Vozmozhnosti i perspektivy primeneniya blokchejn v strahovanii. [Opportunities and Prospects of Blockchain in Insurance]. *Uchenye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Ekonomika i upravlenie [Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Economics and Management]*, 3: 101–107.
- Kirillova N.V., Cyganov A.A., Belousova T.A. 2024. ESG-transformaciya na strahovom rynke: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy. [ESG Transformation in the Insurance Market: Current State, Problems, and Prospects]. Moscow: Prometej [Prometheus], 260 p. ISBN 978-5-00172-596-1. EDN NDFTCN.
- Kirillova N.V. 2003. Finansovaya ustojchivost i bankrotstvo rossijskih strahovykh kompanij. [Financial Stability and Bankruptcy of Russian Insurance Companies]. Moscow: ООО "MAKS Press" [LLC "MAX Press"], 178. ISBN 5-317-00848-4. EDN UBWANX.
- Simonyan T.V., Cvetkova S.N., Magomedov M.G. 2024. Sovremennyy marketing: uchebnik. [Modern Marketing: Textbook]. Moscow: Knorus [KnoRus], 318 p. ISBN 978-5-406-13139-8.
- Stepanova M.N. 2020. Innovacii v strahovanii: osnovnye mirovye tendencii. [Innovations in Insurance: Key Global Trends]. *Azimut nauchnyh issledovanij: ekonomika i upravlenie. Ekonomika i biznes [Azimuth of Scientific Research: Economics and Management. Economics and Business]*, 3: 340–344.
- Porshnev A.G., Rumyanцева Z.P., Salomatин N.A. 2008. Upravlenie organizaciej: uchebnik. [Organization Management: Textbook]. Moscow: INFRA-M [INFRA-M].
- Hammer M., Champi Dzh. 1997. Reinzhiniring korporacii: Manifest revolyucii v biznese. [Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution]. Saint Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta [St. Petersburg University Press], 332.



Сыганов А.А. 2018. Цифровизация страхового рынка: задачи, проблемы и перспективы. [Digitalization of the Insurance Market: Tasks, Problems, and Prospects]. *Ekonomika i upravlenie [Economics and Management]*, 2: 111–120.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 12.06.2025

Поступила после рецензирования 22.07.2025

Принята к публикации 30.07.2025

Received June 12, 2025

Revised July 22, 2025

Accepted July 30, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кириллова Надежда Викторовна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры страхования и экономики социальной сферы, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия

Мединец Олеся Дмитриевна, студент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda V. Kirillova, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Insurance and Social Economics, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Olesya D. Medinets, student, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION

УДК 004.942

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-623-641

EDN NCHMIO

Системное моделирование отталкивания с радиационным трением точечных зарядов на основе классического гармонического анализа

Дубровин А.С., Сумин В.И., Кравченко А.С.

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8
asd_kiziltash@mail.ru

Аннотация. Предложен методологический подход к комплексному применению методов системного анализа и методов классического гармонического анализа к задачам классической математической физики при математическом моделировании дальнего действия сложных нелинейных систем заряженных материальных точек (ЗМТ), что лежит в русле появления и развития классического гармонического системного анализа как одного из перспективных направлений системного анализа. Его методы естественно применять для анализа, синтеза и управления техническими устройствами, подчиняющимися законам классической физики, путем надлежащей обработки информации в процессе их моделирования, как моделей динамики сложных систем, дающего возможность оценивать достижимость цели системой и другие родственные характеристики (например, своевременность достижения цели). Разработан применимый к дальнему действию сложных нелинейных систем ЗМТ способ проведения с использованием метода быстрых разложений классического гармонического системного анализа на основе комплекса аксиологического и каузального представлений моделей при обработке информации в процессе моделирования. Для этого метод быстрых разложений, известный своей эффективностью при моделировании близкого действия физических полей и сплошных материальных сред, адаптирован в рамках классического гармонического системного анализа к моделированию дальнего действия сложных нелинейных систем ЗМТ. Использование этого метода приводит к формированию каузального представления, основанного на аппроксимации траекторий ЗМТ быстрыми разложениями, параметры которых находятся решением системы нелинейных алгебраических уравнений, соответствующей системе нелинейных дифференциальных уравнений, моделирующей дальнее действие. Работоспособность предложенного способа проверена на примере сложной системы взаимно отталкивающихся в вакууме с радиационным трением двух ЗМТ, описываемой нелинейной системой дифференциальных уравнений третьего порядка.

Ключевые слова: системный анализ, обработка информации, сложная система, гармонический анализ, ряды Фурье, дальнее действие, радиационное трение, заряженная материальная точка

Для цитирования: Дубровин А.С., Сумин В.И., Кравченко А.С. 2025. Системное моделирование отталкивания с радиационным трением точечных зарядов на основе классического гармонического анализа. *Экономика. Информатика*, 52(3): 623–641. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-623-641. EDN NCHMIO

Systemic Modeling of Repulsion with Radiative Friction of Point Charges Based on Classical Harmonic Analysis

Anatoly S. Dubrovin, Viktor I. Sumin, Andrey S. Kravchenko
Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov,
8 Timiryazev St., Voronezh 394087, Russia
asd_kiziltash@mail.ru

Abstract. The article proposes a methodological approach to the integrated application of system analysis methods and classical harmonic analysis methods to problems of classical mathematical physics in mathematical modeling of action at a distance of complex nonlinear systems of charged material points (CMP). This is in line with the emergence and development of classical harmonic system analysis as a promising area of system analysis. Its methods are naturally applied to the analysis, synthesis and control of technical devices that obey the laws of classical physics. This application occurs through proper processing of information in the process of their modeling as models of the dynamics of complex systems. The modeling makes it possible to estimate the system's ability to attain the goal and other related characteristics (for example, the timeliness of achieving the goal). A method has been developed for conducting classical harmonic system analysis based on a set of axiological and causal representations of models during information processing in the process of modeling. This method can be applied to action at a distance of complex nonlinear systems of CMP. For this purpose, the fast expansion method, known for its efficiency in modeling short-distance action of physical fields and continuous material media, is adapted within the framework of classical harmonic system analysis to modeling action at a distance of complex nonlinear CMP systems. The use of this method leads to the formation of a causal representation based on the approximation of CMP trajectories by fast expansions, the parameters of which are found by solving a system of nonlinear algebraic equations corresponding to a system of nonlinear differential equations modeling action at a distance. The proposed method efficiency has been verified using the example of a complex system of two CMPs mutually repelling in a vacuum with radiative friction, described by a nonlinear system of differential equations of the third order.

Keywords: systems analysis, information processing, complex system, harmonic analysis, Fourier series, action at a distance, radiative friction, charged material point

For citation: Dubrovin A.S., Sumin V.I., Kravchenko A.S. 2025. Systemic Modeling of Repulsion with Radiative Friction of Point Charges Based on Classical Harmonic Analysis. *Economics. Information technologies*, 52(3): 623–641. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-623-641. EDN NCHMIO

I. Введение

В связи с тем, что, согласно «узкому определению системного анализа», данному академиком Моисеевым Н.Н., методы системного анализа ориентированы на исследование с использованием ЭВМ сложных систем [Моисеев, 2013], среди которых можно выделить сложные технические системы, процессы функционирования которых подчиняются физическим законам, при исследовании упомянутых сложных технических систем важную роль играет совместное, причем взаимосвязанное, применение методов системного анализа и математической физики. Если процессы функционирования этих сложных технических систем подчиняются законам не квантовой, а классической физики, то и речь в данном случае идет о комплексном применении методов системного анализа и классической математической физики.

Вслед за тем, что классический математический анализ имеет свои естественные приложения в области классической математической физики, математической основой которой являются краевые задачи для дифференциальных уравнений в евклидовом пространстве с возможным наличием независимого времени, классический гармонический анализ (в общем случае многомерный гармонический анализ в евклидовых пространствах, одно из удачных введений к которому дано в [Стейн, Вейс, 1974]), как одно из неклассических направлений современного анализа, выросших из классического математического анализа совместно с

вещественным анализом (теория функций одной и нескольких вещественных переменных) и комплексным анализом (теория функций одной и нескольких комплексных переменных), имеет дальнейшие естественные приложения в данной области. Задачи классической математической физики решаются при этом с использованием представлений функций (в общем случае нескольких переменных), фигурирующих в соответствующих дифференциальных уравнениях, в виде рядов Фурье и интегралов Фурье, опять-таки в общем случае многомерных. В отличие от классического, абстрактный гармонический анализ (гармонический анализ на абстрактных структурах с применением представлений групп и меры Хаара) имеет наиболее естественные приложения за пределами классической математической физики.

Так как в современной физике господствует теоретико-полевая парадигма, то и среди задач математической физики, включая классическую, преобладают задачи исследования физических полей и сплошных материальных сред. Применение классического гармонического анализа в таких задачах хорошо известно и продуктивно, как, например, в [Лыков, 1967; Тимошенко, Гудьер, 1979; Тихонов, Самарский, 1999; Лешонков, 2018]. Однако естественно присущие теоретико-полевой парадигме недостатки и ограничения стимулируют исследователей обращаться к идеям дальнего действия [Владимиров, 2012]. Показательны слова Фейнмана Р: «Понятия простых заряженных частиц и электромагнитного поля как-то не согласуются друг с другом» [Фейнман, Лейтон, Сэндс, 1977]. Классическая модель такой «простой заряженной частицы» – заряженная материальная точка (ЗМТ). А характерное отличие такого рода моделей дальнего действия пространственно-удаленных ЗМТ – их непосредственное (без физических полей, эмиссий и т. д. в роли посредников) физическое взаимодействие.

Одна из самых известных классических моделей дальнего действия ЗМТ относится к теории прямого межчастичного взаимодействия Фоккера – Фейнмана [Wheeler, Feynman, 1945]. К альтернативным этой теории классическим моделям дальнего действия ЗМТ относятся гиперконтинуальные модели (в частности, представленные в [Дубровин, 2018; Дубровин, 2019]), идейная основа которых претерпела эволюцию от фундаментальной роли идей классического гармонического анализа в [Дубровин, 2013а; Дубровин, 2013б] к фундаментальной роли идей дальнего действия в [Дубровин, 2018; Дубровин, 2019].

В классических моделях дальнего действия систем ЗМТ эти системы можно рассматривать как сложные системы, декомпозируемые на подсистемы, причем в простейшем случае роль подсистемы играет отдельная ЗМТ (тривиальная подсистема). При отсутствии взаимодействия данной ЗМТ с другими и внешней средой она движется равномерно прямолинейно, и соответствующим вектором скорости можно идентифицировать состояние тривиальной подсистемы, которое оказывается постоянным во времени, что означает статичность подсистемы. Совокупность таких подсистем не образует сложную систему. Наличие взаимодействия данной ЗМТ с другими или внешней средой означает динамичность соответствующей подсистемы, но в случае линейности взаимодействий вряд ли уместно говорить о сложности системы. Однако нелинейность системы наряду с разделением взаимодействия на внутреннее (между тривиальными подсистемами) и внешнее (тривиальных подсистем с внешней средой) является весомым фактором отнесения данной системы к сложным системам, причем именно к внутренне сложным системам, характеризующимся сложностью пространства их внутренних состояний.

Комплексное применение методов системного анализа и методов классического гармонического анализа к задачам классической математической физики при математическом моделировании дальнего действия сложных нелинейных систем ЗМТ лежит в русле появления и развития классического гармонического системного анализа как одного из перспективных направлений системного анализа, что было рассмотрено в [Дубровин, 2023а]. Предполагается, что естественная область практического использования данного перспективного направления системного анализа относится к моделированию технических устройств, процессы функционирования которых подчиняются законам классической физики. При этом, согласно [Перегудов, Тарасенко, 1989], применение методов системного анализа проводится при

обработке информации в процессе моделирования динамики сложной технической системы и, тем самым, относится, прежде всего, к информационным аспектам сложной системы: к информации о состоянии подсистем, к целям системы, к информационным потокам при обработке информации. Информационный поток при обработке информации формируется из информации о переходах подсистем из одних состояний в другие в конкретные моменты или промежутки времени. А цель сложной системы, понимаемая в универсальном (без различения искусственного или естественного характера системы) смысле, раскрытом в [Тарасенко, 2004], означает в данном случае достижение системой любого состояния, подходящим образом определенного через состояния всех подсистем, которое принадлежит целевому подпространству пространства состояний системы и потому обретает статус целевого состояния. Применение методов классического гармонического системного анализа призвано позволять анализировать, синтезировать технические устройства и управлять ими путем надлежащей обработки информации в процессе их моделирования, как моделей динамики сложных систем, дающего возможность оценивать достижимость цели системой и другие родственные характеристики (например, своевременность достижения цели).

Для обеспечения такой применимости методов классического гармонического системного анализа при обработке информации в процессе моделирования динамики сложных систем соответствующие математические модели должны иметь подходящие представления. Аналогичная проблема поиска подходящих представлений возникала и при построении квантового полумарковского системного анализа (комплексное применение методов системного анализа и методов теории конечных полумарковских процессов к задачам квантовой механики и квантовой теории поля в рамках квантовой математической физики при математическом моделировании сложных квантовых систем), как другого перспективного направления системного анализа наряду с рассматриваемым в настоящей статье классическим гармоническим системным анализом, что было рассмотрено в [Дубровин, 2023б] применительно к сложным квантовым системам с взаимно несовместимыми состояниями и в [Дубровин, 2024] применительно к сложным квантовым системам с интерферирующими нецелевыми и взаимно несовместимыми целевыми состояниями. Очевидно, что использованный в работах [Дубровин, 2023б; Дубровин, 2024] и заимствованный из [Волкова, Денисов, 2021] способ проведения подходящего представления моделей в целом подходит и для классического гармонического системного анализа и представляет собой комплексирование аксиологического и каузального представлений математической модели динамики сложной квантовой системы. При комплексном применении методов системного анализа и методов классического гармонического анализа в рамках использования классического гармонического системного анализа аксиологическое представление в некотором смысле отвечает за применение первых, а каузальное – вторых.

Применение методов классического гармонического анализа к задачам классической математической физики при математическом моделировании дальнодействия сложных нелинейных систем ЗМТ наталкивается на те же самые трудности, что и при математическом моделировании физических полей и сплошных материальных сред, – низкая скорость сходимости рядов Фурье и то, что они не обязательно почленно дифференцируемы с нужной кратностью [Дубровин, 2023а]. Согласно [Толстов, 1980], преодолеваются эти трудности использованием таких рядов Фурье, у которых скорость сходимости повышена в надлежащей мере.

Метод [Чернышов и др., 2014] получения рядов Фурье с надлежащей скоростью сходимости для эффективного решения не только линейных, но и нелинейных задач классической математической физики, получил название метода быстрых разложений и успешно применялся при математическом моделировании (например, в [Лешонков, 2018]). В частности, как показано в [Чернышов и др., 2019], при решении задач с дифференциальными уравнениями не выше третьего порядка применение данного метода с граничной функцией не ниже второго порядка позволяет для достижения той же точности ограничиться одним только первым членом ряда вместо сотен или даже тысяч членов классических рядов Фурье.

Представляется актуальной тематика распространения метода быстрых разложений в рамках классического гармонического системного анализа на основе комплекса аксиологического и каузального представлений моделей с математического моделирования близкодействия физических полей и сплошных материальных сред на математическое моделирование дальнодействия сложных нелинейных систем ЗМТ. Использование метода быстрых разложений при этом приводит к формированию каузального представления, основанного на аппроксимации траекторий ЗМТ быстрыми разложениями, параметры которых находятся решением системы нелинейных алгебраических уравнений, соответствующей системе нелинейных дифференциальных уравнений, моделирующей дальнодействие. Для удобства проработки данной тематики важно выбрать подходящий как можно более простой, но притом показательный пример сложной системы ЗМТ. Согласно [Дубровин, 2023а], на эту роль вполне подходит система взаимно отталкивающихся в вакууме с радиационным трением двух ЗМТ.

Цель работы – разработка способа проведения с использованием метода быстрых разложений классического гармонического системного анализа на основе комплекса аксиологического и каузального представлений моделей при обработке информации в процессе математического моделирования дальнодействия сложных нелинейных систем ЗМТ на примере системы взаимно отталкивающихся в вакууме с радиационным трением двух ЗМТ.

II. Постановка задачи

Условимся о варьировании индексов α , $\bar{\alpha}$ только в следующих пределах: $\alpha = \overline{1, 2}$, $\bar{\alpha} = \overline{0, 2}$. Пусть сложная система декомпозируется на две тривиальные подсистемы, нумеруемые вместе с соответствующими пространственно-разделенными в вакууме ЗМТ индексом α , и функционирует на отрезке времени $t \in [-a, a]$, $a > 0$ длительности $T = 2a > 0$. Время отсчитывается от начального момента $(-a)$ и вообще изменяется в таких пределах для удобства использования универсального быстрого разложения. При математическом моделировании этой сложной системы из числа физических постоянных используются электрическая постоянная ε_0 и постоянная скорости света C , а каждая подсистема α параметризуется инертной массой $m_\alpha > 0$ и электрическим зарядом $Q_\alpha \in \mathbb{R}$, причем $Q_1 Q_2 > 0$. Дополнительно введем неотрицательные величины

$$m_{F\alpha} = \frac{Q_\alpha^2}{6\pi\varepsilon_0 c^3}, \quad C = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0}.$$

Вращение в системе отсутствует, так что прямая, проходящая через обе ЗМТ, инерциальная. ЗМТ под действием Кулоновской силы взаимно удаляются по причине одноименности зарядов. Динамику системы удобно рассматривать в инерциальных системах отсчета (ИСО), в которых угол между радиус-векторами ее ЗМТ составляет $\pi/2$, так что движение ЗМТ в них прямолинейно по общей прямой, и в которых это движение притом разнонаправлено. В данной задаче рассматриваются только нерелятивистские ИСО. В роли динамической переменной подсистемы выступает зависимость модуля радиус-вектора ЗМТ от времени. Она различается в зависимости от выбора математической модели, в частности от того, какие силы учитываются в модели.

А именно, учет излучения ЗМТ требует учета силы радиационного трения. Авторитетный базовый анализ этого вопроса дан в [Ландау, Лифшиц, 2020], а важные дополнительные сведения, раскрывающие его проблемный характер, – в [Гинзбург, 1969; Фейнман, Лейтон, Сэндс, 1977; Poisson, 1999; Соколов, 2009]. Так, в [Гинзбург, 1969] академик Гинзбург В.Л. причислил вопрос об уравнениях движения с учетом силы радиационного трения и вопрос об излучении и реакции излучения при равномерно ускоренном движении

заряда к «вечным вопросам» в физике. Вслед за знаменитым выявлением в [Фейнман, Лейтон, Сэндс, 1977] трудностей такого рода, в [Poisson, 1999] обсуждаются трудности теоретико-полевой интерпретации формул реакции излучения, как уравнений движения точечного заряда. В классическом релятивистском теоретико-полевом контексте учет силы радиационного трения осуществляется посредством использования формулы Лоренца – Абрагама – Дирака или родственных ей формул вроде формулы Соколова [Соколов, 2009], но в классическом дальнедействующем контексте, как и в классическом нерелятивистском теоретико-полевом, предпочтительнее представляется формула Лоренца.

Если в качестве противодействующих Кулоновской сил рассматривать только Даламберову силу инерции, то динамические переменные $\bar{r}_\alpha = \bar{r}_\alpha(t) > 0$ определяются системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$m_\alpha \ddot{\bar{r}}_\alpha (\bar{r}_1 + \bar{r}_2)^2 = C. \quad (1)$$

Если же дополнительно учитывать по формуле Лоренца силу радиационного трения, много меньшую указанных двух сил, то динамические переменные $r_\alpha = \bar{r}_\alpha - \tilde{r}_\alpha = r_\alpha(t) = \bar{r}_\alpha(t) - \tilde{r}_\alpha(t)$, для которых $0 < \tilde{r}_\alpha \ll \bar{r}_\alpha$, $0 < r_\alpha \leq \bar{r}_\alpha$, определяются более сложной системой, содержащей рывок $\ddot{r}_\alpha$:

$$(m_\alpha \ddot{r}_\alpha - m_{F\alpha} \ddot{r}_\alpha)(r_1 + r_2)^2 = C. \quad (2)$$

Одним из возможных примеров формализации своевременности (за промежуток времени T) достижения цели системы отметим характеристики

$$\Psi = \bigwedge_{\alpha=1}^2 \Psi_\alpha, \quad (3)$$

$$\bar{\Psi} = \bigwedge_{\alpha=1}^2 \bar{\Psi}_\alpha \quad (4)$$

для моделей (1) и (2) соответственно, естественно декомпозируемые по соответствующим целям обеих подсистем α :

$$\Psi_\alpha = \Psi_\alpha(r_{\alpha \min}, r_{\alpha \max}, v_{\alpha \min}, v_{\alpha \max}) = (r_\alpha(a) \in (r_{\alpha \min}, r_{\alpha \max})) \wedge (\dot{r}_\alpha(a) \in (v_{\alpha \min}, v_{\alpha \max})),$$

$$\bar{\Psi}_\alpha = \bar{\Psi}_\alpha(r_{\alpha \min}, r_{\alpha \max}, v_{\alpha \min}, v_{\alpha \max}) = (\bar{r}_\alpha(a) \in (r_{\alpha \min}, r_{\alpha \max})) \wedge (\dot{\bar{r}}_\alpha(a) \in (v_{\alpha \min}, v_{\alpha \max})),$$

где заданные среди исходных данных системного анализа общие для обеих моделей величины $r_{\alpha \min} \in [0, +\infty]$, $r_{\alpha \max} \in [0, +\infty]$, $v_{\alpha \min} \in [0, +\infty]$, $v_{\alpha \max} \in [0, +\infty]$ определяют целевые диапазоны для координат и скоростей ЗМТ. Оценка величин $r_\alpha(a)$, $\dot{r}_\alpha(a)$ или им подобных, требуемых для определения событий (3), (4) или им подобных, наиболее естественно через приближенное аналитическое решение уравнений (1), (2), осуществить которое позволяет использование метода быстрых разложений.

Уравнения (1) и (2) будем рассматривать в одной и той же ИСО. Тогда величины $\tilde{r}_\alpha$ представляют собой малые поправки к приближенным значениям $\bar{r}_\alpha$ величин r_α , обусловленные учетом силы радиационного трения. Начальное расстояние между ЗМТ

$$R_0 = (r_1(-a) + r_2(-a)) = (\bar{r}_1(-a) + \bar{r}_2(-a)) \quad (5)$$

инвариантно относительно выбора ИСО. Начальное время $(-a)$ удобно выбрать так, чтобы начальная скорость взаимного удаления ЗМТ была нулевой, что в совокупности с требованием к ИСО разнонаправленности движения ЗМТ означает нулевые начальные скорости обеих ЗМТ в обоих случаях (1), (2):

$$\dot{\bar{r}}_\alpha(-a) = 0, \quad (6)$$

$$\dot{r}_\alpha(-a) = 0. \quad (7)$$

Центр масс сложной системы в случае (1) инерциален, так как она в этом случае замкнута. Начало пространственных координат выбираемой ИСО удобно поместить в этот центр масс:

$$m_1 \bar{r}_1 \equiv m_2 \bar{r}_2, \quad (8)$$

$$m_1 r_1(-a) = m_2 r_2(-a). \quad (9)$$

В отличие от тождества (8), обеспечить выполнение равенства (9) выбором ИСО можно лишь в начальный момент времени, так как в случае (2) центр масс сложной системы не инерциален по причине того, что она в этом случае не замкнута, а диссипативна, что проявляется в наличии излучения.

В силу (8) динамические переменные $\bar{r}_\alpha$ можно выразить через одну вспомогательную $r_0 = r_0(t)$:

$$\bar{r}_1 \equiv r_0, \quad \bar{r}_2 \equiv \frac{m_1}{m_2} r_0. \quad (10)$$

Подстановкой $\bar{r}_\alpha$ из (10) в (1) решение системы (1) сводится с учетом (10) к решению единственного нелинейного дифференциального уравнения

$$\ddot{r}_0 \cdot r_0^2 = C_0, \quad C_0 = \frac{C m_2^2}{m_1 (m_1 + m_2)^2}. \quad (11)$$

Из (5), (6), (8), (9), (10) имеем:

$$r_0(-a) = \frac{m_2}{m_1 + m_2} R_0, \quad \dot{r}_0(-a) = 0; \quad (12)$$

$$\bar{r}_1(-a) = \frac{m_2}{m_1 + m_2} R_0, \quad \bar{r}_2(-a) = \frac{m_1}{m_1 + m_2} R_0; \quad (13)$$

$$r_1(-a) = \frac{m_2}{m_1 + m_2} R_0, \quad r_2(-a) = \frac{m_1}{m_1 + m_2} R_0. \quad (14)$$

Для системы уравнений (1) ставится задача Коши с начальными условиями (6), (13). С учетом (10) эта задача сводится к задаче Коши (11), (12). Для системы уравнений (2) ставится задача Коши с начальными условиями (7), (14) и

$$\ddot{r}_\alpha(-a) = R_{2\alpha}. \quad (15)$$

В силу (6), (7), (13), (14) имеем:

$$\tilde{r}_\alpha(-a) = \dot{\tilde{r}}_\alpha(-a) = 0. \quad (16)$$

Научная задача состоит в проведении системного анализа по формулам типа (3), (4) на основе комплексного решения всех трех указанных задач Коши, причем особый отдельный интерес представляет определение поправок $\tilde{r}_\alpha(t)$ с заданными начальными условиями (16) на всем отрезке $t \in [-a, a]$, как поправок, непосредственно характеризующих влияние силы радиационного трения. Точное аналитическое решение этих задач Коши затруднительно ввиду их нелинейного характера. А численное решение затруднительно с такой точностью, которая позволяла бы учитывать поправки $\tilde{r}_\alpha(t)$ ввиду их малости. Эта трудность проявляется в малости входящих в (2) величин $m_{F\alpha}$, что затрудняет непосредственное решение уравнения (2). При таких расчетах влиянием силы радиационного трения обычно просто пренебрегают и вместо уравнений (2) решают уравнения (1), (11). Но использование метода быстрых разложений позволяет учитывать даже малые поправки $\tilde{r}_\alpha(t)$.

III. Теоретический анализ

Так как задача Коши (2), (7), (14), (15) сочетает в себе нечетные производные с четными, то регламентируемые методом быстрых разложений для ее решения быстрые разложения универсальные. Третий порядок уравнения (2) требует в быстрых разложениях использования в качестве полиномиальных граничных функций таковых, которые имеют порядок p не ниже удвоенного порядка уравнения, в данном случае шестого (трехкратное по порядку старшей производной уравнения дифференцирование снижает порядок граничной функции на три и делает его не ниже порядка уравнения, в данном случае третьего). Для комплексного в смысле единообразности решения задачи Коши (2), (7), (14), (15) совместно с задачей Коши (11), (12) неизвестные динамические переменные $r_{\bar{\alpha}}(t)$ аппроксимируются быстрыми разложениями

$$r_{\bar{\alpha}}(t) \approx \hat{r}_{\bar{\alpha}pN}(t) = M_{\bar{\alpha}p}(t) + a_{\bar{\alpha}0} + \sum_{m=1}^N \left(a_{\bar{\alpha}m} \cos \frac{m\pi t}{a} + b_{\bar{\alpha}m} \sin \frac{m\pi t}{a} \right) \quad (17)$$

с учетом в рядах Фурье первых членов с номерами $m = \overline{0, N}$ и коэффициентами $a_{\bar{\alpha}0}$, $a_{\bar{\alpha}m}$, $b_{\bar{\alpha}m}$, где полиномиальные граничные функции $M_{\bar{\alpha}p}(t)$ для $r_{\bar{\alpha}}(t)$ соответственно одинакового четного порядка p представлены в следующем характерном для универсальных быстрых разложений виде

$$M_{\bar{\alpha}p}(t) = \sum_{q=0}^p A_{\bar{\alpha}q} P_q(t) \quad (18)$$

с неизвестными коэффициентами $A_{\bar{\alpha}q}$ при быстрых полиномах $P_q(t)$, рекуррентно по $q = \overline{1, p/2}$ определяемых равенствами

$$P_0(t) = \frac{t}{2a}, \quad P_{2q-1}(t) = \int_0^t P_{2q-2}(x) dx, \quad P_{2q}(t) = \int_0^t P_{2q-1}(x) dx - \frac{t}{a} \int_0^a P_{2q-1}(x) dx. \quad (19)$$

С учетом (18) быстрые разложения (17) имеют вид

$$r_{\bar{\alpha}}(t) \approx \hat{r}_{\bar{\alpha}pN}(t) = \sum_{q=0}^p A_{\bar{\alpha}q} P_q(t) + a_{\bar{\alpha}0} + \sum_{m=1}^N \left(a_{\bar{\alpha}m} \cos \frac{m\pi t}{a} + b_{\bar{\alpha}m} \sin \frac{m\pi t}{a} \right). \quad (20)$$

Дифференцирование (20) по t кратности $s = \overline{0, p}$ дает

$$r_{\bar{\alpha}}^{(s)}(t) \approx \hat{r}_{\bar{\alpha}pN}^{(s)}(t) = \sum_{q=0}^p A_{\bar{\alpha}q} P_q^{(s)}(t) + a_{\bar{\alpha}0} \delta_{s0} + \sum_{m=1}^N \left(\frac{m\pi}{a} \right)^s \left(a_{\bar{\alpha}m} \cos \left(\frac{m\pi t}{a} + \frac{s\pi}{a} \right) + b_{\bar{\alpha}m} \sin \left(\frac{m\pi t}{a} + \frac{s\pi}{a} \right) \right), \quad (21)$$

где $\delta_{..}$ – символ Кронекера. Подстановка $t = -a$ в (21) дает

$$r_{\bar{\alpha}}^{(s)}(-a) \approx \hat{r}_{\bar{\alpha}pN}^{(s)}(-a) = \sum_{q=0}^p A_{\bar{\alpha}q} P_q^{(s)}(-a) + a_{\bar{\alpha}0} \delta_{s0} + \sum_{m=1}^N \left(\frac{m\pi}{a} \right)^s \left(a_{\bar{\alpha}m} \cos \left(\frac{(s-2m)\pi}{2} \right) + b_{\bar{\alpha}m} \sin \left(\frac{(s-2m)\pi}{2} \right) \right), \quad s = \overline{0, p}. \quad (22)$$

Некоторые из величин $r_{\bar{\alpha}}^{(s)}(-a)$ в (22) непосредственно определяются начальными условиями (7), (12), (14), (15), а остальные находятся из дифференциальных уравнений (2), (11) путем их многократного дифференцирования с подстановкой $t = -a$. Точность быстрых разложений (20) быстро растет с увеличением величин p и N . При их заданных значениях набор из трех быстрых разложений $\hat{r}_{\bar{\alpha}pN}(t)$ однозначно определяется набором $3p + 6N + 6$ параметров $A_{\bar{\alpha}q}$, $a_{\bar{\alpha}0}$, $a_{\bar{\alpha}m}$, $b_{\bar{\alpha}m}$, $q = \overline{0, p}$, $m = \overline{1, N}$, которые находятся решением системы

$3p + 6N + 6$ нелинейных алгебраических уравнений. Первые $3p + 3$ уравнений этой системы получаются из (22) заменой $\approx$ на $=$:

$$\hat{r}_{\alpha pN}^{(s)}(-a) = r_{\bar{\alpha}}^{(s)}(-a), \quad s = \overline{0, p}. \quad (23)$$

Следующие $3N + 3$ уравнений получаются подстановкой $r_{\bar{\alpha}}(t) = \hat{r}_{\alpha pN}(t)$ в (2), (11) с последующим умножением полученных уравнений на $\cos \frac{m\pi t}{a}$ и последующим интегрированием полученных уравнений по переменной t в пределах от $-a$ до a (здесь $m = \overline{0, N}$):

$$\int_{-a}^a \left(m_{\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha pN} - m_{F\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha pN} \right) \left(\hat{r}_{1pN}(t) + \hat{r}_{2pN}(t) \right)^2 \cos \frac{m\pi t}{a} dt = \int_{-a}^a C \cos \frac{m\pi t}{a} dt, \quad (24)$$

$$\int_{-a}^a \ddot{\hat{r}}_{0pN} \cdot \hat{r}_{0pN}^2 \cos \frac{m\pi t}{a} dt = \int_{-a}^a C_0 \cos \frac{m\pi t}{a} dt. \quad (25)$$

Последние $3N$ уравнений получаются подстановкой $r_{\bar{\alpha}}(t) = \hat{r}_{\alpha pN}(t)$ в (2), (11) с последующим умножением полученных уравнений на $\sin \frac{m\pi t}{a}$ и последующим интегрированием полученных уравнений по переменной t в пределах от $-a$ до a (здесь $m = \overline{1, N}$):

$$\int_{-a}^a \left(m_{\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha pN} - m_{F\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha pN} \right) \left(\hat{r}_{1pN}(t) + \hat{r}_{2pN}(t) \right)^2 \sin \frac{m\pi t}{a} dt = \int_{-a}^a C \sin \frac{m\pi t}{a} dt \quad (26)$$

$$\int_{-a}^a \ddot{\hat{r}}_{0pN} \cdot \hat{r}_{0pN}^2 \sin \frac{m\pi t}{a} dt = \int_{-a}^a C_0 \sin \frac{m\pi t}{a} dt, \quad m = \overline{1, N}. \quad (27)$$

Система уравнений (23)–(27) декомпозируется на две независимые системы уравнений: первая – (23) с заменой $\bar{\alpha}$ на α , (24), (26) относительно неизвестных $A_{\alpha q}$, $a_{\alpha 0}$, $a_{\alpha m}$, $b_{\alpha m}$, $q = \overline{0, p}$, $m = \overline{1, N}$; вторая – (23) с заменой $\bar{\alpha}$ на 0, (25), (27) относительно неизвестных A_{0q} , a_{00} , a_{0m} , b_{0m} , $q = \overline{0, p}$, $m = \overline{1, N}$.

Каузальное представление модели основано на аппроксимации траекторий ЗМТ $r_{\alpha} = r_{\alpha}(t)$, $\bar{r}_{\alpha} = \bar{r}_{\alpha}(t)$ быстрыми разложениями

$$\hat{r}_{\alpha pN} \approx r_{\alpha}, \quad \hat{r}_{0pN} \approx r_0 \equiv \bar{r}_1, \quad \frac{m_1}{m_2} \hat{r}_{0pN} \approx \frac{m_1}{m_2} r_0 \equiv \bar{r}_2, \quad (28)$$

которые при заданных p и N образуют $(3p + 6N + 6)$ -параметрический набор. При этом производные $r_{\alpha}^{(n)}$, $\bar{r}_{\alpha}^{(n)}$, $\tilde{r}_{\alpha}^{(n)}$ произвольного порядка n естественно аппроксимировать соответствующими производными

$$\hat{r}_{\alpha pN}^{(n)} \approx r_{\alpha}^{(n)}, \quad \hat{r}_{0pN}^{(n)} \approx r_0^{(n)} \equiv \bar{r}_1^{(n)}, \quad \frac{m_1}{m_2} \hat{r}_{0pN}^{(n)} \approx \frac{m_1}{m_2} r_0^{(n)} \equiv \bar{r}_2^{(n)}, \quad (29)$$

$$\tilde{r}_{\alpha pN}^{(n)} \equiv \hat{r}_{0pN}^{(n)} - \hat{r}_{\alpha pN}^{(n)} \approx \tilde{r}_{\alpha}^{(n)}.$$

Характеристики Λ_{pN} , $\bar{\Lambda}_{pN}$ аксиологического представления моделей (1), (2) сложной системы, соответствующие целевым характеристикам Ψ , $\bar{\Psi}$ (3)–(4) системы с соответствующей декомпозицией на характеристики $\Lambda_{\alpha pN}$, $\bar{\Lambda}_{\alpha pN}$ аксиологического представления моделей обеих подсистем α с использованием индикаторной функции $\mathbf{1}_{\bullet}(\bullet)$

имеют соответственно следующий вид:

$$\begin{aligned}\Lambda_{pN} &= \Lambda_{pN}(r_{1\min}, r_{1\max}, r_{2\min}, r_{2\max}, v_{1\min}, v_{1\max}, v_{2\min}, v_{2\max}) = \\ &= \prod_{\alpha=1}^2 \Lambda_{\alpha pN}(r_{\alpha\min}, r_{\alpha\max}, v_{\alpha\min}, v_{\alpha\max}) = \\ &= \prod_{\alpha=1}^2 \left(\mathbf{1}_{(r_{\alpha\min}, r_{\alpha\max})}(\hat{r}_{\alpha pN}(a)) \mathbf{1}_{(v_{\alpha\min}, v_{\alpha\max})}(\dot{\hat{r}}_{\alpha pN}(a)) \right) \\ \bar{\Lambda}_{pN} &= \bar{\Lambda}_{pN}(r_{1\min}, r_{1\max}, r_{2\min}, r_{2\max}, v_{1\min}, v_{1\max}, v_{2\min}, v_{2\max}) = \\ &= \prod_{\alpha=1}^2 \bar{\Lambda}_{\alpha pN}(r_{\alpha\min}, r_{\alpha\max}, v_{\alpha\min}, v_{\alpha\max}) = \left(\mathbf{1}_{(r_{1\min}, r_{1\max})}(\hat{r}_{0pN}(a)) \mathbf{1}_{(v_{1\min}, v_{1\max})}(\dot{\hat{r}}_{0pN}(a)) \right) \times \\ &\quad \times \left(\mathbf{1}_{(r_{2\min}, r_{2\max})} \left(\frac{m_1}{m_2} \hat{r}_{0pN}(a) \right) \mathbf{1}_{(v_{2\min}, v_{2\max})} \left(\frac{m_1}{m_2} \dot{\hat{r}}_{0pN}(a) \right) \right)\end{aligned}\quad (30)$$

Во избежание дополнительного усложнения вычислений, хотя оно и обеспечило бы дополнительную их точность, для частного случая примем $p = 6$, $N = 1$. Согласно (28)–(31), в этом случае для системного анализа используется комплекс из аксиологических Λ_{61} , $\bar{\Lambda}_{61}$ и определяющих их каузальных $\hat{r}_{\bar{\alpha}61}(a)$, $\dot{\hat{r}}_{\bar{\alpha}61}(a)$ числовых характеристик, которые, в свою очередь, определяются набором $3 \cdot 6 + 6 \cdot 1 + 6 = 30$ параметров $A_{\bar{a}q}$, $a_{\bar{a}0}$, $a_{\bar{a}1}$, $b_{\bar{a}1}$, $q = \bar{0}, \bar{6}$, которые находятся решением системы 30 нелинейных алгебраических уравнений вида (23)–(27), конкретный вид которых определим далее.

Определенные (19) быстрые полиномы имеют вид

$$\begin{aligned}P_0(t) &= \frac{t}{2a}, \quad P_1(t) = \frac{t^2}{4a}, \quad P_2(t) = \frac{t^3}{12a} - \frac{at}{12}, \quad P_3(t) = \frac{t^4}{48a} - \frac{at^2}{24}, \\ P_4(t) &= \frac{t^5}{240a} - \frac{at^3}{72} + \frac{7a^3t}{720}, \quad P_5(t) = \frac{t^6}{1440a} - \frac{at^4}{288} + \frac{7a^3t^2}{1440}, \\ P_6(t) &= \frac{t^7}{10080a} - \frac{at^5}{1440} + \frac{7a^3t^3}{4320} - \frac{31a^5t}{30240}.\end{aligned}\quad (32)$$

Производные $r_\alpha^{(s)}$, $s = \bar{3}, \bar{6}$ и $r_0^{(s)}$, $s = \bar{2}, \bar{6}$ получаются многократным дифференцированием (2), (11):

$$\ddot{r}_\alpha = \frac{1}{m_{F\alpha}} \left(m_\alpha \ddot{r}_\alpha - \frac{C}{(r_1 + r_2)^2} \right); \quad (33)$$

$$r_\alpha^{(4)} = \frac{1}{m_{F\alpha}} \left(m_\alpha \ddot{r}_\alpha + \frac{2C(\dot{r}_1 + \dot{r}_2)}{(r_1 + r_2)^3} \right); \quad (34)$$

$$r_\alpha^{(5)} = \frac{1}{m_{F\alpha}} \left(m_\alpha r_\alpha^{(4)} + \frac{2C}{(r_1 + r_2)^3} \left(\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2 - \frac{3(\dot{r}_1 + \dot{r}_2)^2}{r_1 + r_2} \right) \right); \quad (35)$$

$$r_\alpha^{(6)} = \frac{1}{m_{F\alpha}} \left(m_\alpha r_\alpha^{(5)} + \frac{2C}{(r_1 + r_2)^3} \left(\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2 - \frac{9(\dot{r}_1 + \dot{r}_2)(\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2)}{r_1 + r_2} + \frac{12(\dot{r}_1 + \dot{r}_2)^3}{(r_1 + r_2)^2} \right) \right); \quad (36)$$

$$\ddot{r}_0 = \frac{C_0}{r_0^2}; \quad (37)$$

$$\ddot{r}_0 = -\frac{2C_0\dot{r}_0}{r_0^3}; \quad (38)$$

$$r_0^{(4)} = \frac{2C_0}{r_0^3} \left(\frac{3\dot{r}_0^2}{r_0} - \ddot{r}_0 \right); \quad (39)$$

$$r_0^{(5)} = \frac{2C_0}{r_0^3} \left(\frac{3\dot{r}_0}{r_0} \left(3\ddot{r}_0 - \frac{4\dot{r}_0^2}{r_0} \right) - \ddot{r}_0 \right); \quad (40)$$

$$r_0^{(6)} = \frac{2C_0}{r_0^3} \left(\frac{3}{r_0} \left(4\dot{r}_0 \left(\frac{\dot{r}_0}{r_0} \left(\frac{5\dot{r}_0^2}{r_0} - 6\ddot{r}_0 \right) + \ddot{r}_0 \right) + 3\ddot{r}_0^2 \right) - r_0^{(4)} \right). \quad (41)$$

Подстановка $t = -a$ в (33)–(41) с учетом (7), (12), (14), (15) дает:

$$\ddot{r}_\alpha(-a) = \frac{1}{m_{F\alpha}} \left(m_\alpha R_{2\alpha} - \frac{C}{R_0^2} \right); \quad (42)$$

$$r_\alpha^{(4)}(-a) = \frac{m_\alpha}{m_{F\alpha}} \ddot{r}_\alpha(-a); \quad (43)$$

$$r_\alpha^{(5)}(-a) = \frac{1}{m_{F\alpha}} \left(m_\alpha r_\alpha^{(4)}(-a) + \frac{2C}{R_0^3} (R_{21} + R_{22}) \right); \quad (44)$$

$$r_\alpha^{(6)}(-a) = \frac{1}{m_{F\alpha}} \left(m_\alpha r_\alpha^{(5)}(-a) + \frac{2C}{R_0^3} (\ddot{r}_1(-a) + \ddot{r}_2(-a)) \right); \quad (45)$$

$$\ddot{r}_0(-a) = \frac{C_0}{r_0^2(-a)}; \quad (46)$$

$$\ddot{r}_0(-a) = r_0^{(5)}(-a) = 0; \quad (47)$$

$$r_0^{(4)}(-a) = -\frac{2C_0}{r_0^3(-a)} \ddot{r}_0(-a); \quad (48)$$

$$r_0^{(6)}(-a) = -\frac{11C_0}{r_0^3(-a)} r_0^{(4)}(-a). \quad (49)$$

Из (21), (22), (32) получаем функции $\hat{r}_{\bar{\alpha}61}^{(s)}(t)$, $\hat{r}_{\bar{\alpha}61}^{(s)}(-a)$, $s = \overline{0,6}$ тридцати неизвестных параметров $A_{\bar{\alpha}q}$, $a_{\bar{\alpha}0}$, $a_{\bar{\alpha}1}$, $b_{\bar{\alpha}1}$, $q = \overline{0,6}$:

$$\begin{aligned} \hat{r}_{\bar{\alpha}61}(t) = & A_{\bar{\alpha}0} \frac{t}{2a} + A_{\bar{\alpha}1} \frac{t^2}{4a} + A_{\bar{\alpha}2} \left(\frac{t^3}{12a} - \frac{at}{12} \right) + A_{\bar{\alpha}3} \left(\frac{t^4}{48a} - \frac{at^2}{24} \right) + \\ & + A_{\bar{\alpha}4} \left(\frac{t^5}{240a} - \frac{at^3}{72} + \frac{7a^3t}{720} \right) + A_{\bar{\alpha}5} \left(\frac{t^6}{1440a} - \frac{at^4}{288} + \frac{7a^3t^2}{1440} \right) + \\ & + \frac{A_{\bar{\alpha}6}}{1440} \left(\frac{t^7}{7a} - at^5 + \frac{7a^3t^3}{3} - \frac{31a^5t}{21} \right) + a_{\bar{\alpha}0} + a_{\bar{\alpha}1} \cos \frac{\pi t}{a} + b_{\bar{\alpha}1} \sin \frac{\pi t}{a} \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{r}}_{\bar{a}61}(t) = & \frac{A_{\bar{a}0}}{2a} + \frac{A_{\bar{a}1}t}{2a} + A_{\bar{a}2} \left(\frac{t^2}{4a} - \frac{a}{12} \right) + A_{\bar{a}3} \left(\frac{t^3}{12a} - \frac{at}{12} \right) + \\ & + A_{\bar{a}4} \left(\frac{t^4}{48a} - \frac{at^2}{24} + \frac{7a^3}{720} \right) + A_{\bar{a}5} \left(\frac{t^5}{240a} - \frac{at^3}{72} + \frac{7a^3t}{720} \right) + \\ & + A_{\bar{a}6} \left(\frac{t^6}{1440a} - \frac{at^4}{288} + \frac{7a^3t^2}{1440} - \frac{31a^5}{30240} \right) + \left(\frac{\pi}{a} \right) \left(b_{\bar{a}1} \cos \frac{\pi t}{a} - a_{\bar{a}1} \sin \frac{\pi t}{a} \right) \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{r}}_{\bar{a}61}(t) = & \frac{A_{\bar{a}1}}{2a} + \frac{A_{\bar{a}2}t}{2a} + A_{\bar{a}3} \left(\frac{t^2}{4a} - \frac{a}{12} \right) + \\ & + A_{\bar{a}4} \left(\frac{t^3}{12a} - \frac{at}{12} \right) + A_{\bar{a}5} \left(\frac{t^4}{48a} - \frac{at^2}{24} + \frac{7a^3}{720} \right) + \\ & + A_{\bar{a}6} \left(\frac{t^5}{240a} - \frac{at^3}{72} + \frac{7a^3t}{720} \right) - \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \left(a_{\bar{a}1} \cos \frac{\pi t}{a} + b_{\bar{a}1} \sin \frac{\pi t}{a} \right) \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{r}}_{\bar{a}61}(t) = & \frac{A_{\bar{a}2}}{2a} + \frac{A_{\bar{a}3}t}{2a} + A_{\bar{a}4} \left(\frac{t^2}{4a} - \frac{a}{12} \right) + A_{\bar{a}5} \left(\frac{t^3}{12a} - \frac{at}{12} \right) + \\ & + A_{\bar{a}6} \left(\frac{t^4}{48a} - \frac{at^2}{24} + \frac{7a^3}{720} \right) + \left(\frac{\pi}{a} \right)^3 \left(a_{\bar{a}1} \sin \frac{\pi t}{a} - b_{\bar{a}1} \cos \frac{\pi t}{a} \right) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \hat{r}_{\bar{a}61}^{(4)}(t) = & \frac{A_{\bar{a}3}}{2a} + \frac{A_{\bar{a}4}t}{2a} + A_{\bar{a}5} \left(\frac{t^2}{4a} - \frac{a}{12} \right) + \\ & + A_{\bar{a}6} \left(\frac{t^3}{12a} - \frac{at}{12} \right) + \left(\frac{\pi}{a} \right)^4 \left(a_{\bar{a}1} \cos \frac{\pi t}{a} + b_{\bar{a}1} \sin \frac{\pi t}{a} \right) \end{aligned} \quad (54)$$

$$\hat{r}_{\bar{a}61}^{(5)}(t) = \frac{A_{\bar{a}4}}{2a} + \frac{A_{\bar{a}5}t}{2a} + A_{\bar{a}6} \left(\frac{t^2}{4a} - \frac{a}{12} \right) + \left(\frac{\pi}{a} \right)^5 \left(b_{\bar{a}1} \cos \frac{\pi t}{a} - a_{\bar{a}1} \sin \frac{\pi t}{a} \right); \quad (55)$$

$$\hat{r}_{\bar{a}61}^{(6)}(t) = \frac{A_{\bar{a}5}}{2a} + \frac{A_{\bar{a}6}t}{2a} - \left(\frac{\pi}{a} \right)^6 \left(a_{\bar{a}1} \cos \frac{\pi t}{a} + b_{\bar{a}1} \sin \frac{\pi t}{a} \right); \quad (56)$$

$$\hat{r}_{\bar{a}61}(-a) = -\frac{1}{2} A_{\bar{a}0} + \frac{a}{4} A_{\bar{a}1} - \frac{a^3}{48} A_{\bar{a}3} + \frac{a^5}{480} A_{\bar{a}5} + a_{\bar{a}0} - a_{\bar{a}1}; \quad (57)$$

$$\dot{\hat{r}}_{\bar{a}61}(-a) = \frac{1}{2a} A_{\bar{a}0} - \frac{1}{2} A_{\bar{a}1} + \frac{a}{6} A_{\bar{a}2} - \frac{a^3}{90} A_{\bar{a}4} + \frac{a^5}{945} A_{\bar{a}6} - \left(\frac{\pi}{a} \right) b_{\bar{a}1}; \quad (58)$$

$$\ddot{\hat{r}}_{\bar{a}61}(-a) = \frac{1}{2a} A_{\bar{a}1} - \frac{1}{2} A_{\bar{a}2} + \frac{a}{6} A_{\bar{a}3} - \frac{a^3}{90} A_{\bar{a}5} + \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 a_{\bar{a}1}; \quad (59)$$

$$\ddot{\hat{r}}_{\bar{a}61}(-a) = \frac{1}{2a} A_{\bar{a}2} - \frac{1}{2} A_{\bar{a}3} + \frac{a}{6} A_{\bar{a}4} - \frac{a^3}{90} A_{\bar{a}6} + \left(\frac{\pi}{a} \right)^3 b_{\bar{a}1}; \quad (60)$$

$$\hat{r}_{\bar{a}61}^{(4)}(-a) = \frac{1}{2a} A_{\bar{a}3} - \frac{1}{2} A_{\bar{a}4} + \frac{a}{6} A_{\bar{a}5} - \left(\frac{\pi}{a} \right)^4 a_{\bar{a}1}; \quad (61)$$

$$\hat{r}_{\bar{\alpha}61}^{(5)}(-a) = \frac{1}{2a} A_{\bar{\alpha}4} - \frac{1}{2} A_{\bar{\alpha}5} + \frac{a}{6} A_{\bar{\alpha}6} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^5 b_{\bar{\alpha}1}; \quad (62)$$

$$\hat{r}_{\bar{\alpha}61}^{(6)}(-a) = \frac{1}{2a} A_{\bar{\alpha}5} - \frac{1}{2} A_{\bar{\alpha}6} + \left(\frac{\pi}{a}\right)^6 a_{\bar{\alpha}m}. \quad (63)$$

Система уравнений (23)–(27), в которой функции $r_{\bar{\alpha}}^{(s)}(-a)$, $\hat{r}_{\bar{\alpha}61}^{(s)}(t)$, $\hat{r}_{\bar{\alpha}61}^{(s)}(-a)$ определены равенствами (7), (12), (14), (15), (42)–(63), принимает конкретный вид:

$$\hat{r}_{\bar{\alpha}61}^{(s)}(-a) = r_{\bar{\alpha}}^{(s)}(-a), \quad s = \overline{0,6}; \quad (64)$$

$$\int_{-a}^a \left(m_{\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha61}(t) - m_{F\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha61}(t) \right) \left(\hat{r}_{161}(t) + \hat{r}_{261}(t) \right)^2 dt = 2aC; \quad (65)$$

$$\int_{-a}^a \left(m_{\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha61}(t) - m_{F\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha61}(t) \right) \left(\hat{r}_{161}(t) + \hat{r}_{261}(t) \right)^2 \cos \frac{\pi t}{a} dt = 0; \quad (66)$$

$$\int_{-a}^a \left(m_{\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha61}(t) - m_{F\alpha} \ddot{\hat{r}}_{\alpha61}(t) \right) \left(\hat{r}_{161}(t) + \hat{r}_{261}(t) \right)^2 \sin \frac{\pi t}{a} dt = 0; \quad (67)$$

$$\int_{-a}^a \ddot{\hat{r}}_{061}(t) \cdot \hat{r}_{061}^2(t) dt = 2aC_0; \quad (68)$$

$$\int_{-a}^a \ddot{\hat{r}}_{061}(t) \cdot \hat{r}_{061}^2(t) \cos \frac{\pi t}{a} dt = 0; \quad (69)$$

$$\int_{-a}^a \ddot{\hat{r}}_{061}(t) \cdot \hat{r}_{061}^2(t) \sin \frac{\pi t}{a} dt = 0. \quad (70)$$

IV. Результаты расчетов и их обсуждение

Для проверки работоспособности предлагаемой методики решения поставленной задачи системного анализа проведем вычислительный эксперимент для частного случая одинаковых ЗМТ с равными начальными ускорениями: $m_{\alpha} = m$, $Q_{\alpha} = Q$, $R_{2\alpha} = R_2$. Тогда $r_{\alpha} \equiv r$, $\bar{r}_{\alpha} \equiv r_0$, $\tilde{r}_{\alpha} \equiv \tilde{r} \equiv r_0 - r$. В целом основываясь на системе единиц СИ, расстояние все же будем измерять не в метрах, а в световых секундах (с. с.). Тогда пересчитанная постоянная скорости света оказывается единичной, а пересчитанная электрическая постоянная равна $\bar{\varepsilon}_0 = c^3 \varepsilon_0$ с.с.⁻³ кг⁻¹ с⁴ А². Для задания соотношения между массой и зарядом ЗМТ введем параметр

$$\theta = 6\pi \bar{\varepsilon}_0 \frac{m}{Q^2}. \quad (71)$$

С учетом (71) системы уравнений (2), (11) принимают соответственно вид:

$$(\theta \ddot{r} - \ddot{r}) r^2 = 0,375, \quad (72)$$

$$\ddot{r}_0 r_0^2 = 0,375/\theta. \quad (73)$$

При этом уравнение (73) есть уравнение (11) с правой частью $C_0 = 0,375/\theta$.

Из-за тормозящего действия силы радиационного трения начальное ускорение для уравнения (72) нужно задавать несколько меньшим, чем начальное ускорение, получающееся для уравнения (73):

$$R_2 = \xi \ddot{r}_0(-a), \quad 0 < \xi < 1. \quad (74)$$

Для данного частного случая примем следующие исходные данные задания задач Коши: $T = R_0 = 2$, $\theta = 1$, $\xi = 0,8$. Тогда $a = T/2 = 1$, а из (7), (12), (14), (15), (46), (74) определяются начальные условия для задач Коши для уравнений (73), (72):

$$r_0(-a) = R_0/2 = 1, \dot{r}_0(-a) = 0; \quad (75)$$

$$r(-a) = R_0/2 = 1, \dot{r}(-a) = 0, \ddot{r}(-a) = R_2 = \xi \ddot{r}_0(-a) = \frac{\xi C_0}{r_0^2(-a)} = 0,3. \quad (76)$$

Для приближенного решения задач Коши (72), (76) и (73), (75) в виде быстрых разложений (50) решается система уравнений (64)–(70) с учетом (42)–(50), (52), (53), (57)–(63), (75), (76), и полученное решение этой системы подставляется в (50). А подстановка этого же решения системы в (51)–(56) дает производные первых шести порядков данных приближенных решений данных задач Коши. В результате этих подстановок в (50)–(56) получаются функции $\hat{r}_{\alpha 61}^{(s)}(t) \equiv \hat{r}_{61}^{(s)}(t)$, $\hat{r}_{061}^{(s)}(t)$, $s = \overline{0,6}$, подстановка в которые $t = a$ дает соответствующие каузальные характеристики $\hat{r}_{61}^{(s)}(a)$, $\hat{r}_{061}^{(s)}(a)$, $s = \overline{0,6}$. После этого, согласно (29), определяются функции $\check{r}_{\alpha 61}^{(s)}(t) \equiv \check{r}_{61}^{(s)}(t) \equiv \hat{r}_{061}^{(s)}(t) - \hat{r}_{61}^{(s)}(t)$, $s = \overline{0,6}$, подстановка в которые $t = a$ дает дополнительные каузальные характеристики $\check{r}_{61}^{(s)}(a)$, $s = \overline{0,6}$. Но для определения аксиологических характеристик $\Lambda_{61} \equiv \Lambda_{\alpha 61}$, $\bar{\Lambda}_{61} \equiv \bar{\Lambda}_{\alpha 61}$ по формулам (30), (31) используются лишь каузальные характеристики $\hat{r}_{61}(a)$, $\dot{\hat{r}}_{61}(a)$, $\hat{r}_{061}(a)$, $\dot{\hat{r}}_{061}(a)$ при заданных исходных данных системного анализа $r_{\alpha \min} = r_{\min}$, $r_{\alpha \max} = r_{\max}$, $v_{\alpha \min} = v_{\min}$, $v_{\alpha \max} = v_{\max}$. Результаты расчета каузальных характеристик сведены в табл. 1, где в первой, четвертой и седьмой строках представлены обозначения системных характеристик, второй, пятой и восьмой – обозначения соответствующих каузальных характеристик, а в третьей, шестой и девятой – значения этих каузальных характеристик, являющиеся приближенными значениями соответствующих системных характеристик. Используемые для расчетов по формулам (30), (31) значения выделены полужирным шрифтом.

Пример нахождения значений аксиологических характеристик по формулам (30), (31), исходя из выделенных в табл. 1 значений каузальных характеристик, представлен в табл. 2. В первых четырех столбцах приведены исходные данные, в остальных двух – результаты. Наглядно динамика сложной системы показана на рис. 1 (верхняя кривая – график функции $\hat{r}_{061}(t) \approx r_0(t)$, средняя – функции $\hat{r}_{61}(t) \approx r(t)$, нижняя – функции $\check{r}_{61}(t) \approx \check{r}(t)$) и на рис. 2 (верхняя кривая – график функции $\dot{\hat{r}}_{061}(t) \approx \dot{r}_0(t)$, средняя – функции $\dot{\hat{r}}_{61}(t) \approx \dot{r}(t)$, нижняя – функции $\dot{\check{r}}_{61}(t) \approx \dot{\check{r}}(t)$). Функции $\check{r}_{61}(t)$ и $\dot{\check{r}}_{61}(t)$ показывают влияние силы радиационного трения на динамику системы.

Таким образом, в данном примере получается, что без учета силы радиационного трения полученная аксиологическая характеристика $\bar{\Lambda}_{61} = 1$ свидетельствует о своевременном достижении цели системы, но с учетом этой силы уточненная аксиологическая характеристика $\Lambda_{61} = 0$ свидетельствует об обратном, что и характеризует важность такого учета.

Таблица 1
Table 1

Результаты расчета каузальных характеристик
Results of calculation of causal characteristics

$r(a)$	$\dot{r}(a)$	$\ddot{r}(a)$	$\dddot{r}(a)$	$r^{(4)}(a)$	$r^{(5)}(a)$	$r^{(6)}(a)$
$\hat{r}_{61}(a)$	$\dot{\hat{r}}_{61}(a)$	$\ddot{\hat{r}}_{61}(a)$	$\dddot{\hat{r}}_{61}(a)$	$\hat{r}_{61}^{(4)}(a)$	$\hat{r}_{61}^{(5)}(a)$	$\hat{r}_{61}^{(6)}(a)$
1,488	0,441	0,170	-0,000	0,092	-0,011	-0,220
$r(a)$	$\dot{r}(a)$	$\ddot{r}(a)$	$\dddot{r}(a)$	$r^{(4)}(a)$	$r^{(5)}(a)$	$r^{(6)}(a)$
$\hat{r}_{061}(a)$	$\dot{\hat{r}}_{061}(a)$	$\ddot{\hat{r}}_{061}(a)$	$\dddot{\hat{r}}_{061}(a)$	$\hat{r}_{061}^{(4)}(a)$	$\hat{r}_{061}^{(5)}(a)$	$\hat{r}_{061}^{(6)}(a)$
1,624	0,537	0,143	-0,082	0,160	0,369	0,814
$\tilde{r}(a)$	$\dot{\tilde{r}}(a)$	$\ddot{\tilde{r}}(a)$	$\dddot{\tilde{r}}(a)$	$\tilde{r}^{(4)}(a)$	$\tilde{r}^{(5)}(a)$	$\tilde{r}^{(6)}(a)$
$\tilde{r}_{61}(a)$	$\dot{\tilde{r}}_{61}(a)$	$\ddot{\tilde{r}}_{61}(a)$	$\dddot{\tilde{r}}_{61}(a)$	$\tilde{r}_{61}^{(4)}(a)$	$\tilde{r}_{61}^{(5)}(a)$	$\tilde{r}_{61}^{(6)}(a)$
0,137	0,096	-0,027	-0,081	0,068	0,380	1,034

Таблица 2
Table 2

Пример нахождения значений аксиологических характеристик
Example of finding the values of axiological characteristics

$r_{\min}$	$r_{\max}$	$v_{\min}$	$v_{\max}$	Λ_{61}	$\bar{\Lambda}_{61}$
1,5	$+\infty$	0,5	$+\infty$	0	1

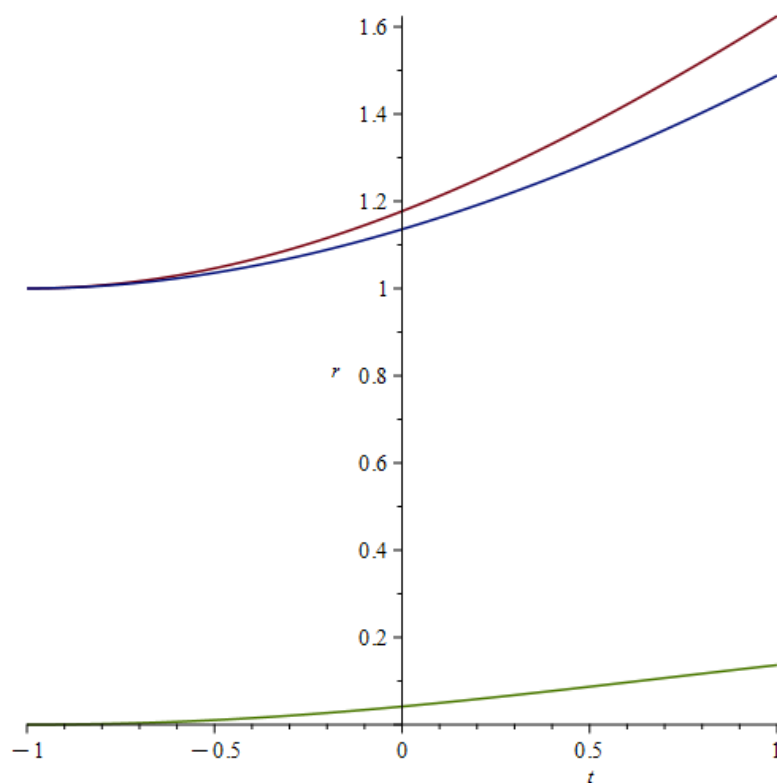


Рис. 1. Графики траекторий ЗМТ
Fig. 1. Graphs of CMP trajectories

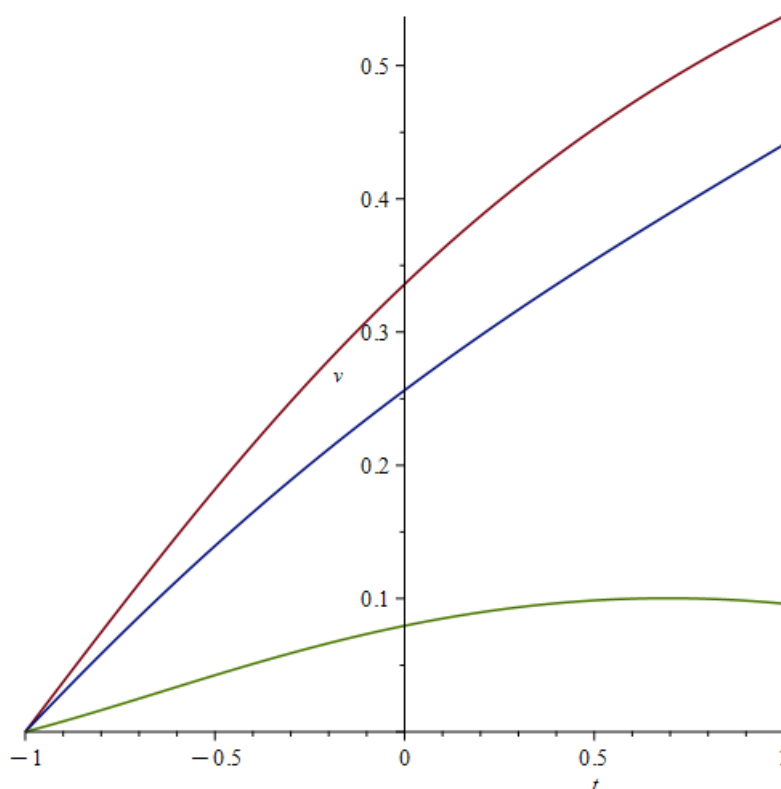


Рис. 2. Графики скоростей ЗМТ
Fig. 2. CMP speed graphs

V. Заключение

Итак, в настоящей работе разработан такой способ проведения с использованием метода быстрых разложений классического гармонического системного анализа на основе комплекса аксиологического и каузального представлений моделей при обработке информации в процессе математического моделирования дального действия сложных нелинейных систем ЗМТ, который показал свою работоспособность на примере системы взаимно отталкивающихся в вакууме с радиационным трением двух ЗМТ. Это означает распространение метода быстрых разложений в рамках классического гармонического системного анализа на основе комплекса аксиологического и каузального представлений моделей с математического моделирования близкого действия физических полей и сплошных материальных сред на математическое моделирование дального действия сложных нелинейных систем ЗМТ. Использование метода быстрых разложений при этом приводит к формированию каузального представления, основанного на аппроксимации траекторий ЗМТ быстрыми разложениями, параметры которых находятся решением системы нелинейных алгебраических уравнений, соответствующей системе нелинейных дифференциальных уравнений (в рассмотренном примере она имеет третий порядок), моделирующей дальное действие. Таким образом, цель работы достигнута. Тем самым на данном примере отработано комплексное применение методов системного анализа (посредством использования аксиологического представления) и методов классического гармонического анализа (посредством использования каузального представления) к задачам классической математической физики при математическом моделировании дального действия сложных нелинейных систем ЗМТ, что лежит в русле появления и развития классического гармонического системного анализа как одного из перспективных направлений системного анализа. Его методы естественно применять для анализа, синтеза и управления техническими устройствами, подчиняющимися законам классической физики, путем надлежащей обработки информации в процессе их

моделирования, как моделей динамики сложных систем, дающего возможность оценивать достижимость цели системой и другие родственные характеристики (например, своевременность достижения цели).

Список литературы

- Владимиров Ю.С. 2012. Между физикой и метафизикой: в 5 кн. Кн. 4: Вслед за Лейбницем и Махом. М.: ЛИБРОКОМ, 272 с.
- Волкова В.Н., Денисов А.А. 2021. Теория систем и системный анализ: учебник для вузов. 3-е изд. М.: Юрайт, 562 с.
- Гинзбург В.Л. 1969. Об излучении и силе радиационного трения при равномерно ускоренном движении заряда. *УФН*, Т. 98. Вып. 3: 569–585.
- Дубровин А.С. 2019. От дальнего действия Фоккера-Фейнмана к гиперконтинуальному дальнему действию. LV Всерос. конф. по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники: тезисы докладов. М.: Изд-во РУДН, 38–41.
- Дубровин А.С. 2013а. Алгебраические свойства функций одномерных синусоидальных волн и пространство-время. *Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика*, № 1: 5–19.
- Дубровин А.С. 2013б. Теоретико-групповое исследование гиперконтинуальных математических моделей. *Вестник Воронежского института ФСИИ России*, № 1: 71–76.
- Дубровин А.С. 2018. Гиперконтинуальная модель инертности и электрической силы заряженной материальной точки в вакууме. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 5: 318–328.
- Дубровин А.С. 2023а. Гармонический системный анализ и обработка информации в модели дальнего действия взаимно отталкивающихся точечных зарядов. *Вестник Воронежского института ФСИИ России*, № 2: 42–49.
- Дубровин А.С. 2023б. Квантовый полумарковский системный анализ и обработка информации в стохастической модели с взаимно несовместимыми состояниями. *Вестник Воронежского института ФСИИ России*, № 3: 60–66.
- Дубровин А.С. 2024. Квантовый полумарковский системный анализ и обработка информации в стохастической модели с интерферирующими нецелевыми состояниями. *Вестник воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, № 2: 25–38.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. 2020. Теоретическая физика: учебное пособие: в 10 томах; под редакцией Л. П. Питаевского. 9-е изд., стереотип. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2020. Том 2: Теория поля, 508 с.
- Лешонков О.В. 2018. Исследование некоторых математических моделей методом быстрых разложений: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 16 с.
- Лыков А.В. 1967. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 600 с.
- Моисеев Н.Н. 2013. Математические задачи системного анализа М.: URSS, 532 с.
- Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. 1989. Введение в системный анализ: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 367 с.
- Соколов И.В. 2009. Перенормировка уравнения Лоренца-Абрагама-Дирака для радиационной силы в классической электродинамике. *ЖЭТФ*, Т. 136. Вып. 2(8): 247–253.
- Стейн И., Вейс Г. 1974. Введение в гармонический анализ на евклидовых пространствах: пер. с англ. В.В. Жаринова; под ред. Е.Д. Соломенцева и С.Б. Стечкина. М.: Мир, 332 с.
- Тарасенко Ф.П. 2004. Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем): учебник. Томск: Изд-во Том. ун-та, 186 с.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж. 1979. Теория упругости: пер. с англ.; под ред. Г. С. Шапиро. 2-е изд. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 560 с.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. 1999. Уравнения математической физики: учеб. пособие. 6-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГУ, 799 с.
- Толстов Г.П. 1980. Ряды Фурье. 3-е изд., испр. М.: Наука, 381 с.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. 1977. Электродинамика: пер. с англ.; под ред. Я. А. Смородинского. 2-е изд. М.: Мир, 350 с.
- Чернышов А.Д. 2014. Метод быстрых разложений для решения нелинейных дифференциальных уравнений. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, № 1. Т. 54: 13–24.
- Чернышов А.Д., Горайнов В.В., Лешонков О.В., Соболева Е.А., Никифорова О.Ю. 2019. Сравнение

скорости сходимости быстрых разложений с разложениями в классический ряд Фурье. *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, № 1: 27–34.

Poisson E. 1999. An introduction to the Lorentz-Dirac equation. arXiv preprint arXiv:gr-qc/9912045. DOI: 10.48550/arXiv.gr-qc/9912045.

Wheeler J.A., Feynman R.P. 1945. Interaction with absorber as the mechanism of radiation. *Rev. Mod. Phys*, Vol. 17: 157–181.

References

- Vladimirov Yu.S. 2012. Between physics and metaphysics: in 5 books. Book 4: Following Leibniz and Mach. Moscow: LIBROKOM, 272 p.
- Volkova V.N., Denisov A.A. 2021. Systems theory and systems analysis: textbook for universities. 3rd ed. Moscow: Yurait, 562 p.
- Ginzburg V.L. 1969. On radiation and the force of radiation friction during uniformly accelerated motion of a charge. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, Vol. 98. Issue 3: 569–585.
- Dubrov A.S. 2019. From Fokker-Feynman action at a distance to hypercontinuous action at a distance. LV All-Russian Conf. on the problems of dynamics, particle physics, plasma physics and optoelectronics: abstracts of reports. Moscow: RUDN University Press, 38–41.
- Dubrov A.S. 2013a. Algebraic properties of one-dimensional sinusoidal wave functions and space-time. *VSU Bulletin. Series: Physics. Mathematics*, No. 1: 5–19.
- Dubrov A.S. 2013b. Group-theoretical study of hypercontinuous mathematical models. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, No. 1: 71–76.
- Dubrov A.S. 2018. Hypercontinuous model of inertia and electric force of a charged material point in vacuum. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 5: 318–328.
- Dubrov A.S. 2023a. Harmonic system analysis and information processing in the long-range model of mutually repulsive point charges. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, No. 2: 42–49.
- Dubrov A.S. 2023b. Quantum semi-Markov system analysis and information processing in a stochastic model with mutually incompatible states. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, No. 3: 60–66.
- Dubrov A.S. 2024. Quantum semi-Markov system analysis and information processing in a stochastic model with interfering non-target states. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*, No. 2: 25–38.
- Landau L.D., Lifshits E.M. 2020. Theoretical Physics: a textbook: in 10 volumes; edited by L. P. Pitaevsky. 9th ed., stereotype. Moscow: FIZMATLIT, 2020. Volume 2: Field Theory, 508 p.
- Leshonkov O. V. 2018. Study of Some Mathematical Models by the Fast Expansion Method: Abstract of Cand. Sci. (Phys. and Mathematics). Voronezh, 16 p.
- Lykov A.V. 1967. Theory of Heat Conduction. Moscow: Higher School, 600 p.
- Moiseev N. N. 2013. Mathematical Problems of Systems Analysis Moscow: URSS, 532 p.
- Peregudov F.I., Tarasenko F.P. 1989. Introduction to Systems Analysis: a textbook for universities. M.: Vyssh. shk., 367 p.
- Sokolov I.V. 2009. Renormalization of the Lorentz-Abraham-Dirac Equation for the Radiation Force in Classical Electrodynamics. *JETP*, Vol. 136. Issue 2(8): 247–253.
- Stein I., Weiss G. 1974. Introduction to Harmonic Analysis on Euclidean Spaces: trans. from English by V.V. Zharinov; edited by E.D. Solomentsev and S.B. Stechkin. M.: Mir, 332 p.
- Tarasenko F.P. 2004. Applied Systems Analysis (Science and Art of Problem Solving): Textbook. Tomsk: Tomsk University Press, 186 p.
- Timoshenko S.P., Goodyer J. 1979. Theory of Elasticity: trans. from English; edited by G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow: Nauka. Chief Ed. of Phys.-Math. Literature, 560 p.
- Tikhonov A.N., Samarskii A.A. 1999. Equations of Mathematical Physics: Textbook. Manual. 6th ed., corrected and enlarged. Moscow: Moscow State University Press, 799 p.
- Tolstov G.P. 1980. Fourier Series. 3rd ed., corrected. Moscow: Nauka, 381 p.
- Feynman R., Leighton R., Sands M. 1977. Electrodynamics: trans. from English; edited by Ya.A. Smorodinskii. 2nd ed. M.: Mir, 350 p.
- Chernyshov A.D. 2014. The method of fast expansions for solving nonlinear differential equations. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, No. 1. Vol. 54: 13–24.
- Chernyshov A.D., Goryainov V.V., Leshonkov O.V., Soboleva E.A., Nikiforova O.Yu. 2019. Comparison of

the convergence rate of fast expansions with expansions in the classical Fourier series. *VSU Bulletin. Series: System Analysis and Information Technology*, No. 1: 27–34.

Poisson E. 1999. An introduction to the Lorentz-Dirac equation. arXiv preprint arXiv:gr-qc/9912045. DOI: 10.48550/arXiv.gr-qc/9912045.

Wheeler J.A., Feynman R.P. 1945. Interaction with absorber as the mechanism of radiation. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 17: 157–181.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 15.06.2025

Поступила после рецензирования 25.08.2025

Принята к публикации 04.09.2025

Received June 15, 2025

Revised August 25, 2025

Accepted September 04, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дубровин Анатолий Станиславович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники и информационных систем, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

Сумин Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных систем, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

Кравченко Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительной техники и информационных систем, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly S. Dubrovin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Computer Science and Information Systems, Voronezh State University of Forestry and Technologies Named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Viktor I. Sumin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Science and Information Systems, Voronezh State University of Forestry and Technologies Named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Andrey S. Kravchenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Information Systems, Voronezh State University of Forestry and Technologies Named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ SYSTEM ANALYSIS AND MANAGEMENT

УДК 004.94:303.732

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-642-653

EDN OZLRFB

Преобразование диаграммы BPMN в УФО-диаграмму

¹Зимовец О.А., ²Малкуш Е.В., ²Маторин С.И., ²Жихарев А.Г.

¹ ООО «Научно-производственное объединение “Технологии надежности”»

Россия, г. Белгород, ул. Королева, 2А

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85

ozimovets@mail.ru, malkush@bsuedu.ru, matorin@bsuedu.ru, zhikharev@bsuedu.ru

Аннотация. Для моделирования деятельности используются различные графические нотации. На данный момент самой используемой можно назвать нотацию BPMN. У данной нотации есть ряд возможностей и достоинств по отношению к другим нотациям, и ряд специалистов в данной области рекомендуют использовать именно её. Если использовать все возможности нотации по максимуму, то для того, чтобы разобраться во всех схемах, необходимы консультации специалистов и дополнительное обучение, следовательно, маловероятно, что нотация будет полностью понятна именно управленческому составу. Таким образом, для упрощения работы с данной нотацией возникает необходимость преобразования из одной диаграммы BPMN в другую, например, УФО-диаграмму. Целью данного исследования является разработка методики построения иерархических многоуровневых моделей, в которой верхний уровень – это контекст исполнения всего процесса, средний – это логика исполнения процесса, а нижний – детали реализации. В данной работе описана процедура преобразования диаграммы BPMN в УФО-диаграмму, описан алгоритм этой процедуры, а также приведен пример преобразования BPMN-диаграммы «Обработка запроса о товарах».

Ключевые слова: нотация BPMN, УФО-диаграмма, УФО-элемент, УФО-подход, алгоритм преобразования

Для цитирования: Зимовец О.А., Малкуш Е.В., Маторин С.И., Жихарев А.Г. 2025. Преобразование диаграммы BPMN в УФО-диаграмму. *Экономика. Информатика*, 52(3): 642–653. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-642-653. EDN OZLRFB

Converting a BPMN Diagram to a UFO Diagram

¹ Olga A. Zimovets, ² Elena V. Malkush, ² Sergey I. Matorin, ² Aleksandr G. Zhikharev

¹ Scientific and Production Association “Reliability Technologies”

2A Korolev St., Belgorod 308033, Russia

² Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

ozimovets@mail.ru, malkush@bsuedu.ru, matorin@bsuedu.ru, zhikharev@bsuedu.ru

Abstract. Various graphical notations are used to model activities. At the moment, the BPMN notation is the most widely used one. It has a number of features and advantages over other notations, and many experts in this field recommend using it. For applying all the features of the notation to the maximum, one needs specialist consultation and additional training in order to understand all the diagrams. Therefore, it is unlikely that the

© Зимовец О.А., Малкуш Е.В., Маторин С.И., Жихарев А.Г., 2025

notation will be completely understandable to the management staff. Thus, to simplify the work with this notation, there is a need to transform from one BPMN diagram to another, for example, a UFO diagram. The purpose of this study is to develop a methodology for constructing hierarchical multi-level models in which the top level is the context of execution of the entire process, the middle level is the logic of process execution, and the bottom level is the implementation details. This paper describes the procedure for converting a BPMN diagram to a UFO diagram, specifies the algorithm for this procedure, and provides an example of converting the BPMN diagram “Processing a request for goods”.

Keywords: BPMN notation, UFO diagram, UFO element, UFO approach, transformation algorithm

For citation: Zimovets O.A., Malkush E.V., Matorin S.I., Zhikharev A.G. 2025. Converting a BPMN Diagram to a UFO Diagram. *Economics. Information technologies*, 52(3): 642–653 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-642-653. EDN OZLRFB

Введение

Для моделирования деятельности в интересах организационного проектирования и проектирования ПО используются различные графические нотации. В настоящее время одной из самых популярных нотаций является BPMN. Данная нотация обладает рядом достоинств и возможностей по отношению к другим нотациям, и ряд специалистов рекомендуют использовать именно ее [Репин, 2024].

Однако BPMN не лишена существенных недостатков. Обзор аналитических материалов по данному вопросу показывает, что специалисты обращают внимание, например, на следующие недостатки BPMN.

Сложность семантики и методов моделирования BPMN, интуитивно непонятных сотрудникам подразделений без специального обучения. Если использовать все возможности нотации по максимуму, то без специального обучения в схемах не разобраться. Для освоения данной нотации требуются курсы, консультации и время для изучения на достаточном для практического использования уровне. Маловероятно, что эта нотация хорошо понимаема управленцами [Теория систем, 2021; Репин, 2024].

«Трудночитаемость» линейных схем при использовании дорожек. Если схема включает множество исполнителей, которые задействованы в нескольких этапах, она получается вытянутой по вертикали, её сложно проанализировать. Некоторые элементы нотации могут толковаться по-разному, что может привести к недопониманию и ошибкам при интерпретации модели. В случаях использования сложных конструкций и элементов BPMN схемы, как правило, оказываются перегруженными деталями и подробностями, что приводит к избыточности и трудности в интерпретации моделей [Нотация; Ситникова, 2011; Федоров, 2011].

Нельзя указать стоимость исполнения действий в денежном эквиваленте. В некоторых других нотациях это возможно [Ситникова, 2011].

В BPMN настолько много типов блоков, что порой можно описать одно и то же, но разными методами. Скажем, смоделировать отправку сообщения можно соответствующим событием или действием с типом «Отправка». Схема одного и того же процесса у разных моделирующих будет, таким образом, выглядеть по-разному, но иметь идентичную семантику. Таким образом, сравнивая, скажем, процессы «asis» и «tobe», составленные разными исполнителями, можно потерять достаточно много времени на анализ того, а что именно мы должны изменить, чтобы из одного получить другое [Нотация; Ситникова, 2011].

Проблемой является интеграция моделей процессов в нотации BPMN между собой и с моделями вышестоящего уровня. Не вся семантика BPMN поддерживается при имитационном моделировании [Репин, 2024].

Соединяющие элементы предназначены только для отображения порядка выполнения действий или появления событий и не отображают материальные и информационные потоки. Бизнес-процессы же, по сути своей, всегда являются проточными элементами, пропускающими через себя потоки материи и информации [Теория систем, 2021].

Очень сложно моделировать большие иерархические системы, к которым относятся серьезные организации. А ведь именно для их моделирования такие средства и нужны в первую очередь [Теория систем, 2021].

Поэтому неудивительно, что автор работы [Федоров, 2011] видит выход в разработке методики построения иерархических многоуровневых моделей, где верхний уровень описывает контекст исполнения всего процесса, средний – логику исполнения, а нижний уровень – детали реализации отдельных операций.

Авторы нотации BPMN утверждают, что данная нотация не предназначена для построения функциональных диаграмм и представления бизнес-правил [Нотация BPMN 2.0]. Но это может означать только то, что данная нотация вообще не предназначена для моделирования бизнес-процессов (хотя она, вроде бы, для этого и сделана), так как бизнес-процессы, по сути своей, всегда функциональны, а удачные модели бизнес-процессов представляют собой бизнес-правила [Жихарев и др., 2021].

Автор работы [Почему следует отказаться ...] вообще рассматривает использование BPMN как «карго-культ» (слепое копирование каких-либо действий без глубокого понимания процесса). В данной работе утверждается, что те, кто, якобы, знают «успешные примеры» применения нотации, не могут показать, что успех этот был следствием именно использования нотации, и что успеха не было бы или он был бы меньше, если бы нотацию не использовали. Основными факторами, способствующим распространению карго-культа по использованию нотации BPMN, автор называет использование «красивых, но мало понятных» схем, похожих на описание алгоритмов, и наличие строгих «правил рисования», за счет чего возникает иллюзия высокого уровня формальности и определенности.

Некоторые из перечисленных недостатков, по мнению авторов настоящей работы, легко устранимы путем эмуляции диаграмм BPMN средствами системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект» (УФО-подхода). Принципиальная возможность такой эмуляции была показана авторами в работе [Зимовец, 2024] путем сравнения элементов нотаций BPMN и УФО.

В настоящей работе авторы описывают процедуру преобразования диаграммы BPMN, соответствующей стандарту [BPMN Specification], в диаграмму в УФО-нотации, представленной, например, в работе [Маторин, 2024], приводят алгоритм этой процедуры и пример преобразования BPMN-диаграммы «Обработка запроса о товарах».

Процедура преобразования диаграммы BPMN в УФО-диаграмму

Преобразование диаграммы BPMN в УФО-диаграмму обеспечивается выполнением следующих операций с учетом соответствия элементов BPMN УФО-элементам, показанного в работе [Зимовец, 2024]. Знак логической операции « $\rightarrow$ » (импликация) означает замену объекта, находящегося слева от знака, на объект, находящийся справа от него.

1. Пул BPMN со связями преобразуется в контекстную УФО-диаграмму.

- 1.1. Пул $\rightarrow$ контекстный УФО-элемент, определенный до уровня объекта.
- 1.2. Начальное событие и конечное событие (события) пула $\rightarrow$ функциональные связи контекстного УФО-элемента, соответствующие классификации связей УФО-подхода.
- 1.3. Если, кроме пула, есть связанные с ним дорожки, то связи пула с дорожками $\rightarrow$ так же функциональные связи контекстного УФО-элемента, соответствующие классификации.
- 1.4. Внешние для пула дорожки $\rightarrow$ УФО-элементы (определенные до уровня объекта) как внешние сущности по отношению к контекстному УФО-элементу.
- 1.5. Если на внешних дорожках есть элементы BPMN, то эти дорожки $\rightarrow$ УФО-элементы с последующей декомпозицией.

2. Дорожки пула BPMN преобразуются в диаграмму декомпозиции контекстного УФО-элемента, соответствующего пулу BPMN.

2.1. Дорожки пула → элементы декомпозиции контекстного УФО-элемента, соответствующего пулу BPMN.

2.2. Каждая дорожка BPMN → УФО-элемент, определенный до уровня объекта.

2.3. Начальное событие (события) и конечное событие (события) дорожки, а также связи с другими дорожками (если они есть) → функциональные связи УФО-элемента, соответствующего дорожке, из классификации связей УФО-подхода.

3. Подпроцессы на дорожке BPMN преобразуются в диаграмму декомпозиции УФО-элемента, соответствующего дорожке BPMN.

3.1. Подпроцессы на дорожке BPMN → элементы декомпозиции УФО-элемента, соответствующего дорожке BPMN.

3.2. Каждый подпроцесс BPMN → УФО-элемент, определенный до уровня функции.

3.3. Связи подпроцессов → связи из классификации связей УФО-подхода с учетом триггеров событий BPMN.

3.4. Шлюзы дорожки BPMN → УФО-элементы с определенными логическими функциями.

3.5. Связи шлюзов → связи из классификации связей УФО-подхода с учетом триггеров событий BPMN.

4. Задачи подпроцесса BPMN преобразуются в диаграмму декомпозиции УФО-элемента, соответствующего подпроцессу BPMN.

4.1. Задачи подпроцесса BPMN → элементы декомпозиции УФО-элемента, соответствующего подпроцессу BPMN.

4.2. Каждая задача BPMN → УФО-элемент, определенный до уровня функции.

4.3. Связи задач → связи из классификации связей УФО-подхода с учетом триггеров событий BPMN.

4.4. Шлюзы подпроцесса BPMN → УФО-элементы с определенными логическими функциями.

Алгоритм преобразования диаграммы BPMN в УФО-диаграмму

Выполнение указанных выше операций можно описать с помощью алгоритма, представленного на рис. 1a, 1b и 1c.

Для обеспечения полноценной эмуляции диаграммы BPMN, кроме выполнения алгоритма, необходимо соблюдение правил построения диаграмм в этой нотации. Например, необходимо соблюдение требования, что подпроцессы и задачи имеют только один вход и один выход. При этом для нотации УФО-анализа это требование не является обязательным.

Пример преобразования диаграммы BPMN в УФО-диаграмму

Рассмотрим пример преобразования диаграммы BPMN в УФО-диаграмму на примере процесса «Обработка запроса о товарах», представленного на рис. 2.

На рис. 3 представлен результат преобразования пула BPMN («Продавец») со связями с дорожкой «Покупатель» в контекстную УФО-диаграмму.

На рис. 4 представлен результат преобразования дорожек пула BPMN («Сотрудник отдела продаж» и «Менеджер отдела продаж») в диаграмму декомпозиции контекстного УФО-элемента, соответствующего пулу BPMN.

На рис. 5 и 6 представлен результат преобразования подпроцессов на дорожках пула BPMN в диаграммы декомпозиции УФО-элементов, соответствующих дорожкам пула BPMN («Сотрудник отдела продаж» и «Менеджер отдела продаж»).

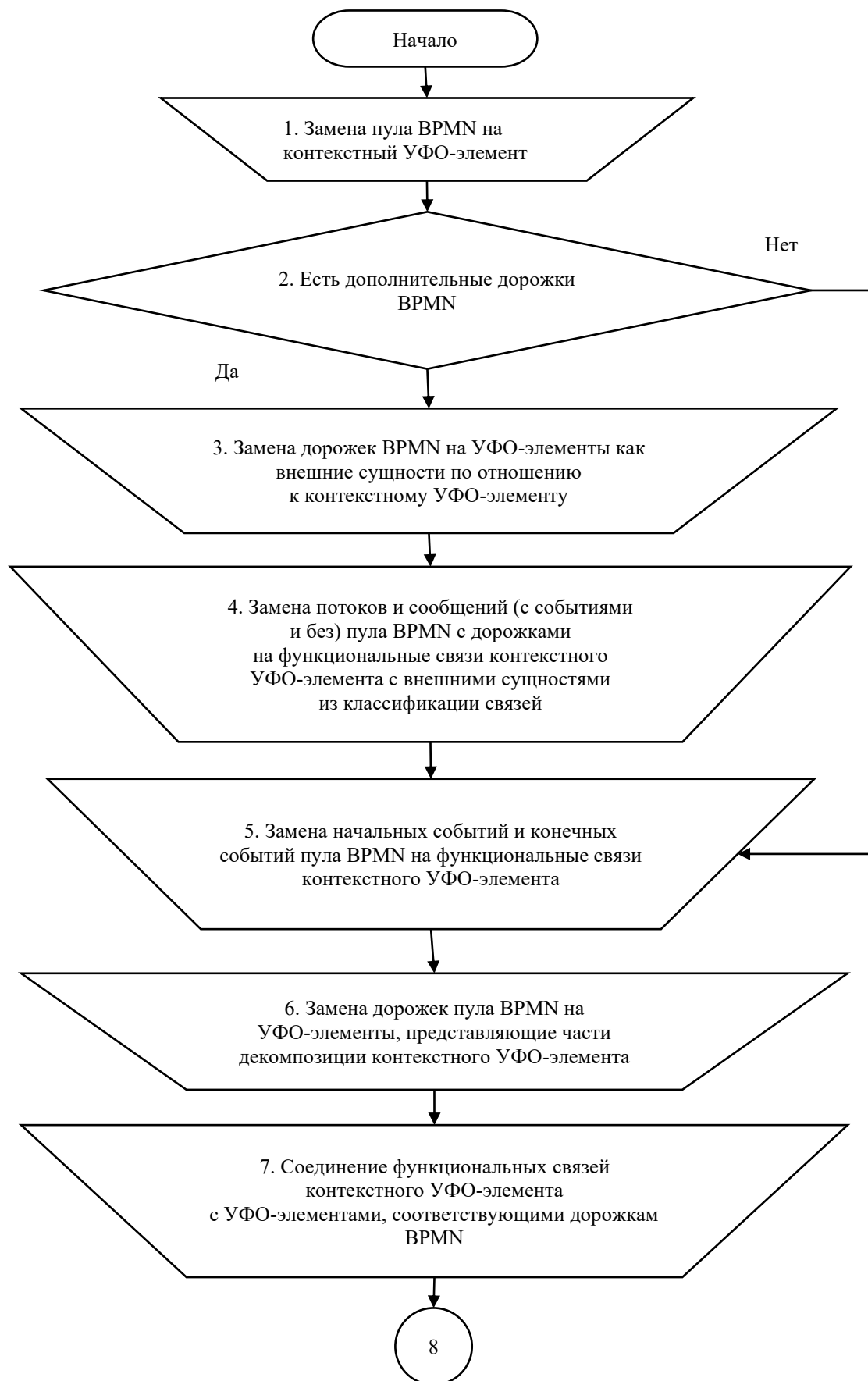


Рис. 1а. Алгоритм преобразования BPMN-диаграммы в UFO-диаграмму
Fig. 1a. Algorithm for converting BPMN diagram to UFO diagram

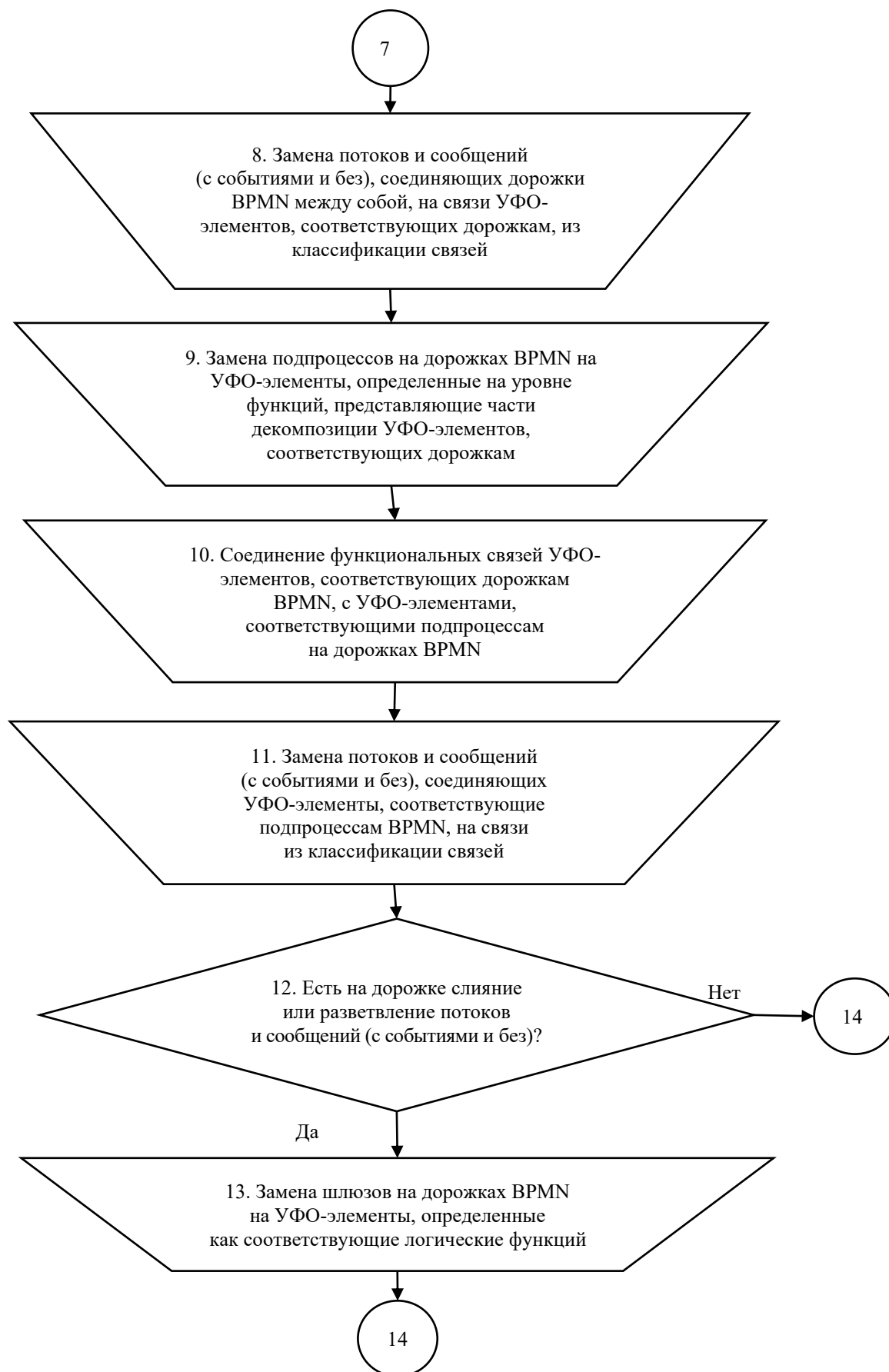


Рис. 1b. Алгоритм преобразования BPMN-диаграммы в UFO-диаграмму
Fig. 1b. Algorithm for converting BPMN diagram to UFO diagram

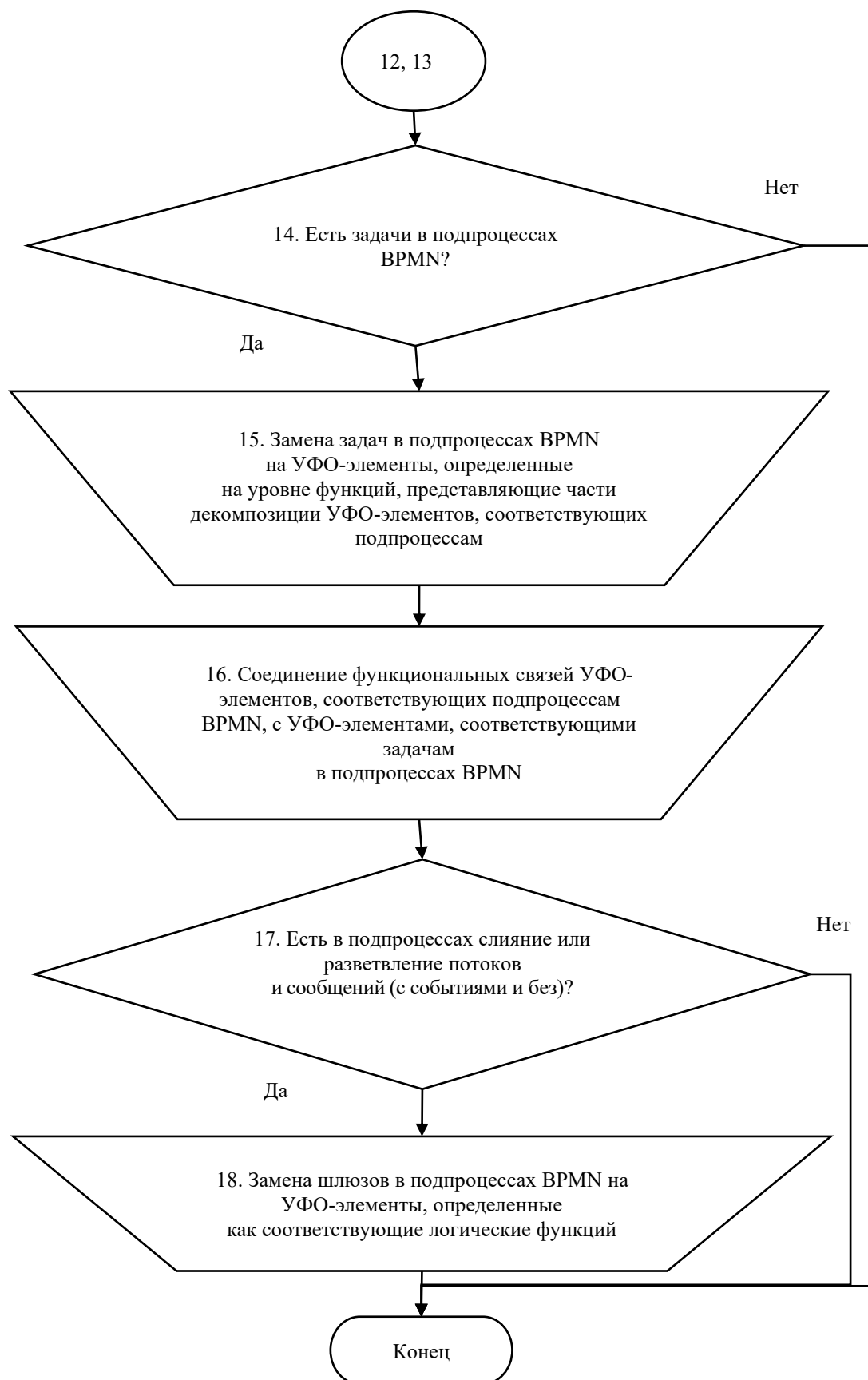


Рис. 1с. Алгоритм преобразования BPMN-диаграммы в UFO-диаграмму
Fig. 1с. Algorithm for converting BPMN diagram to UFO diagram

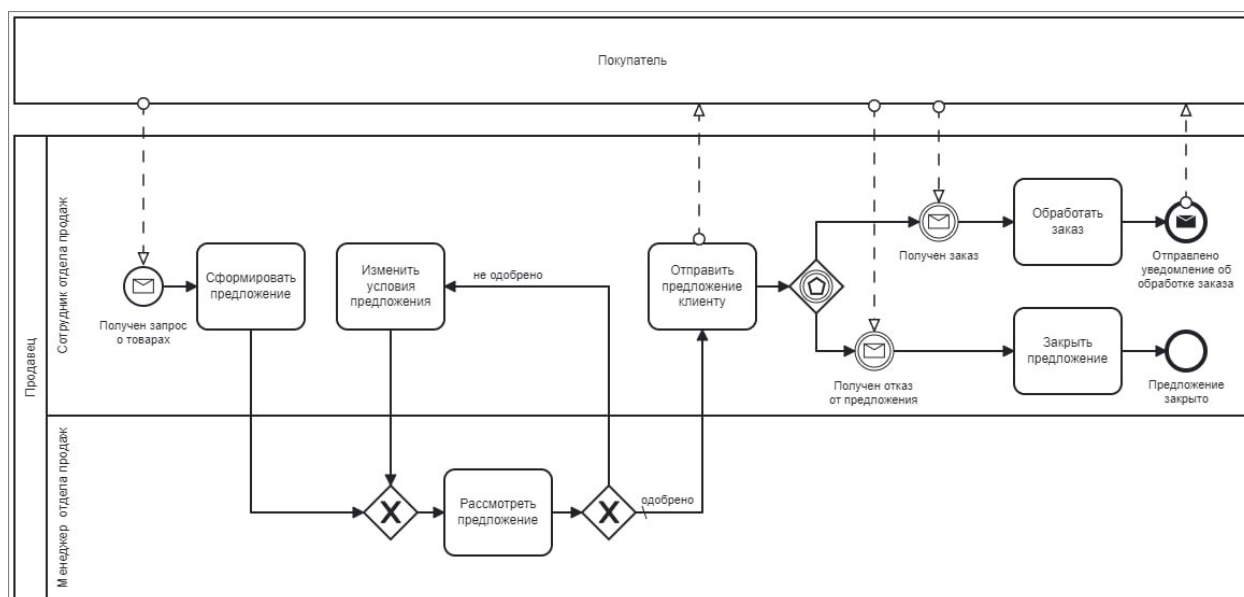


Рис. 2. Пример BPMN-диаграммы «Обработка запроса о товарах»

Fig. 2. Example of BPMN diagram “Processing a request for goods”

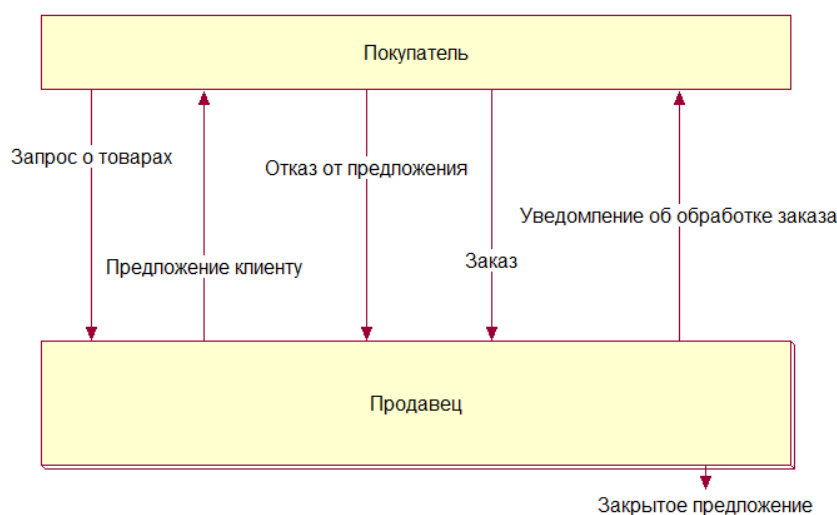


Рис. 3. Результат выполнения процедур 1–5 алгоритма преобразования BPMN-диаграммы в UFO-диаграмму. Контекстная UFO-диаграмма обработки запроса о товарах

Fig. 3. Result of executing procedures 1–5 of the algorithm for converting a BPMN diagram into a UFO diagram. Contextual UFO diagram for processing a request for goods

При этом на рис. 5 видно, что переход к UFO-диаграмме позволяет сократить число используемых символов без потери содержания и сделать диаграмму, соответствующую дорожке более читабельной. В UFO-диаграмме можно не отображать все События с Триггерами, так как в этом нет необходимости. Все события в BPMN все равно поименованы как некоторые информационные потоки. Поэтому в UFO-диаграмме достаточно информационным связям дать те же названия. Содержание диаграммы (по сравнению с дорожкой) не изменится, но диаграмма станет проще и понятнее. Представленный на упомянутой дорожке шлюз, в данном случае, также не несет никакой смысловой нагрузки с точки зрения UFO-подхода. Завершающие эту дорожку подпроцессы «Обработать заказ» и «Закрыть предложение» управляются внешней по отношению к пулу (Продавец) сущностью (Покупатель), а не внутренними процессами сотрудника отдела. Поэтому в UFO-диаграмме на рис. 5 этого шлюза нет, что еще упрощает диаграмму без потери содержания.

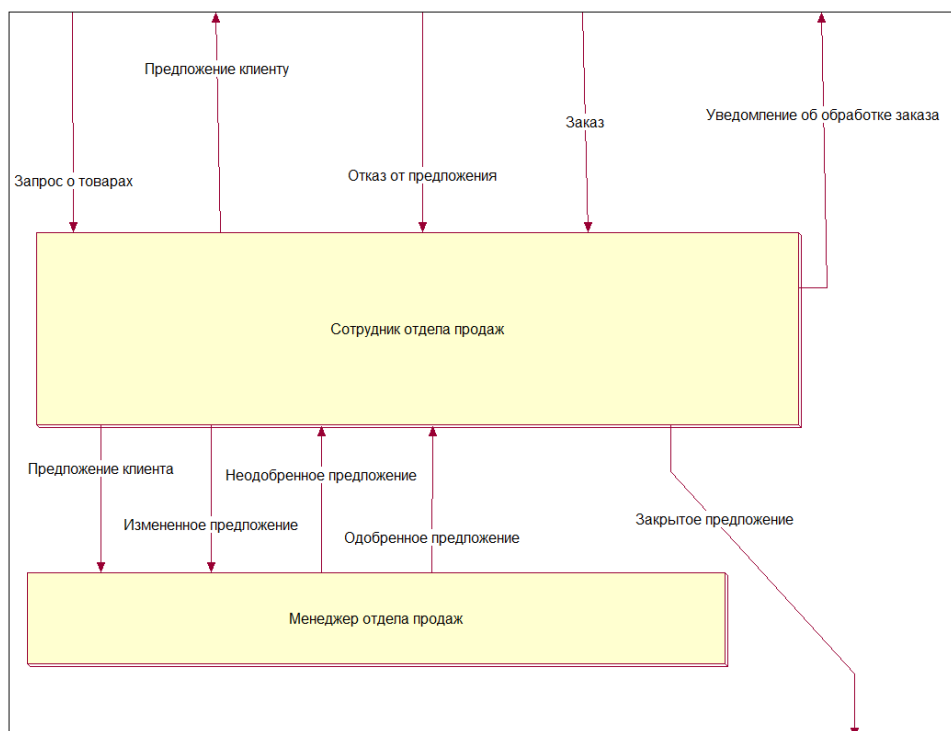


Рис. 4. Результат выполнения процедур 6–8 алгоритма преобразования BPMN-диаграммы в UFO-диаграмму. Декомпозиция контекстной UFO-диаграммы обработки запроса о товарах на UFO-элементы, соответствующие дорожкам

Fig. 4. Result of executing procedures 6–8 of the algorithm for converting a BPMN diagram into a UFO diagram. Decomposition of the context UFO diagram for processing a request for goods into UFO elements corresponding to the tracks

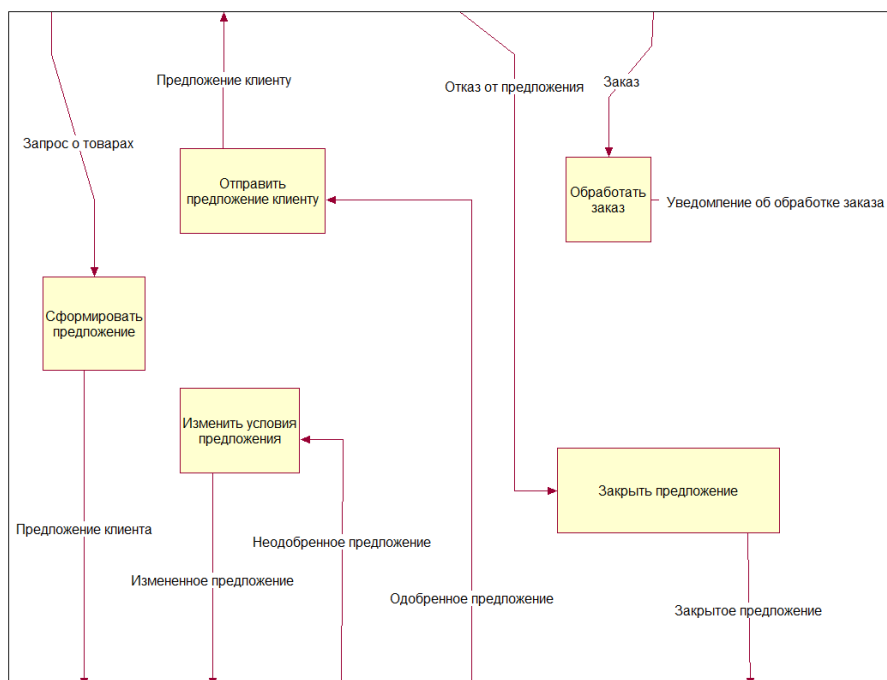


Рис. 5. Результат выполнения процедур 9–13 алгоритма преобразования BPMN-диаграммы в UFO-диаграмму. Декомпозиция UFO-элемента, соответствующего дорожке BPMN «Сотрудник отдела продаж»

Fig. 5. Result of executing procedures 9–13 of the algorithm for converting a BPMN diagram into a UFO diagram. Decomposition of the UFO element corresponding to the BPMN track “Sales Department Employee”

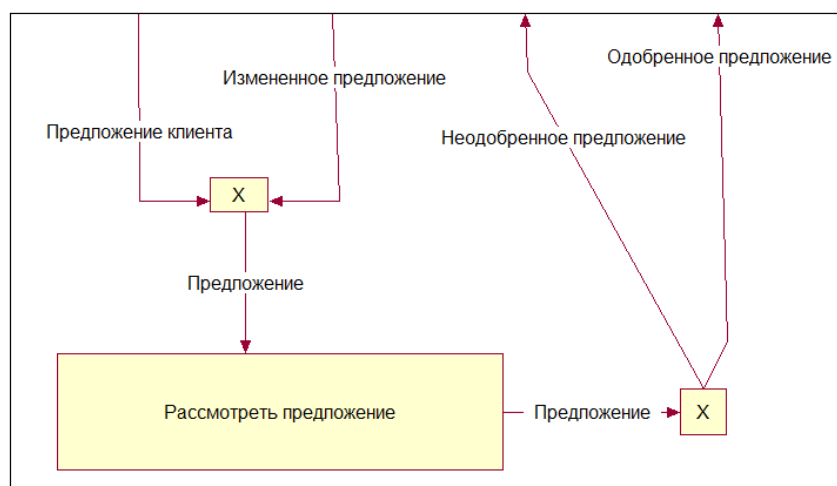


Рис. 6. Результат выполнения процедур 9–13 алгоритма преобразования BPMN-диаграммы в UFO-диаграмму. Декомпозиция UFO-элемента, соответствующего дорожке BPMN «Менеджер отдела продаж»

Fig. 6. Result of executing procedures 9–13 of the algorithm for converting a BPMN diagram into a UFO diagram. Decomposition of the UFO element corresponding to the BPMN track “Sales Department Manager”

Заключение

В результате проведенного исследования, несмотря на простоту диаграммы BPMN, представленной для примера в данной статье, можно увидеть, что эмуляция диаграммы BPMN UFO-диаграммами позволяет, сохраняя смысловое содержание исходной BPMN-диаграммы, минимизировать следующие недостатки BPMN.

Во-первых, в результате преобразования получаются диаграммы интуитивно понятные без особого специального обучения с простой семантикой, методика построения которых также не вызывает никакой сложности.

Во-вторых, полученные схемы легко читаются независимо от количества и длины исходных дорожек BPMN.

В-третьих, в получаемых диаграммах нет необходимости использовать сложные конструкции и перегружать диаграммы избыточными элементами, что обеспечивает простую интерпретацию моделей.

В-четвертых, инструментарий системно-объектного UFO-подхода обеспечивает проведение функционально-стоимостного анализа и таким образом позволяет указать стоимость исполнения действий в денежном эквиваленте.

В-пятых, интеграция моделей процессов в UFO-нотации между собой и с моделями вышестоящего уровня легко обеспечивается.

В-шестых, UFO-диаграммы обеспечивают отображение как информационных, так и материальных связей.

В-седьмых, UFO-подход обеспечивает моделирование сложных иерархических систем с любым числом ярусов иерархии.

Таким образом, показанная в работе возможность сохранить содержание исходной BPMN-модели процессов и получить при этом более наглядное о них представление в виде UFO-диаграмм обеспечивает перспективность и целесообразность использования UFO-подхода для эмуляции BPMN-диаграмм.

Список литературы

Зимовец О.А., Малкуш Е.В., Маторин С.И. 2024. Сравнение нотаций DFD, IDEF0, IDEF3, EPC и BPMN с нотацией UFO-анализа. *Экономика. Информатика*, 51(4): 936–945.



- Маторин С.И., Песоцкий С.А., Жихарев А.Г., Дмитриева Ю.В. 2024. Усовершенствованный алфавит для графоаналитического моделирования процессов с использованием системно-объектного анализа. *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2: 95–108.
- Нотация BPMN 2.0 URL: <https://dzen.ru/a/Za63kLYengqkxNHB>
- Нотация BPMN: плюсы, минусы и область применения URL: https://www.directum.ru/blog-post/notacija_bpmn_pljusy_minusy_i_oblast_primenenija
- Почему следует отказаться от BPMN URL: <https://habr.com/ru/articles/681262/>.
- Репин В. Нотации моделирования процессов в Business Studio: «Процедура», eEPC и BPMN. Что выбрать? URL: http://www.finexpert.ru/view/notatsii_modelirovaniya_protssesov_v_Business_Studio_protseadura_eEPC_i_BPMN_chno_vybrat/950
- Ситникова О. Глава 4. BPMN. I'm lovin it. URL: <https://ecm-journal.ru/material/glava-4-bpmn-im-lovin-it?>
- Теория систем и системный анализ: учебник. 2021. А.Г. Жихарев, О.А. Зимовец, М.Ф. Тубольцев, А.А. Кондратенко; под ред. С.И. Маторина. М.: КНОРУС, 456 с.
- Федоров И. Сравнительный анализ нотаций моделирования бизнес-процессов URL: <https://www.osp.ru/os/2011/08/13011140>
- BPMN Specification – Business Process Model and Notation. URL: <https://www.bpmn.org/>

References

- Zimovets O.A., Malkush E.V., Matorin S.I. 2024. Comparison of DFD, IDEF0, IDEF3, EPC and BPMN notations with UFO analysis notation. *Economics. Information technologies*, 51(4): 936–945 (in Russian).
- Matorin S.I., Pesotsky S.A., Zhikharev A.G., Dmitrieva Yu.V. 2024. An improved alphabet for graphoanalytical modeling of processes using system-object analysis. *Artificial intelligence and decision making*, 2: 95–108 (in Russian).
- BPMN 2.0 notation URL: <https://dzen.ru/a/Za63kLYengqkxNHB>
- BPMN Notation: Pros, Cons, and Scope URL: https://www.directum.ru/blog-post/notacija_bpmn_pljusy_minusy_i_oblast_primenenija
- Why you should abandon BPMN URL: <https://habr.com/ru/articles/681262/>.
- Repin V. Notations of process modeling in Business Studio: «Procedure», eEPC and BPMN. What to choose? URL: http://www.finexpert.ru/view/notatsii_modelirovaniya_protssesov_v_Business_Studio_protseadura_eEPC_i_BPMN_chno_vybrat/950
- Sitnikova O. Chapter 4. BPMN. I'm loving it. URL: <https://ecm-journal.ru/material/glava-4-bpmn-im-lovin-it?>
- Systems Theory and Systems Analysis: Textbook. 2021. A.G. Zhikharev, O.A. Zimovets, M.F. Tuboltsev, A.A. Kondratenko; edited by S.I. Matorin. Moscow: KNORUS, 456 p (in Russian).
- Fedorov I. Comparative analysis of business process modeling notations URL: <https://www.osp.ru/os/2011/08/13011140>
- BPMN Specification – Business Process Model and Notation. URL: <https://www.bpmn.org/>

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 03.02.2025

Поступила после рецензирования 23.03.2025

Принята к публикации 26.03.2025

Received February 3, 2025

Revised March 23, 2025

Accepted March 26, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зимовец Ольга Анатольевна, кандидат технических наук, старший бизнес-аналитик ООО «Научно-производственное объединение «Технологии надежности»» г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga A. Zimovets, Candidate of Technical Sciences, Senior Business Analyst, Scientific and Production Association “Reliability Technologies”, Belgorod, Russia

Малкуш Елена Викторовна, аспирант кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Elena V. Malkush, postgraduate student of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Маторин Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Sergey I. Matorin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Жихарев Александр Геннадиевич, доктор технических наук, доцент, директор института инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Aleksandr G. Zhikharev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia



УДК 004
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-654-664
EDN PZEZLW

Организационные аспекты управления ИТ-проектами

Волкова О.Н., Поначугин А.В., Тимофеева Е.А.

Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина
Россия, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 1
ok6000@yandex.ru, sasha3@bk.ru, Timzh.elena@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы эффективного управления ИТ-проектами в целях ведения успешного бизнеса в современном мире. Грамотное управление заключается в распределении ролей между участниками, определении зоны ответственности каждого участника, обеспечении коммуникации между всеми участниками проектной деятельности. Эффективное управление ИТ-проектами подразумевает собой удовлетворение заказчика, понимание его желаний и потребностей, тем самым формирование у него лояльности к компании. Управление ИТ-проектами возможно только благодаря использованию специальных средств и программ. Они помогают планировать, исполнять и контролировать проектную деятельность эффективно и с минимальными рисками. В статье рассмотрены самые популярные инструменты управления Microsoft Project, Jira, Trello, проанализированы их достоинства и недостатки. В области управления ИТ-проектами приветствуются гибкие, легко изменяющиеся конструкции, которые способны удовлетворять потребности клиентов и быстро адаптироваться к изменяющимся окружающим условиям. Грамотно выстроенная коммуникация между всеми участниками проектной деятельности позволяет быстро и с минимальными затратами создать уникальный программный продукт.

Ключевые слова: ИТ-проект, управление проектной деятельностью, распределение ролей участников, закрепление зоны ответственности, организация коммуникации, инструментарий для управления, преимущества и недостатки специализированных программ

Для цитирования: Волкова О.Н., Поначугин А.В., Тимофеева Е.А. 2025. Организационные аспекты управления ИТ-проектами. *Экономика. Информатика*, 52(3): 654–664. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-654-664. EDN PZEZLW

Organizational Aspects of IT Project Management

Oksana N. Volkova, Alexander V. Ponachugin, Elena A. Timofeeva

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University
1 Ulyanov St., Nizhny Novgorod 603005, Russia
ok6000@yandex.ru, sasha3@bk.ru, Timzh.elena@gmail.com

Abstract. The article examines current issues of effective management of IT projects for the purpose of running a successful business in the modern world. Competent management consists in distributing roles between participants, defining the area of responsibility of each participant, ensuring communication between all participants in the project activity. Effective management of IT projects implies customer satisfaction, understanding of their wishes and needs, thereby forming their loyalty to the company. IT project management is only possible through the use of special tools and programs that help plan, execute and control project activities effectively and with minimal risks. The article reviews the most popular management tools Microsoft Project, Jira, Trello, analyzes their advantages and disadvantages. In the field of IT project management, flexible, easily changing designs are welcomed, which are able to meet the needs of clients and quickly adapt to changing environmental conditions. Well-structured communication between all participants in the project activities allows you to quickly and with minimal costs create a unique software product.

Keywords: IT project, project management, distribution of participant roles, assignment of areas of responsibility, organization of communication, management tools, advantages and disadvantages of specialized programs

For citation: Volkova O.N., Ponachugin A.V., Timofeeva E.A. 2025. Organizational Aspects of IT Project Management. *Economics. Information technologies*, 52(3): 654–664 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-654-664. EDN PZEZLW

Введение

В настоящее время для успешного ведения бизнеса и эффективной организации деятельности органов государственной власти, а также для всего общества в целом требуется создание инновационных информационных технологий, которые способны оптимизировать и улучшить работу человека во всех сферах его жизнедеятельности. Эпоха цифровизации побуждает работодателей и отдельных граждан применять современные инновационные технологии для решения различных проблем. В связи с данными обстоятельствами возникает потребность в создании уникальных программных продуктов, которые создаются благодаря грамотному планированию, организации и ведению проектной деятельности менеджером [Авдошин, 2011].

Актуальными проблемами, возникающими при реализации проектной деятельности, являются:

1. Недостаток пула профессионалов в сфере ИТ-технологий. Зачастую ИТ-проекты являются сложными и требуют включения различных специалистов в сфере ИТ.
2. Возникновение рисков, потерь в ходе реализации проекта. Для проектного менеджера важно умение грамотно распределять ресурсы, оптимизировать технологии, сокращать издержки, соблюдать сроки и качество выполняемых командой работ, укладываться в бюджет проекта.
3. Создание конкурентоспособного продукта. Именно качественный продукт становится конкурентоспособным на рынке и занимает свою особую нишу в экономике и информационных технологиях.
4. Формирование лояльности у заказчиков, стейкхолдеров и иных заинтересованных лиц при создании уникального информационного продукта [Архипенков, 2009].

Поэтому грамотное и эффективное управление ИТ-проектами становится залогом успешной разработки и реализации готового продукта, способного удовлетворить потребности заказчика, тем самым формируя положительный репутационный капитал компании у клиента, и как следствие развитие бизнеса и оптимизацию работы государственных структур, и всего человеческого сообщества в целом.

Объекты и методы исследования

Эффективное управление ИТ-проектами заключается в распределении ролей между участниками команды, определении зоны ответственности каждого участника, обеспечении коммуникации между всеми участниками проектной деятельности.

При реализации проекта выделяют несколько главных участников:

1. Проектный менеджер – специалист, который осуществляет общее руководство и координацию действий всех участников проекта. Он планирует выполнение каждого этапа работ в проекте, организует его выполнение профессионалами, следит за качеством выполненной работы. Он осуществляет управление рисками, внесением изменений в проект. Он взаимодействует со всей командой и организывает регулярные совещания. Предоставляет своевременные и достоверные отчеты о достижениях, фиксирует недостатки. Проектный менеджер является лидером, обладает навыками управления ИТ-проектами.
2. Владелец продукта выступает как представитель заказчика. Совместно с заказчиком он формулирует цели и задачи создаваемого продукта, предоставляет требования



исполнителю (проектному менеджеру). На этапе планирования проекта владелец продукта вносит коррективы, изменяет требования. Он управляет бэклогом; согласовывает содержание спринтов. Он принимает или отклоняет выполняемые исполнителем (проектным менеджером) работы. Он расставляет приоритеты, нацелен на реализацию коммерческой идеи.

3. Scrum-мастер – специалист, который в проектной деятельности реализует скрам-технологии. Он помогает всем сотрудникам освоить эти технологии для достижения общего результата, решает проблемные вопросы при организации работ, координирует действия команды, проводит церемонии скрам. Он способен замотивировать команду на выполнение работ.

4. Разработчики – специалисты, которые занимаются непосредственно разработкой уникального продукта, его тестированием. В случае одобрения продукта они также занимаются его внедрением и адаптацией в общей системе. Разработчики и вся команда отвечают за качество продукта. Команда самостоятельно планирует ход работ и отвечает за результат. Команда осуществляет непрерывное взаимодействие со всеми участниками проектной деятельности. Команда разработчиков – это профессионалы с навыками разработки и тестирования. Они нацелены на улучшение продукта и несут полную ответственность за результат.

5. Аналитик – специалист, который отвечает за сбор требований, их анализ, документирование. Он проводит верификацию (проверку, соответствие продукта требованиям), то есть подтверждает или опровергает информацию о том, что требования были выполнены на основе фактических данных. Он проводит валидацию, то есть подтверждает или опровергает информацию о возможности применения тех или иных требований для определенной ситуации. Он обладает аналитическими способностями, коммуникабелен, умеет применять методы анализа представленных требований, занимается их документированием.

6. Тестировщик – специалист, который занимается тестированием продукта, выявляет дефекты и представляет их краткое описание, занимается валидацией и верификацией продукта. Он обладает навыками проведения тестирования, аналитикой, внимательностью к деталям, коммуникабельностью.

7. Архитектор – специалист, который занимается созданием архитектурных решений и их документированием, определяет наличие технической возможности и требований заказчика при разработке продукта [Салливан, 2002; Архипенков, 2008].

Взаимодействие проектного менеджера с владельцами продукта, заказчиками, со стейкхолдерами значимо и важно, так как они влияют на рабочий процесс и результат в проектной деятельности. Стейкхолдерами выступают физические или юридические лица, которые заинтересованы в создании уникального продукта. Они могут быть как вне организации, так и внутри ее. Важность стейкхолдеров заключается в том, что они оказывают поддержку проекту, предоставляют ресурсы, формируют требования и высказывают опасение по поводу складывающихся обстоятельств, тем самым выявляя ранние риски. В процессе коммуникации проектного менеджера со стейкхолдерами цели становятся более понятными и прозрачными [Романова, 2007].

Стейкхолдеров принято разделять на внутренних и внешних. К внутренним стейкхолдерам относятся сотрудники из самой организации (например, менеджеры). К внешним стейкхолдерам относятся заказчики из сторонних организаций (например, поставщики, социальная общественность, сотрудники органов власти) [Романова, 2007].

Выделяются следующие способы поиска стейкхолдеров:

1) команда разработчиков в процессе мозгового штурма обсуждает возможную целевую категорию стейкхолдеров;

2) команда разработчиков с помощью анкетирования и интервьюирования сотрудников различных компаний выявляет какую-либо потребность или заинтересованность;

3) команда разработчиков на основе анализа уставных документов или опубликованных в официальных источниках контрактов предлагает компаниям свои услуги [Елхаков, 2013].

При выборе подходящего стейкхолдера следует хорошо понимать его потребности и ожидания, его важность и влияние на ход проектной деятельности. Все стейкхолдеры

оказывают либо высокое влияние и интерес, тогда проектному менеджеру необходимо учитывать все требования стейкхолдера; либо высокое влияние и низкий интерес, тогда проектному менеджеру необходимо учитывать требования стейкхолдера, но не перегружать его данными; либо низкое влияние и высокий интерес, тогда проектному менеджеру необходимо его информировать о ходе выполнения работ и результатах; либо низкое влияние и интерес, тогда проектному менеджеру необходимо просто осуществлять мониторинг ситуации [Елхаков, 2013].

Взаимодействие со стейкхолдерами включает в себя следующие основные элементы:

- 1) коммуникация – обозначаются способы и время общения со стейкхолдерами;
- 2) ответственные лица от команды – руководством команды назначаются ответственные лица за взаимодействие;
- 3) информирование – определяется, какую информацию и в каком формате следует передавать стейкхолдерам [Елхаков, 2012].

При взаимодействии со стейкхолдерами ответственному лицу необходимо выявить цель, задачи и ожидаемый результат. Ответственное лицо должно информировать стейкхолдера о достижениях или проблемах, вовлекать стейкхолдера в рабочий процесс для принятия решений. В качестве коммуникации применяются проведение личных или дистанционных совещаний, направление документов на электронную почту, использование специализированных платформ для совместной работы в режиме реального времени (Asana, Jira) [Новиков и др., 2008].

В целях решения конфликтных ситуаций ответственное лицо совместно со стейкхолдерами идентифицирует источник конфликта, предлагает вариант его решения, при необходимости привлекает третье независимое лицо для решения спора.

Проектный менеджер ориентирован на положительный результат по проекту, поэтому главной его целью становится понимание потребности и ожиданий стейкхолдеров. Вследствие того, что команда профессиональных разработчиков может располагаться в различных географических районах и в различных временных разрывах, то эффективная и правильно организованная коммуникация становится ключевым фактором на пути к успеху.

Эффективная коммуникация способствует поддержанию мотивации к работе у команды, согласованности работы всех участников процесса, быстрому и правильному принятию решений, решению проблемных ситуаций.

Управление коммуникациями подразумевает под собой планирование, организацию связи и мониторинг.

Для решения сложных вопросов организуются традиционные совещания с личным присутствием каждого участника. Для решения оперативных, текущих вопросов проводятся совещания в режиме видеоконференцсвязи. Электронная почта признана официальным источником получения информации и документов. Благодаря мессенджерам получаются быстрые ответы на короткие вопросы. Совместную работу проводят с помощью систем Jira, Asana, Trello. Также в рабочем процессе используются базы для хранения и обмена данными [Ньюэлл, 2006].

Отличительными чертами эффективной коммуникации являются прозрачность предоставляемой информации, учет целевой аудитории и создание соответствующего информационного контента, умение слушать и слышать заинтересованные в реализации проекта стороны, непрерывная связь и общение, доступность, полнота, полезность и адекватность предоставляемой информации [Фатрелл, 2004].

В работе проектного менеджера необходимо грамотно управлять потоком информации: обеспечить конфиденциальность и своевременность передаваемой информации, а также ее точность и достоверность. Проектный менеджер должен владеть знаниями, умениями и навыками по решению технических проблем, устранению языковых барьеров, регулированию большого потока информации во избежание путаницы, решению конфликтных ситуаций [Фатрелл, 2004].



В целях предотвращения неблагоприятных ситуаций проектный менеджер всегда должен иметь альтернативные каналы связи при возникновении технических проблем, разработанный при необходимости глоссарий для всех участников проекта, осуществлять передачу всем участникам только важных данных, проводить мероприятия по командообразованию [Фатрелл, 2004].

На коммуникациях построена вся гибкая методология. Она предполагает проведение коротких, но емких совещаний, подведение итогов выполненной работы, выявление проблем и путей их решения, демонстрацию полученных результатов заинтересованным лицам, визуализацию хода рабочего процесса с помощью канбан-досок и сформулированных бэклогов [Фатрелл, 2004].

Таким образом, в ИТ-проектах хорошо организованная коммуникация является залогом успешного проекта. Она обеспечивает согласованность работы всех участников, оперативное решение проблем, удовлетворение потребностей стейкхолдеров.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим более подробно инструментарий для управления ИТ-проектами.

Управление ИТ-проектами возможно только благодаря использованию специальных средств и программ. Они помогают планировать, исполнять и контролировать проектную деятельность эффективно и с минимальными рисками. Рассмотрим на примере самые популярные инструменты управления Microsoft Project, Jira, Trello.

1. Microsoft Project – широко известное специальное средство управления ИТ-проектами, созданное компанией Microsoft. Этот инструмент позволяет планировать процесс работ, распределять ресурсы: материальные, кадровые, финансовые, устанавливать сроки выполнения работ, отслеживать динамику, анализировать затраты.

Достоинства:

- интеграция с продуктами Microsoft;
- возможность создания диаграмм Ганта;
- возможность создания деловой графики для визуализации рабочего процесса;
- наличие функции управления бюджетом;
- наличие функции управления ресурсами;
- возможность формирования отчетности;
- возможность предоставления аналитических записок по проекту.

Недостатки:

- дороговизна получения лицензии;
- сложности и массовость в обучении новых пользователей;
- не очень подходит при выборе гибкой методологии управления ИТ-проектами.

Microsoft Project следует применять для крупных проектов, в которых имеется строгая иерархия и детальное планирование, для тех компаний, которые уже используют в работе продукты Microsoft, в проектах, где важно строго соблюдать сроки и бюджет [Эинк, 2008].

2. Jira – широко известное специальное средство управления ИТ-проектами, созданное компанией Atlassian. Этот инструмент позволяет гибко реагировать на изменения требований заказчика. Он создан для поддержания разработок программ по гибкой методологии Agile. В настоящее время очень востребована и популярна в сфере ИТ.

Достоинства:

- быстро настраивается под гибкие методологии управления Agile (Scrum, Kanban);
- легко отслеживать решаемые задачи, возникающие ошибки, вносимые корректировки;
- опции интеграции в другие инструменты для разработок;
- автоматизация большинства процессов.

Недостатки:

- сложная для использования небольшой командой;
- требуется много времени для настройки под нетипичные потребности;
- дополнительные расходы на плагины, расширения.

Jira следует применять для проектов, требующих гибкую методологию управления Agile (Scrum, Kanban), для команд, которым необходимо отслеживать задачи и баги, для наибольшей автоматизации процессов [Эинк, 2008].

3. Trello – широко известное специальное средство управления ИТ-проектами, созданное компанией Atlassian. В основе управления ИТ-проектами лежит Kanban доска. Имеет дружелюбный интерфейс, который будет понятен любому специалисту. Trello идеально подходит при гибкой методологии управления Agile (Kanban), так как обладает визуализацией задач и результатов в ходе ведения проектной деятельности.

Достоинства:

- дружелюбный интерфейс;
- визуализация выполняемых задач и хода работ;
- настройка под любые типы проектов;
- возможность интеграции в различные процессы.

Недостатки:

- неудобство при управлении бюджетом, ресурсами;
- не подходит для крупных, сложных проектов;
- малочисленные функции при ведении отчетности.

Trello следует применять для проектов, требующих гибкую методологию управления Agile (Scrum, Kanban). Она подходит для небольших проектов, для малочисленной команды, где есть визуализация рабочего процесса [Эинк, 2008].

4. Asana – эффективный инструмент при управлении ИТ-проектами, который направлен на улучшение качества продукта и командообразование участников разработки. Asana обладает возможностью для составления плана работ, отслеживания задач, выявления ошибок.

Достоинства:

- дружелюбный интерфейс, наличие реестров, досок, календарей;
- функции создания задач и подзадач;
- возможность интеграции с различными сервисами;
- возможность предоставления различной отчетности и мониторинга выполнения работ.

Недостатки:

- некоторые опции доступны только в платных версиях;
- не подходит для небольших проектов;
- не подходит для детального ресурсного планирования.

Asana следует применять для крупных команд, которым необходимы комплексные средства и инструменты для решения задач, для тех, кому нужны широкие возможности для интеграции готового продукта в систему [Эинк, 2008].

5. Basecamp – инструмент для управления ИТ-проектами, простой и удобный для команды разработчиков. Он предусматривает все главные функции для планирования, организации работ и общения участников в одном месте.

Достоинства:

- простой понятный интерфейс;
- имеет чаты и доски информации;
- сбор и хранение документации в одном месте;
- удобен для больших команд разработчиков.

Недостатки:

- неудобен при глубоком планировании и ведении отчетности;



- менее гибок в использовании, ограниченные настройки;
- отсутствие продвинутых опций при управлении ресурсами.

Asana следует применять для небольших команд, которым удобен в использовании простой и понятный инструмент, где важна коммуникация всех участников в одном месте [Эинк, 2008].

6. Monday.com – платформа для управления проектом, у которой имеются различные опции для гибких рабочих процессов.

Достоинства:

- возможность настраиваться под различные типы проектов;
- получение данных в различных форматах (таблица, календарь событий, доска);
- интеграция с различными сервисами;
- автоматизация рабочих процессов благодаря имеющемуся понятному интерфейсу.

Недостатки:

- дороговизна при покупке платформы с расширенными возможностями для многочисленной команды;
- сложности при настройке платформы под проект;
- в базовой версии недостаточно функций для работы над проектом.

Monday.com следует применять для разработчиков, которым нужен гибкий инструмент при управлении проектами, для проектов с разной постановкой задач и их отслеживанием, для команд, которым нужна визуализация рабочего процесса [Эинк, 2008].

В зависимости от масштаба и сложности проекта, проектным менеджером выбирается определенная методология управления и инструменты для реализации ИТ-проекта. Рассматриваются вопросы финансирования, сроков, требований заказчика, предложений от команды по методологии управления и инструментов в целях реализации ИТ-проекта [Хьюберт, 2004].

Для больших сложных проектов проектный менеджер выберет инструменты с расширенными возможностями для разработки плана работ, формирования бюджета, управления материально-техническими, технологическими и кадровыми ресурсами. Например, Microsoft Project, Jira. Для простых маленьких проектов проектный менеджер выберет инструменты с понятным и удобным инструментом. Например, Trello, Basecamp.

Выбирая методологию управления ИТ-проектом, проектный менеджер выберет для проектов с четким планом, строгой иерархией классическую каскадную методологию (Waterfall) и инструмент Microsoft Project. Для проектов с неопределенными требованиями заказчика можно использовать гибкие инструменты Agile (Scrum, Kanban) и инструменты Jira, Asana [Хэлдман, 2008].

Microsoft Project с расширенными возможностями подходит для проектов, где требуется детальное управление финансами и ресурсами. Basecamp с большими возможностями для коммуникаций подойдет для проектов, где требуется постоянное непрерывное взаимодействие всех участников.

Jira, Asana, Monday.com подойдут для проектов, в которых необходима интеграция с другими сервисами, платформами, а также для проектов, где требуется высокий уровень автоматизации процесса.

К бесплатным или недорогим инструментам относится Trello. Инструмент подойдет для разработчиков на первоначальном уровне своей профессиональной деятельности или для маленьких команд разработчиков. К платным инструментам с расширенными возможностями относятся Microsoft Project, Jira, они подходят для крупных проектов, для крупных организаций.

Trello относится к категории простых, понятных и удобных инструментов, им могут пользоваться даже такие разработчики, которые не имеют специального опыта управления ИТ-проектами. Microsoft Project, Jira являются сложными в исполнении и требуют специального обучения и наставничества сотрудников, но они дают новые возможности при управлении ИТ-проектами.

Системы управления версиями, инструменты для коммуникаций, CRM-системы имеют возможность интеграции со многими другими системами, сервисами общей системы, поэтому важно понимать какой инструмент необходимо использовать с целью дальнейшей интеграции в общую систему. Jira, Asana, Monday.com имеют обширные возможности для интеграции с другими системами, позволяют оптимизировать и автоматизировать рабочий процесс [Силич, 2002].

Microsoft Project, Jira популярны для крупных и долгосрочных проектов у больших организаций, они имеют возможность масштабироваться при увеличении объема работ по проекту. Trello используется в небольших проектах в средних и малых организациях, данный инструмент не подходит в случаях роста, увеличения масштаба проекта, его инструментария может оказаться недостаточно.

Практические советы при выборе инструмента управления ИТ-проектами:

1. Необходимо проанализировать потребности заказчика, сформулировать требования к будущему продукту, выбрать подходящую методологию управления ИТ-проектом, возможные пути интеграции продукта в общую систему.

2. Необходимо оценить состав команды разработчиков, ее численность, стаж и опыт работников, их пожелания при выборе инструмента для реализации проекта.

3. Проанализируйте функционал каждого инструмента, рассмотрите возможности планирования работ, управления ресурсами, возможностями предоставления отчетов, другое.

4. Спрогнозируйте бюджет проекта, определите стоимость используемого в будущем инструмента, в случае дороговизны, возможно рассмотреть альтернативные варианты инструментов.

5. Некоторые сервисы и платформы предлагают бесплатные пробные версии инструментария для управления проектом. Необходимо ознакомиться с ними и протестировать.

6. Необходимо ознакомиться с лучшими практиками использования того или иного инструмента, выбрать подходящий именно для конкретного проекта, изучить отзывы, рекомендации от других команд разработчиков.

7. Необходимо обеспечить обучение команды и поддержку ее со стороны руководства проекта. Выбрать оптимальный инструмент управления ИТ-проектами [Липаев, 2003; Липаев, 2011; Бахтиярова, 2013, Руководство, 2022; Самерханова, 2023].

Таким образом, для достижения успеха в проектной деятельности необходимо выбрать оптимальный инструмент управления. Изучение содержания предлагаемых к использованию инструментов на рынке позволит подобрать подходящий инструментарии именно к конкретному проекту. Эффективное использование инструмента и адаптация его под проект обеспечат успешную реализацию целей и задач проекта.

Заключение

В статье рассмотрены теоретические основы управления ИТ-проектами и практические аспекты управления ИТ-проектами.

Проанализирован инструментарий для управления ИТ-проектами, который позволяет планировать, исполнять и контролировать проектную деятельность эффективно и с минимальными рисками. Проанализированы достоинства и недостатки популярных инструментов управления Microsoft Project, Jira, Trello, Asana, Basecamp, Monday.com.

В области управления ИТ-проектами приветствуются гибкие, легко изменяющиеся конструкции, которые способны удовлетворять потребности клиентов и быстро адаптироваться к изменяющимся окружающим условиям.

Активная коммуникация между командой разработки и владельцем продукта, заказчиками, стейкхолдерами является основой для реализации проекта, создания уникального продукта. Управление рисками позволяет проектному менеджеру сократить время на разработку продукта, минимизировать затраты.



Мир технологий меняется с колоссальной скоростью, поэтому обучение является приоритетным направлением у специалистов. Конкурентоспособный специалист всегда должен быть в курсе новых трендов, технологии. В этом ему могут помочь участие в конференциях, семинарах, обмен опытом с другими специалистами, подтверждение знаний путем сертификации.

Управление в сфере ИТ-проектов – это перспективная, динамично развивающаяся область в сфере ИТ, требующая постоянного обучения, развития новых компетенций. Умение быстро адаптироваться к новым условиям и требованиям является успехом на пути создания уникальных продуктов.

Список литературы

- Авдошин С.М. 2011. Информатизация бизнеса. Управление рисками. Москва, ДМК Пресс: 176.
- Архипенков С.Я. 2008. Руководство командой разработчиков программного обеспечения. Прикладные мысли. Москва: 79. URL: https://www.smartyit.ru/docum/prog/sw_team_management.pdf (дата обращения: 29.04.2025).
- Архипенков С.Я. 2009. Лекции по управлению программными проектами. Москва: 128. URL: <https://clck.ru/3НРУ6К> (дата обращения: 29.04.2025).
- Бахтиярова Л.Н. 2013. Формирование общекультурных компетенций как составляющей информационной подготовки студентов средствами MS ACCESS. Нижний Новгород, *Вестник Мининского университета*, № 2 (2): 9.
- Ехлаков Ю.П. 2012. Организация бизнеса на рынке программных продуктов. Томск, издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники: 312.
- Ехлаков Ю.П. 2013. Классификация и описание рискообразующих факторов при создании программных продуктов. *Доклады ТУСУРа*, 3(29): 124–128.
- Ехлаков Ю.П. 2013. Модели и алгоритмы управления жизненным циклом программного продукта: монография. Томск, издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники: 212.
- Липаев В.В. 2003. Анализ и сокращение рисков проектов сложных программных средств. Москва, СИНТЕГ: 224.
- Липаев В.В. 2011. Экономика производства программных продуктов. Москва, СИНТЕГ: 352.
- Новиков Ф.А., Опалева Э.А., Степанов Е.О. 2008. Управление проектами и разработкой ПО: учебное методическое пособие по дисциплине. Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО: 256. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/430.pdf> (дата обращения: 29.04.2025).
- Ньюэлл М.В. 2006. Управление проектами для профессионалов: Руководство по подготовке к сдаче сертификационного экзамена. Москва, КУДИЦОБРАЗ, 416.
- Романова М.В. 2007. Управление проектами: учебное пособие для вузов. Москва, ФОРУМ, Инфра-М: 253.
- Руководство к своду знаний по управлению проектами. Руководство PMBOK+Agile. 2022. Москва, Олимп-Бизнес: 974.
- Салливан Э. Время – деньги. Создание команды разработчиков программного обеспечения. 2002. Москва, Русская редакция: 364.
- Самерханова Э.К., Смышляева О.В., Панова И.В., Бахтиярова Л.Н., Поначугин А.В. 2023. Образование для устойчивого развития в современных условиях цифровизации. *Исследования по критическим социальным наукам*, № 254: 281–291.
- Силич М.П. 2002. Системная технология: объектно-ориентированный подход: монография. Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники: 224.
- Фатрелл Р.Т., Шафер Д.Ф., Шафер Л.И. 2004. Управление программными проектами: достижение оптимального качества при минимуме затрат. Москва, Вильямс: 1136.
- Фатхутдинов Р.А. 2008. Инновационный менеджмент: учебник для вузов. Санкт-Петербург, Питер: 448.
- Хьюберт К.Р. 2004. Универсальная система показателей деятельности. Москва, Альпина Бизнес Букс: 360.
- Хэлдман К. 2008. Управление проектами. Быстрый старт. Москва, ДМК Пресс, Академия АйТи: 352.
- Эинк Э. 2008. Бизнес для программистов. Как начать свое дело. Санкт-Петербург, Питер: 256.

References

- Avdoshin S.M. 2011. Informatization of business. Risk management. Moscow, DMK Press: 176.
- Arkhipenkov S.Ya. 2009. Lectures on software project management. Moscow: 128. URL: <https://clck.ru/3HPY6K> (date of access: 04/29/2025).
- Arkhipenkov S.Ya. 2008. Managing a team of software developers. Applied thoughts. Moscow: 79. URL: https://www.smartyit.ru/docum/prog/sw_team_management.pdf (date of access: 04/29/2025).
- Barkalov S.A., Burkov V.N., Burkova I.V. 2005. Mathematical foundations of project management: a textbook for universities. Moscow, Higher School: 421.
- Bakhtiyarova L.N. 2013. Formation of general cultural competencies as a component of students' information training by means of MS ACCESS. Nizhny Novgorod, *Bulletin of Minin University*, No. 2 (2): 9.
- Ekhlaikov Yu.P. 2013. Classification and description of risk-forming factors in the creation of software products. *TUSUR Reports*, 3(29): 124–128.
- Ehlaikov Yu.P. 2013. Models and algorithms for managing the life cycle of a software product: monograph. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics: 212.
- Ehlaikov Yu.P. 2012. Organization of business in the software market. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics: 312.
- Lipaev V.V. 2003. Analysis and risk reduction of complex software projects. Moscow, SINTEG: 224.
- Lipaev V.V. 2011. Economics of software production. Moscow, SINTEG: 352.
- Novikov F.A., Opaleva E.A., Stepanov E.O. 2008. Project and software development management: a teaching aid on the discipline. Saint Petersburg, SPbGU ITMO: 256. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/430.pdf> (date of access: 29.04.2025).
- Newell M.V. 2006. Project Management for Professionals: A Guide to Preparing for the Certification Exam. Moscow, KUDITSOBRAZ, 416.
- Romanova M.V. 2007. Project Management: A Study Guide for Universities. Moscow, FORUM, Infra-M: 253.
- A Guide to the Project Management Body of Knowledge. The PMBOK+Agile Guide. 2022. Moscow, Olimp-Business: 974.
- Sullivan E. Time is Money. Building a Team of Software Developers. 2002. Moscow, Russian Edition: 364.
- Samerkhanova E.K., Smyshlyaeva O.V., Panova I.V., Bakhtiyarova L.N., Ponachugin A.V. 2023. Education for Sustainable Development in the Current Context of Digitalization. *Studies in Critical Social Sciences*, No. 254: 281–291.
- Silich M.P. 2002. Systems technology: object-oriented approach: monograph. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics: 224.
- Futrell R.T., Shafer D.F., Shafer L.I. 2004. Software project management: achieving optimal quality at minimum cost. Moscow, Williams: 1136.
- Fatkhutdinov R.A. 2008. Innovative management: textbook for universities. St. Petersburg, Piter: 448.
- Heldman K. 2008. Project management. Quick start. Moscow, DMK Press, IT Academy: 352.
- Hubert K.R. 2004. Universal system of performance indicators. Moscow, Alpina Business Books: 360.
- Eink E. 2008. Business for programmers. How to start your own business. Saint Petersburg, Peter: 256.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 06.05.2025

Поступила после рецензирования 14.07.2025

Принята к публикации 15.07.2025

Received May 06, 2025

Revised July 14, 2025

Accepted July 15, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волкова Оксана Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных систем и цифровых сервисов в управлении, Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина, г. Нижний Новгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana N. Volkova, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Services in Management, Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia



Поначугин Александр Викторович, кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных систем и цифровых сервисов в управлении, Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина, г. Нижний Новгород, Россия

Alexander V. Ponachugin, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Services in Management, Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia

Тимофеева Елена Александровна, старший преподаватель кафедры информационных систем и цифровых сервисов в управлении, Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина, г. Нижний Новгород, Россия

Elena A. Timofeeva, Senior lecturer of the Department of Information Systems and Digital Services in Management, Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia

УДК 004.85,004.89
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-665-680
EDN UQKESM

Использование методов машинного обучения для решения задачи предсказания развития отклонений в живых системах

¹ Маренков Я.А. , ¹ Ломакин А.С. , ^{1,2} Донская А.Р. , ² Панина А.А. 

¹ Волгоградский государственный технический университет,
Россия, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28

² Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России,
Россия, 400066, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1
yaroslavmarenkov5@gmail.com, arseny.lomakin@gmail.com, donsckaia.anastasiya@yandex.ru,
panina0675@yandex.ru

Аннотация. Целью исследования является частичная автоматизация процесса ранней диагностики онкологических заболеваний за счет определения подозрения на наличие у пациента ракового заболевания на базе машинного обучения и предоставления интерпретирующей информации. В мире одними из самых смертоносных заболеваний человека являются онкологии различных органов, и ему подвергается большая группа населения. Согласно данным Минздрава России и расчётам Росстата в России в период с 2005 года по 2023 год в России ежегодно выявляли от 427 тыс. до 552 тыс. новых больных. Для решения задачи поиска эффективных и точных методов раннего диагностирования рака в медицине в последнее время все чаще используют различные компьютерные технологии, в том числе и методы машинного обучения. Главным недостатком данных методов является низкая интерпретируемость человеком получаемого результата. Поэтому возникает потребность в разработке интерпретируемого метода для определения подозрения на наличие ракового заболевания. В данной статье рассматривается проблема интерпретируемости результатов прогнозов, выполняемых моделями машинного обучения для решения задачи предсказания развития отклонений в живых системах на примере новообразований поджелудочной железы у человека. На основе результатов расширенного анализа крови, сопоставленных с фактом наличия или отсутствия у пациента рака поджелудочной железы, была разработана интерпретируемая модель машинного обучения. Использовалась локальная интерпретируемость модели с помощью метода SHAP (Shapley Additive exPlanations) с визуализацией в виде водопадного графика. Были обучены разнообразные модели классического машинного обучения, произведен сравнительный анализ данных моделей для выявления результата с большей точностью. На основе полученной модели было сделано формирование интерпретирующей информации. Было разработано пользовательское приложение для взаимодействия с моделью. Наилучший результат показала модель случайного леса (Random Forest) с f1-score, равным 0,859.

Ключевые слова: машинное обучение, интерпретация предсказаний моделей машинного обучения, модели машинного обучения, методы машинного обучения, ранняя диагностика онкологических заболеваний

Для цитирования: Маренков Я.А., Ломакин А.С., Донская А.Р., Панина А.А. 2025. Использование методов машинного обучения для решения задачи предсказания развития отклонений в живых системах. *Экономика. Информатика*, 52(3): 665–680. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-665-680. EDN UQKESM



Applying Machine Learning Methods to Solve the Problem of Predicting the Progression of Abnormalities in Living Systems

¹ Yaroslav A. Marenkov , ¹ Arseniy S. Lomakin ,

^{1,2} Anastasia R. Donskaia , ² Anna A. Panina 

¹ Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russia

² Volgograd State Medical University of Public Health Ministry of the Russian Federation,
1 Pavshikh Bortsov Sq., Volgograd, 400131, Russia

yaroslavmarenkov5@gmail.com, arseny.lomakin@gmail.com, donsckaia.anastasiya@yandex.ru,
panina0675@yandex.ru

Abstract. The purpose of the research is to partially automate the process of early cancer diagnosis by identifying suspected cancer in a patient based on machine learning and providing interpretive information. Cancer of various organs is among the deadliest human diseases in the world, and a large group of population is exposed to it. According to the data of the Ministry of Health of Russia and calculations of Rosstat for 2005–2023, from 427 thousand to 552 thousand new patients were detected in Russia annually. To solve the problem of searching for effective and accurate methods of early cancer diagnosis in medicine, various computer technologies, including machine learning methods, have recently become increasingly used. The main disadvantage of these methods is low human interpretability of the result obtained. Therefore, there is a need to develop an interpretable method to determine suspected cancer. This paper deals with the problem of interpretability of prediction results performed by machine learning models to solve the problem of predicting the development of abnormalities in living systems using human pancreatic cancer as an example. An interpretable machine learning model was developed based on the results of an extended blood test matched to the fact whether the patient has pancreatic cancer or not. We used local interpretability of the model using SHAP (Shapley Additive exPlanations) method with visualization in the form of a waterfall graph. A variety of classical machine learning models were trained; a comparative analysis of these models was made to identify the result with higher accuracy. Based on the obtained model, interpretive information was formed. A user application was developed to interact with the model. The Random Forest model performed best with an f1-score of 0.859.

Keywords: machine learning, interpretation of machine learning model predictions, machine learning models, machine learning methods, early diagnosis of cancer

For citation: Marenkov Ya.A., Lomakin A.S., Donskaia A.R., Panina A.A. 2025. Applying machine learning methods to solve the problem of predicting the progression of abnormalities in living systems. *Economics. Information technologies*, 52(3): 665–680 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-665-680. EDN UQKESM

Введение

В России и в мире в целом одной из глобальных проблем в сфере здравоохранения остаются онкологические заболевания. Согласно сведениям Росстата, собранным на основании данных Министерства Здравоохранения России за период с 2005 по 2023 год, ежегодно регистрируют от 442 тыс. до 552 тыс. новых случаев злокачественных образований¹.

Одним из ключевых вопросов данной проблемы является ранняя диагностика. На помощь с решением данного вопроса может прийти использование искусственного интеллекта и, в частности, машинного обучения. Его использование может ускорить работу врачей, так как оно позволяет быстро обрабатывать большие объемы данных. Построенные на этой базе программные средства могут упростить и ускорить процесс диагностики, при этом не исключая врача из него. Также немаловажным фактором в данном процессе является обеспечение врача возможностью интерпретации результатов, выдаваемых моделью, чтобы он

¹ Заболеваемость населения социально-значимыми болезнями: Здравоохранение // Росстат: официальный сайт. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721> (дата обращения: 20.03.2025).

(врач) при необходимости мог перепроверить полученный результат или обратить внимание на те или иные показатели.

Авторами была поставлена цель – частичная автоматизация процесса ранней диагностики онкологических заболеваний за счет определения подозрения на наличие у пациента новообразований на базе машинного обучения и предоставления интерпретирующей информации.

В ходе данной статьи будут рассмотрены моменты по созданию интерпретируемого метода классического машинного обучения для решения задачи предсказания развития отклонений в живых системах на примере новообразований поджелудочной железы у человека, выполнена оценка и произведен сравнительный анализ полученных результатов, а также представлено разработанное для данного метода программное средство.

Объекты и методы исследования

Описание предметной области

Для диагностирования различных видов онкологических заболеваний Министерством Здравоохранения России разработаны соответствующие клинические рекомендации. Каждая из них содержит описание симптомов, виды исследований, такие как первичный физикальный осмотр пациента, проведение лабораторно-диагностических исследований, проведение инструментально-диагностических исследований, а также иные виды исследований. Одним из недостатков является сложность и/или продолжительность процесса анализа полученных результатов.

Постоянное увеличение набора новых решений, направленных на выявление заболеваний на стадии лабораторных исследований, является важным вектором развития контура практического здравоохранения Российской Федерации, обобщая весь опыт, накопленный практикующими врачами, и сокращая временные издержки на постановку диагноза. Для решения данных задач могут применяться разнообразные подходы: классические (алгоритмические), онтологический инжиниринг или машинное обучение.

В первом случае алгоритм является сложным в построении, так как требует глубокого изучения предметной области, изучения детального поведения и различных состояний исследуемого объекта в отношении к результирующей характеристике.

Подход в онтологическом инжиниринге предлагает разработать формализованную математическую модель целевой области знаний. Для этого необходимо также детально изучить целевой объект и описать его в виде набора знаний взаимосвязи между ними. Это является на данный момент достаточно трудоёмким процессом для решения локальной задачи.

Третий подход основан на построении статистической модели, который обобщает набор накопленных знаний, строит собственные плохо интерпретируемые человеком связи, но имеет высокую точность на схожих задачах.

В ходе исследования был изучен ряд других публикаций по диагностированию онкологических заболеваний с использованием машинного обучения.

Например, исследователи [Гундырев И.А. и др., 2018] в своей работе рассматривали различные классификаторы для диагностирования рака легких по 8 биохимическим параметрам, полученным из анализа слюны (полученная точность – 72–78 %). В исследовании [Барчука А.А. и др., 2017] приводится сравнение 13 моделей в задачах классификации образцов патологической ткани при злокачественных процессах грудной клетки на основе уровней экспрессии генов (полученная точность – 82 %). В своем исследовании [Reddy, Khanaa, 2023] представляют алгоритм обнаружения рака легких с помощью сегментации изображений компьютерной томографии, используя компьютерное зрение, и последующей классификации рака с помощью моделей глубокого и неглубокого обучения (полученная точность – 92 %, классическое машинное обучение – 88 %). Исследователи [Qiu et al., 2018] в своей работе представили метод диагностирования рака поджелудочной железы на основе текстурного анализа компьютерной томографии (полученная точность – 79 %).



Для повышения качества моделей некоторые исследователи приходят к генерации новых дополнительных характеристик. Так, Демидова Л.А. в своем исследовании [Demidova, 2023] генерирует новые характеристики с помощью алгоритма нелинейного уменьшения размерности (UMAP), аппроксимации энтропии, а также фрактальных размерностей Каца и Хигучи на основе маркеров белков крови (полученное значение по метрике ассурасу – 0,96).

В связи с разнообразием различных наборов данных командой исследования будет исследована задача сравнения типовых моделей машинного обучения для классификации табличных данных на примере диагностирования онкологических заболеваний на данных лабораторных исследований пациентов, который описан ниже.

Формализация и постановка задачи

Главной задачей данного исследования является разработка интерпретируемой модели машинного обучения для задачи диагностирования онкологических заболеваний (на примере рака поджелудочной железы по расширенным анализам крови пациента). Далее, основываясь на полученной модели, необходимо разработать приложение с графическим интерфейсом для пользователей, которое позволит им просмотреть результаты работы модели (предсказания) и интерпретирующую информацию. В следующих разделах будут подробно описаны шаги, выполненные для решения поставленной задачи.

Формально задача определения факта наличия онкологического заболевания представляется как задача классификации следующим образом. Имеется множество случаев $M = \{m_1, \dots, m_n\}$, где каждый элемент данного множества характеризуется набором характеристик расширенного анализа крови $A = \{a_1, \dots, a_k\}$, и ему в соответствие установлен факт наличия или отсутствия у пациента рака поджелудочной железы.

Алгоритм идеального бинарного классификатора представляется следующей формулой:

$$F(m_i, C_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } m_i \notin C_i \\ 1, & \text{если } m_i \in C_i \end{cases}$$

Таким образом, задача сводится к поиску такого классификатора F' , который по точности будет максимально близок к F .

Классификация с точки зрения типа предсказания в данном исследовании рассматривалась с нескольких сторон:

- Бинарный ответ (принадлежность к классу наличия или отсутствия заболевания). Может принимать одно из двух значений $\{0, 1\}$. Таким образом,

$$F' = M \times C \rightarrow \{0, 1\};$$

- Степень подобия (степень, на которую параметры предсказания удовлетворяют для принадлежности к тому или иному классу). Может принимать значение в диапазоне $[0; 1]$. Таким образом,

$$F' = M \times C \rightarrow [0, 1];$$

- Использование вспомогательных интерпретирующих средств.

Исследование основано на базе размеченного набора данных. Данный набор был разделен на обучающую выборку – L и тестовую выборку – T . При этом данные подвыборки не пересекаются, то есть $L \cap T = \emptyset$.

Дизайн исследования

Описание набора данных

Для исследования использовался набор данных M , который изначально (до предварительной обработки данных) содержал 62 показателя расширенного анализа крови A для 1254 записей деперсонализированных пациентов, проходивших обследование. Также каждому элементу данного набора установлен в соответствие факт наличия или отсутствия рака поджелудочной железы C . Изначально множество M содержало 1115 случаев без заболевания и 139 – с заболеванием. Таким образом, набор данных является несбалансированным.

Анализ и предварительная обработка набора данных

Анализ набора данных начался с изучения типов характеристик, предоставляемых набором A . Далее производился поиск и удаление характеристик с большим количеством пропусков (более 10 % в общем или более 40 % для положительного класса). Затем производился количественный анализ и удаление характеристик с малым количеством вариаций (1-2). После чего с целью проверки данных на их принадлежность к нормальному распределению выполнялся одновыборочный тест Колмогорова – Смирнова [Berger, Zhou, 2014] (с уровнем статистической значимости, равным 0,05). По итогам данного теста данные не имеют нормального распределения. Исходя из того, что данные не имеют нормального распределения, и стоит задача бинарной классификации, то для поиска статистически незначимых характеристик для целевой переменной C использовался тест Мана – Уитни [McKnight, Najab, 2010] (с уровнем статистической значимости, равным 0,05). По итогам данного теста статистически незначимые характеристики удалялись. В результате данных действий в наборе характеристик осталось 13 параметров.

Далее перед началом обучения производилась предварительная обработка данных. Сначала для каждой характеристики из набора A по каждой записи M был произведен поиск и замена пропущенных значений на модальное значение данной характеристики. Затем производился поиск с последующим удалением выбросов при помощи метода межквартильного диапазона [Yang et al., 2019]. Далее данные разбивались на две непересекающиеся выборки: тренировочную (70 %) и тестовую (30 %). После чего для лучшего качества работы моделей и уменьшения риска переобучения данные масштабировались, используя метод стандартизации [Raju et al., 2020]. По итогу для обучения моделей машинного обучения получился набор данных M' , который содержит 808 записей (669 записей для пациентов без заболевания и 139 – с заболеванием). Тренировочная выборка L содержит 565 записей (468 – без заболевания, 97 – с заболеванием). Тестовая выборка T содержит 243 записи (201 – без заболевания, 42 – с заболеванием).

Задача классификации

Классификация выполняет задачу установки одной метки из конечного набора меток (классов) для ранее не помеченного объекта. В машинном обучении алгоритм принимает на вход набор размеченных данных, а на выходе он формирует классификационную функцию (модель), которая в свою очередь принимает неразмеченные данные и возвращает либо саму метку, либо степень подобия каждого из возможных классов [Soofi, Awan, 2017].

Задача классификации в машинном обучении может решаться с помощью алгоритмов классического машинного обучения и глубокого машинного обучения. В данном исследовании было решено использовать алгоритмы классического машинного обучения, поскольку, во-первых, для качественного обучения моделей нейронных сетей имеющийся набор данных довольно-таки мал, и с задачей обучения на малых наборах данных как раз лучше справляются именно алгоритмы классического машинного обучения. Во-вторых, в ходе анализа предметной области было выявлено, что чаще используются и показывают лучший результат на табличных данных именно алгоритмы классического машинного обучения, а глубокое обучение используется в основном для анализа изображений.

В данном исследовании использовались следующие алгоритмы классического машинного обучения: дерево решений (Decision Tree) [Priyanka, Kumar, 2020], случайный лес (Random Forest) [Schonlau, Zou, 2020], гистограммный градиентный бустинг (Hist Gradient Boosting) [Guryanov, 2019]. Также использовались следующие статистические алгоритмы: k ближайших соседей [Cunningham, Delany, 2021] и машина опорных векторов (Support Vector Machine) [Mustafa, Abdulazeez, 2021]. Использовались реализации данных алгоритмов, предоставляемые библиотекой scikit-learn.

Настройка и валидация моделей классификации

Валидация моделей происходила с помощью следующих метрик: accuracy, precision, recall, f1-мера, матрица ошибок (confusion matrix), roc-кривые, log loss и MCC. Также для



объективной оценки качества работы моделей для метрик, для которых это возможно, использовалась кросс-валидация [Bates et al., 2023]. Использовались реализации данных метрик из библиотеки `scikit-learn`.

Модели, реализации которых представлены в библиотеках по машинному обучению, имеют базовые гиперпараметры, на которых данный алгоритм выдает хороший результат для большинства задач. Но для получения лучшего результата в конкретной задаче их необходимо настраивать. В данном исследовании все рассматриваемые модели изначально обучались на базовых гиперпараметрах (за исключением одного, поскольку в данных имеется дисбаланс классов, то для борьбы с данной проблемой было выполнено перевзвешивание классов в моделях), затем для модели, показавшей лучший результат, был выполнен подбор гиперпараметров с помощью метода `Grid Search`.

Проблема интерпретируемости

При работе с моделями машинного обучения одной из проблем является их интерпретируемость. Это означает, что в результатах предсказаний моделей машинного обучения не всегда понятно, из-за чего модель сделала тот, а не иной прогноз (работа как с «черным» ящиком). Причем между интерпретируемостью и сложностью моделей (в том числе и их точностью) существует обратно-пропорциональная зависимость – чем выше сложность модели, тем обычно выше ее точность, но меньше интерпретируемость [Stiglic et al., 2020].

Под интерпретируемостью в данной работе понимается смысл прогнозов. Интерпретируемость бывает локальной и глобальной.

Локальная интерпретируемость позволяет понять, почему модель сделала такой вывод для одного конкретного прогноза, показывает можно ли доверять данному прогнозу [Stiglic et al., 2020].

Глобальная же интерпретируемость, соответственно, демонстрирует, как модель работает в целом на множестве данных. Данный вид интерпретируемости позволяет найти взаимосвязь характеристик, определить наиболее важные характеристики для модели и просмотреть общую логику прогнозирования [Stiglic et al., 2020; Hakkoum et al., 2024].

Обучение моделей машинного обучения

Результаты обучения на базовых гиперпараметрах

Изначально все рассматриваемые модели (указанные в дизайне исследования) обучались на их базовых гиперпараметрах, предоставляемых реализацией данных алгоритмов в библиотеке `scikit-learn`^{1,2,3,4,5}, исключая один параметр, который был изменен – `class_weight`. Для него было установлено значение «`balanced`», которое автоматически выполняет перевзвешивание классов в зависимости от его частоты появления в данных. Также для фиксации случайной составляющей и корректного сравнения метрик моделей было установлено значение «12» для гиперпараметра `random_state`.

Валидация моделей происходила с помощью способов, указанных в соответствующем разделе дизайна исследования. Сравнительная табл. 1 содержит значения числовых метрик для рассматриваемых алгоритмов.

¹ `DecisionTreeClassifier`: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).

² `RandomForestClassifier`: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).

³ `HistGradientBoostingClassifier`: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.HistGradientBoostingClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).

⁴ `KNeighborsClassifier`: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neighbors.KNeighborsClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).

⁵ `SVC`: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.SVC.html> (дата обращения: 08.05.2025).

Таблица 1
Table 1

Сравнение числовых метрик
Comparison of numerical metrics

Метрика / Metric	Дерево решений / Decision Tree	Случайный лес / Random Forest	Гистограммный градиентный бустинг / Hist Gradient Boosting	К ближайших соседей / K Nearest Neighbors	Машина опорных векторов / Support Vector Machine
Accuracy	0,893	0,926	0,909	0,914	0,876
Precision	0,813	0,958	0,861	0,902	0,785
Recall	0,813	0,786	0,804	0,778	0,775
F1-мера	0,813	0,842	0,828	0,822	0,779
Log loss	3,856	0,216	0,352	1,454	0,269
MCC	0,625	0,724	0,663	0,669	0,560

Далее в табл. 2 представлены изображения графических метрик для каждого из рассматриваемых алгоритмов.

Таблица 2
Table 2

Сравнение графических метрик
Comparison of graphical metrics

Алгоритм / Algorithm	Матрица ошибок / Confusion matrix	ROC-кривые / ROC-curve
1	2	3
Дерево решений / Decision Tree		
Случайный лес / Random Forest		

Окончание табл. 2
End of the table 2

Алгоритм / Algorithm	Матрица ошибок / Confusion matrix	ROC-кривые / ROC-curve
1	2	3
Гистограммный градиентный бустинг / Hist Gradient Boosting	Hist Gradient Boosting Classifier	Hist Gradient Boosting Classifier
К ближайших соседей / K Nearest Neighbors	K Neighbors Classifier	K Neighbors Classifier
Машина опорных векторов / Support Vector Machine	SVM Classifier	SVM Classifier

Так как в данных присутствует дисбаланс классов, то наиболее показательными метриками является F1-мера, MCC и ROC-кривые. Также немаловажной является и матрица ошибок. Таким образом, лучшей моделью на базовых гиперпараметрах является алгоритм случайного леса. Именно на данном алгоритме и выполнялся дальнейший подбор гиперпараметров с помощью метода Grid Search.

Интерпретируемость моделей машинного обучения, использованная в исследовании

В данном исследовании большее значение имеет именно локальная интерпретируемость, так как важна интерпретация для прогноза модели по данным пациента, которые только что ввели в программу.

Для интерпретации моделей в данной работе использовался метод SHAP (Shapley Additive exPlanations), который является инструментом как для локальной, так и для глобальной интерпретируемости. Он основан на кооперативной теории игр, позволяет интерпретировать многие алгоритмы машинного обучения, описан в статьях [Li, 2022; Pelegrina, 2023; Lundberg, Lee, 2017]. Данный инструмент предоставляет информацию в удобном графическом виде. Для данного исследования был выбран график водопадного вида, который иллюстрирует влияние каждой из характеристик на принятое решение моделью в сторону одного из классов, и представляет собой интерпретацию степени подобия для одного конкретного объекта.

Рассмотрим следующий пример такого интерпретирующего графика, который представлен на рис. 1.

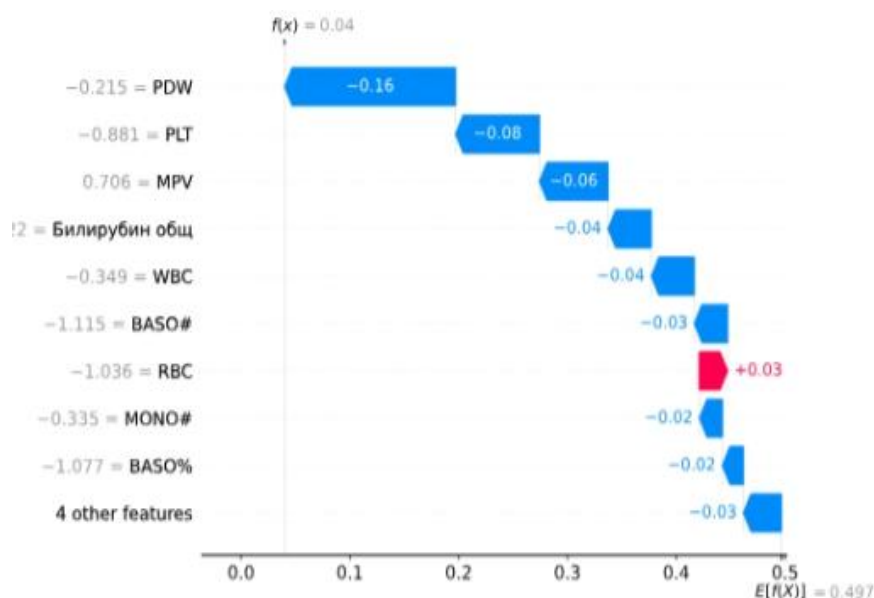


Рис. 1. Пример водопадного интерпретирующего графика SHAP

Fig. 1. An example of a waterfall interpretive chart SHAP

На данном примере представлен интерпретирующий график SHAP для одного из предсказаний. По данному графику видно, что большинство характеристик внесли свой вклад в сторону предсказания отрицательного класса. При этом также видно, за счет водопадной стилистики, какая характеристика внесла наибольший вклад в предсказание (в данном случае PDW), поскольку отображение данных отсортировано по вносимому вкладу в предсказание. Данный факт может позволить эксперту в данной предметной области определить те факторы, которым модель отвела большее значение, и, сопоставив их со своими знаниями и опытом, определить, насколько можно довериться результатам предсказания для каждого отдельного случая.

Результаты и их обсуждение

Результирующая модель машинного обучения

Результирующая модель была получена в результате подбора гиперпараметров для модели случайного леса, которая дала лучший результат на базовых гиперпараметрах. В табл. 3 указаны гиперпараметры алгоритма случайного леса, подбор которых был выполнен.

Таблица 3
Table 3

Подбираемые значения гиперпараметров
Selectable hyperparameter values

Гиперпараметр / Hyperparameter	Набор значений / Value set
n_estimators	100, 200, 300, 50, 25, 75, 10
criterion	'gini', 'entropy', 'log_loss'
max_depth	None, 5, 7, 10, 15
max_features	'sqrt', 'log2'
min_samples_split	2, 3, 4, 5, 7, 10
min_samples_leaf	1, 2, 3, 4, 5

В итоге лучший результат по Grid Search показала модель случайного леса со следующим набором гиперпараметров:

- n_estimators: 25;
- criterion: «entropy»;
- max_depth: 10;
- max_features: «sqrt»;
- min_samples_split: 10;
- min_samples_leaf: 1.

Данная модель имеет следующие числовые метрики:

- accuracy: 0,926;
- precision: 0,895;
- recall: 0,833;
- f1-score: 0,859;
- log loss: 0,261;
- mss: 0,725.

На рис. 2 приведены матрица ошибок и ROC-кривая для полученной модели.

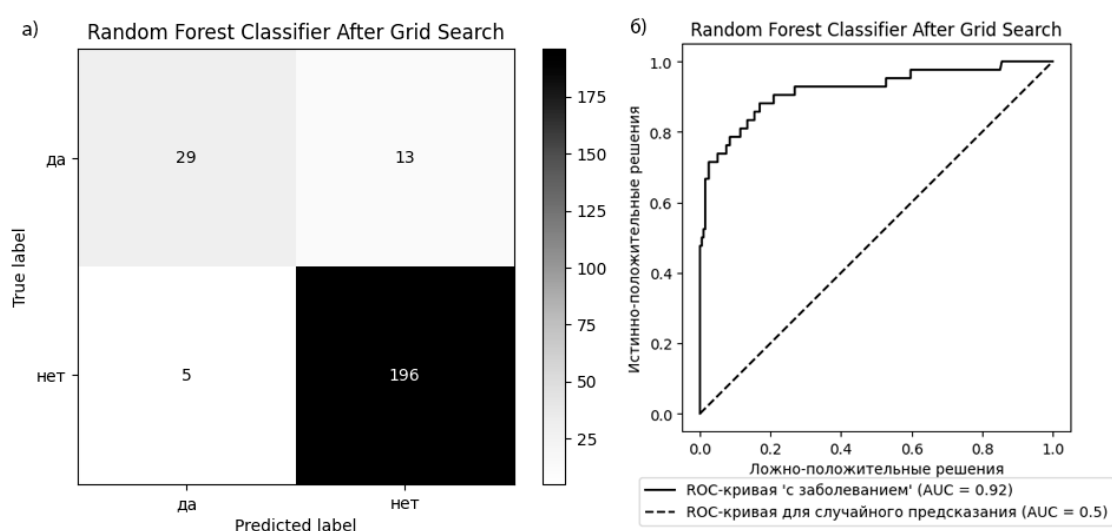


Рис. 2. Графические метрики для случайного леса после подбора гиперпараметров:

а) матрица ошибок; б) ROC-кривые

Fig. 2. Graphical metrics for Random Forest after hyperparameter selection:

a) error matrix; b) ROC curves

Полученная модель использовалась в дальнейшем для создания интерпретирующей информации и разработки программного средства, описанного в следующем разделе.

Разработанное программное средство

Далее полученная модель использовалась при разработке клиент-серверного веб-приложения. Данное приложение разрабатывалась на языке программирования Python с использованием фреймворка Flask. По своей сути приложение представляет собой одностраничное приложение.

Клиент-серверное взаимодействие – это распределение системы на две части: клиент и сервер. В простом случае клиент выполняет функции логики представления и общения с сервером с помощью запросов. Сервер выполняет вычислительную часть приложения, то есть занимается обработкой полученных данных, выполнением необходимых вычислений и формированием результата¹.

Далее на рис. 3, 4, 5 приведены примеры работы программы.

Рис. 3. Пример работы программы: запуск программы
Fig. 3. Example of the program functioning: start the program

Метрика	Значение
accuracy	0.9259
recall	0.7857
precision	0.9589
f1	0.8422
log_loss	0.2162
mcc	0.7242

Рис. 4. Пример работы программы: предсказание для здорового пациента
Fig. 4. Example of the program functioning: prediction for a healthy patient

¹ Иванько, А.Ф. Информационные системы в издательском деле : учебное пособие / А.Ф. Иванько, М.А. Иванько. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 148 с. – ISBN 978-5-8114-3843-3.

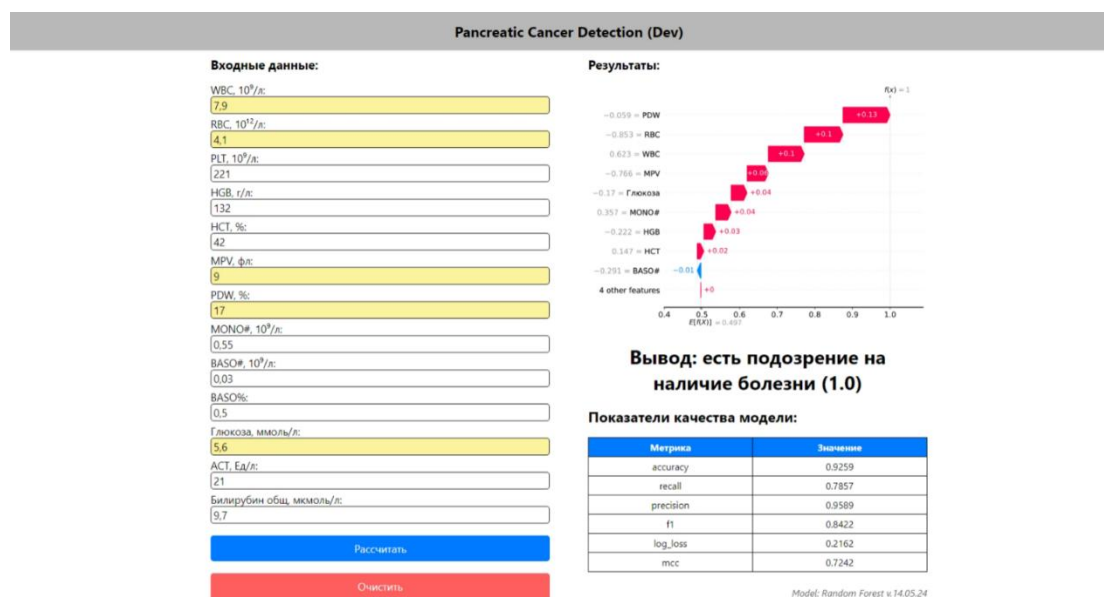


Рис. 5. Пример работы программы: предсказание для больного пациента
Fig. 5. Example of the program functioning: prediction for a patient with disease

Заключение

В ходе данной работы был произведен анализ предметной области, поставлена, формализована и исследована задача определения факта наличия или отсутствия у пациента онкологического заболевания на примере раннего диагностирования рака поджелудочной железы.

В ходе выполнения задачи был произведен анализ и предварительная обработка исходного набора данных для дальнейшего обучения. Далее был произведен выбор набора классификаторов и произведен их сравнительный анализ и настройка для исследуемой задачи. По результатам наилучший результат показал алгоритм случайного леса (Random Forest) после подбора гиперпараметров с f1-score 0,859. После чего полученная модель дополнительно использовалась для создания интерпретирующей информации с помощью метода SHAP. Затем для полученной модели было разработано программное средство с пользовательским графическим интерфейсом для взаимодействия с моделью и отображения результатов работы модели, включая интерпретирующую информацию в виде графика водопадного вида.

В дальнейшем командой исследователей планируется улучшение качества предсказания и добавление дополнительной интерпретирующей информации. Также планируется масштабирование полученного программного средства для применения в массовой лабораторной проверке анализов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь со сбором данных и в проведении исследований лаборатории ГУЗ «КДП №2» г. Волгограда, а также следующим людям:

– Панин Станислав Игоревич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой общей хирургии ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России (г. Волгоград, Россия);

– Суворов Владимир Александрович, кандидат медицинских наук, врач-онколог, заведующий торакоабдоминальным отделением;

– Зубков Александр Владимирович, кандидат технических наук, начальник управления информационного развития ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России (г. Волгоград, Россия), доцент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (г. Волгоград, Россия);

– *Безбородов Сергей Александрович*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой клинической инженерии и технологий искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России (г. Волгоград, Россия)

– *Коваленко Надежда Витальевна*, кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой онкологии, гематологии и трансплантологии Института НМФО (Непрерывного Медицинского и Фармацевтического Образования) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России (г. Волгоград, Россия);

– *Шушкова Ирина Геннадьевна*, к.м.н., ассистент кафедры лучевой, функциональной, лабораторной диагностики ИНМФО ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России (г. Волгоград, Россия);

– *Быков Александр Викторович*, д.м.н., профессор, профессор кафедры хирургических болезней № 1 ИНМФО, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России (г. Волгоград, Россия).

Список источников

1. Заболеваемость населения социально-значимыми болезнями: Здравоохранение // Росстат: официальный сайт. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721> (дата обращения: 20.03.2025).
2. DecisionTreeClassifier: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).
3. RandomForestClassifier: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).
4. HistGradientBoostingClassifier: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.HistGradientBoostingClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).
5. KNeighborsClassifier: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neighbors.KNeighborsClassifier.html> (дата обращения: 08.05.2025).
6. SVC: [Справочник API] // Scikit-learn: официальный сайт. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.SVC.html> (дата обращения: 08.05.2025).
7. Иванько, А.Ф. Информационные системы в издательском деле: учебное пособие / А.Ф. Иванько, М.А. Иванько. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 148 с. – ISBN 978-5-8114-3843-3.

Список литературы

- Барчук А., Атрощенко А., Гайдуков В., Виноградов П., Тараканов С., Канаев С., Арсеньев А., Комаров Ю., Харитонов М., Барчук, А., Мерабишвили В., Кузнецов В., Трофимов В., Гусарова Н., Коцюба И., Беляев А., Подольский М., Нефедова, А. 2017. Автоматизированная диагностика в популяционном скрининге рака легкого. *Вопросы онкологии*, 63(2): 215–220. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2017-63-2-215-220>.
- Гундырев И.А., Бельская Л.В., Косенок В.И., Сарф Е.А. 2018. Применение синтетических образов для решения задачи классификации на примере диагностики рака легкого. *Вестник Российской Академии медицинских наук*, 73(2): 96–104. <https://doi.org/10.15690/vramn946>.
- Bates S., Hastie T., Tibshirani R., 2023. Cross-Validation: What Does It Estimate and How Well Does It Do It. *Journal of the American Statistical Association*, 119(546): 1434–1445. <https://doi.org/10.1080/01621459.2023.2197686>.
- Berger V., Zhou Y., ред. Balakrishnan N., Colton T., Everitt B., Piegorsch W., Ruggeri F., Teugels J.L., 2014. Kolmogorov–Smirnov Test: Overview. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat06558>.
- Cunningham P., Delany S.J., 2021. K-Nearest Neighbour Classifiers - A Tutorial. *ACM Comput. Surv*, 54(6): article number 128. <https://doi.org/10.1145/3459665>.
- Demidova L.A., 2023. A Novel Approach to Decision-Making on Diagnosing Oncological Diseases Using Machine Learning Classifiers Based on Datasets Combining Known and/or New Generated Features of a Different Nature. *Mathematics*, 11(4). Article number: 792. <https://doi.org/10.3390/math11040792>.



- Guryanov A., 2019. Histogram-Based Algorithm for Building Gradient Boosting Ensembles of Piecewise Linear Decision Trees. Analysis of Images, Social Networks and Texts: 8th International Conference, *AIST 2019*. Cham: Springer. 39–50. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37334-4_4.
- Hakkoum H., Idri A., Abnane I., 2024. Global and local interpretability techniques of supervised machine learning black box models for numerical medical data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107829>.
- Li Z., 2022. Extracting spatial effects from machine learning model using local interpretation method: An example of SHAP and XGBoost. *Computers, Environment and Urban Systems*, 96: article number 101845. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101845>.
- Lundberg S.M., Lee S., 2017. A unified approach to interpreting model predictions. Advances in neural information processing systems. Red Hook: Curran Associates Inc. 4768–4777. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>.
- McKnight P.E., Najab J., ред. Weiner I.B., Craighead W.E., 2010. Mann-Whitney U Test. The Corsini Encyclopedia of Psychology. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0524>.
- Mustafa A.D., Abdulazeez A.M., 2021. Machine Learning Applications based on SVM Classification A Review. *Qubahan Academic Journal*, 1(2): 81–90. <https://doi.org/10.48161/qaj.v1n2a50>.
- Pelegrina, Duarte L.T., Grabisch M., 2023. A k-additive Choquet integral-based approach to approximate the SHAP values for local interpretability in machine learning. *Artificial Intelligence*, 325: article number 104014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02166>.
- Priyanka, D. Kumar., 2020. Decision tree classifier: a detailed survey. *International Journal of Information and Decision Sciences*, 12(3): 246–269. <https://doi.org/10.1504/ijids.2020.10029122>.
- Qui J., Wu Y., Chen J., Hui B., Huang Z., Ji L., 2018. A texture analysis method based on statistical contourlet coefficient applied to the classification of pancreatic cancer and normal pancreas. Proceedings of the International Symposium on Big Data and Artificial Intelligence (ISBD AI '18). New York: ACM. 9–13. <https://doi.org/10.1145/3305275.3305278>.
- Raju V.N.G., Lakshmi K.P., Jain V.M., Kalidindi A., Padma V., 2020. Study the Influence of Normalization/Transformation process on the Accuracy of Supervised Classification. Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT). Tirunelveli: IEEE. 729–735. <http://dx.doi.org/10.1109/ICSSIT48917.2020.9214160>.
- Reddy N.S., Khanaa V., 2023. Intelligent deep learning algorithm for lung cancer detection and classification. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(3): 1747–1754. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i3.4579>.
- Schonlau M., Zou R. Y., 2020. The random forest algorithm for statistical learning. *The Stata Journal*, 20(1): 3–29. <https://doi.org/10.1177/1536867X20909688>.
- Soofi A.A., Awan A., 2017. Classification Techniques in Machine Learning: Applications and Issues. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 13: 459–465. <http://dx.doi.org/10.6000/1927-5129.2017.13.76>.
- Stiglic G., Kocbek P., Fijacko N., Zitnik M., Verbert K., Cilar L., 2020. Interpretability of machine learning-based prediction models in healthcare. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(5): e1379. <https://doi.org/10.1002/widm.1379>.
- Yang J., Rahardja S., Fränti P., 2019. Outlier detection: how to threshold outlier scores. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, Information Processing and Cloud Computing (AIIPCC '19). New York: ACM. 1–6. <https://doi.org/10.1145/3371425.3371427>.

References

- Barchuk A., Atroshchenko A., Gaidukov V., Vinogradov P., Tarakanov S., Kanaev S., Arsen'ev A., Komarov YU., Kharitonov M., Barchuk, A., Merabishvili V., Kuznetsov V., Trofimov V., Gusarova N., Kotsyuba I., Belyaev A., Podol'skii M., Nefedova, A., 2017. Automated diagnosis in a population-based screening for lung cancer. *Problems in oncology*, 63(2): 215–220. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2017-63-2-215-220>. (in Russian)
- Gundyrev I.A., Bel'skaya L.V., Kosenok V.K., Sarf E.A., 2018. The use of synthetic images for solving the classification problem by the example of lung cancer diagnosis. *Annals of the Russian academy of medical sciences*, 73(2): 96–104. <https://doi.org/10.15690/vramn946>. (in Russian)
- Bates S., Hastie T., Tibshirani R., 2023. Cross-Validation: What Does It Estimate and How Well Does It Do It. *Journal of the American Statistical Association*, 119(546): 1434–1445. <https://doi.org/10.1080/01621459.2023.2197686>.

- Berger V., Zhou Y., ред. Balakrishnan N., Colton T., Everitt B., Piegorsch W., Ruggeri F., Teugels J.L., 2014. Kolmogorov–Smirnov Test: Overview. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat06558>.
- Cunningham P., Delany S.J., 2021. K-Nearest Neighbour Classifiers - A Tutorial. *ACM Comput. Surv.*, 54(6): article number 128. <https://doi.org/10.1145/3459665>.
- Demidova L.A., 2023. A Novel Approach to Decision-Making on Diagnosing Oncological Diseases Using Machine Learning Classifiers Based on Datasets Combining Known and/or New Generated Features of a Different Nature. *Mathematics*, 11(4). Article number: 792. <https://doi.org/10.3390/math11040792>.
- Guryanov A., 2019. Histogram-Based Algorithm for Building Gradient Boosting Ensembles of Piecewise Linear Decision Trees. Analysis of Images, Social Networks and Texts: 8th International Conference, AIST 2019. Cham: Springer. 39–50. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37334-4_4.
- Hakkoum H., Idri A., Abnane I., 2024. Global and local interpretability techniques of supervised machine learning black box models for numerical medical data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107829>.
- Li Z., 2022. Extracting spatial effects from machine learning model using local interpretation method: An example of SHAP and XGBoost. *Computers, Environment and Urban Systems*, 96: article number 101845. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101845>.
- Lundberg S.M., Lee S., 2017. A unified approach to interpreting model predictions. Advances in neural information processing systems. Red Hook: Curran Associates Inc. 4768–4777. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>.
- McKnight P.E., Najab J., ред. Weiner I.B., Craighead W.E., 2010. Mann-Whitney U Test. The Corsini Encyclopedia of Psychology. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0524>.
- Mustafa A.D., Abdulazez A.M., 2021. Machine Learning Applications based on SVM Classification A Review. *Qubahan Academic Journal.*; 1(2): 81–90. <https://doi.org/10.48161/qaj.v1n2a50>.
- Pelegrina, Duarte L.T., Grabisch M., 2023. A k-additive Choquet integral-based approach to approximate the SHAP values for local interpretability in machine learning. *Artificial Intelligence*, 325: article number 104014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02166>.
- Priyanka, D. Kumar., 2020. Decision tree classifier: a detailed survey. *International Journal of Information and Decision Sciences*, 12(3): 246–269. <https://doi.org/10.1504/ijids.2020.10029122>.
- Qui J., Wu Y., Chen J., Hui B., Huang Z., Ji L., 2018. A texture analysis method based on statistical contourlet coefficient applied to the classification of pancreatic cancer and normal pancreas. Proceedings of the International Symposium on Big Data and Artificial Intelligence (ISBD AI '18). New York: ACM. 9–13. <https://doi.org/10.1145/3305275.3305278>.
- Raju V.N.G., Lakshmi K.P., Jain V.M., Kalidindi A., Padma V., 2020. Study the Influence of Normalization/Transformation process on the Accuracy of Supervised Classification. Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT). Tirunelveli: IEEE. 729–735. <http://dx.doi.org/10.1109/ICSSIT48917.2020.9214160>.
- Reddy N.S., Khanaa V., 2023. Intelligent deep learning algorithm for lung cancer detection and classification. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(3): 1747–1754. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i3.4579>.
- Schonlau M., Zou R. Y., 2020. The random forest algorithm for statistical learning. *The Stata Journal*, 20(1): 3–29. <https://doi.org/10.1177/1536867X20909688>.
- Soofi A.A., Awan A., 2017. Classification Techniques in Machine Learning: Applications and Issues. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 13: 459–465. <http://dx.doi.org/10.6000/1927-5129.2017.13.76>.
- Stiglic G., Kocbek P., Fijacko N., Zitnik M., Verbert K., Cilar L., 2020. Interpretability of machine learning-based prediction models in healthcare. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(5): e1379. <https://doi.org/10.1002/widm.1379>.
- Yang J., Rahardja S., Fränti P., 2019. Outlier detection: how to threshold outlier scores. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, Information Processing and Cloud Computing (AIPCC '19). New York: ACM. 1–6. <https://doi.org/10.1145/3371425.3371427>.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 03.06.2025

Поступила после рецензирования 31.08.2025

Принята к публикации 08.09.2025

Received June 03, 2025

Revised August 31, 2025

Accepted September 08, 2025



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маренков Ярослав Анатольевич, студент магистратуры 1 курса кафедры «Программное обеспечение автоматизированных систем», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия.

ORCID: 0009-0005-7314-8924

Ломакин Арсений Сергеевич, студент магистратуры 1 курса кафедры «Программное обеспечение автоматизированных систем», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия.

ORCID: 0009-0001-9340-1748

Донская Анастасия Романовна, старший преподаватель кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия; старший преподаватель кафедры клинической инженерии и технологий искусственного интеллекта, Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Волгоград, Россия.

ORCID: 0000-0003-3086-4929

Панина Анна Александровна, доктор медицинских наук, профессор кафедры лучевой, функциональной, лабораторной диагностики ИНМФО, Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Волгоград, Россия.

ORCID: 0000-0003-2750-8579

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yaroslav A. Marenkov, 1st year Master's degree student of the Department of Software Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.

ORCID: 0009-0005-7314-8924

Arseniy S. Lomakin, 1st year Master's degree student of the Department of Software Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.

ORCID: 0009-0001-9340-1748

Anastasia R. Donskaia, Senior Lecturer at the Department of Software Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia; Senior lecturer at the Department of Clinical Engineering and Artificial Intelligence Technologies, Volgograd State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Volgograd, Russia.

ORCID: 0000-0003-3086-4929

Anna A. Panina, MD, Associate Professor of the Department of Radiation, Functional, Laboratory Diagnostics, Volgograd State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Volgograd, Russia.

ORCID: 0000-0003-2750-8579

УДК 004.89
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-681-696
EDN VHBEII

Поддержка принятия решений о качестве работы оборудования на машиностроительном предприятии на основе интеллектуальных методов

Конев К.А.

Уфимский университет науки и технологий,
Россия, 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32
sireo@rambler.ru

Аннотация. Статья посвящена описанию подходов к реализации системы поддержки принятия решений на основе ситуационно-онтологического моделирования и методов машинного обучения для оценки состояния металлорежущего оборудования на машиностроительном предприятии. Исследование проводилось с целью повышения точности прогнозирования состояния станков и обоснованности решений о их обслуживании или ремонте, что особенно важно в условиях авиационного машиностроения с высокими требованиями к качеству продукции. Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизации брака, снижения простоев и повышения эффективности управления парком оборудования, включающим станки различного возраста и технического состояния. Новизна предложенного решения заключается в интеграции онтологической модели, формализующей знания о ситуациях, решениях и сценариях, с моделью градиентного бустинга, предназначенной для прогнозирования необходимости ремонта на основе исторических данных. Практическая ценность выражается в возможности автоматизации анализа состояния оборудования, интерпретируемости результатов прогнозирования и внедрении системы в реальные производственные процессы для повышения надежности и качества выпускаемых деталей. Результаты исследования демонстрируют работоспособность предложенного подхода и его применимость для решения задач обеспечения качества в машиностроении.

Ключевые слова: машинное обучение, принятие решений, ситуационно-онтологическая методология разработки систем поддержки принятия решений, OWL-модель, обеспечение качества, Python, металлорежущее оборудование, градиентный бустинг

Для цитирования: Конев К.А. 2025. Поддержка принятия решений о качестве работы оборудования на машиностроительном предприятии на основе интеллектуальных методов. *Экономика. Информатика*, 52(3): 681–696. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-681-696. EDN VHBEII

Support for Decision-Making on the Quality of Equipment Operation at a Mechanical Engineering Enterprise Based on Intelligent Methods

Konstantin A. Konev

Ufa University of Science and Technology,
32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Republic of Bashkortostan, Russia
sireo@rambler.ru

Abstract. The article describes approaches to implementing a decision support system based on situational-ontological modeling and machine learning methods for assessing the state of metal-cutting equipment at a mechanical engineering enterprise. The study was conducted to improve the accuracy of forecasting the state of machines and the validity of decisions on their maintenance or repair, which is especially important in the context

© Конев К.А., 2025



of aircraft engineering with high requirements for product quality. The relevance of the study is due to the need to minimize defects, reduce downtime and improve the efficiency of managing a fleet of equipment, including machines of different ages and technical conditions. The novelty of the proposed solution lies in the integration of an ontological model that formalizes knowledge about situations, decisions and scenarios, with a gradient boosting model designed to predict the need for repairs based on historical data. The practical value is expressed in the ability to automate the analysis of the equipment state, interpretability of the forecasting results and the implementation of the system in real production processes to improve the reliability and quality of manufactured parts. The results of the study demonstrate the operability of the proposed approach and its applicability to solving quality assurance problems in mechanical engineering.

Keywords: machine learning, decision making, situational-ontological methodology for developing decision support systems, OWL model, quality assurance, Python, metal-cutting equipment, gradient boosting

For citation: Konev K.A. 2025. Support for Decision-Making on the Quality of Equipment Operation at a Mechanical Engineering Enterprise Based on Intelligent Methods. *Economics. Information technologies*, 52(3): 681–696 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-681-696. EDN VHBEII

Введение

Качество продукции в авиационном машиностроении напрямую зависит от точности и надежности металлорежущего оборудования [Еленев, 2023]. Особую значимость этот аспект приобретает в механосборочных цехах, где серийное производство деталей сопровождается высокими требованиями к точности и минимизации брака. При этом даже незначительные отклонения в работе одного станка могут спровоцировать серьезные нарушения технологических процессов и привести к значительным экономическим потерям.

Актуальной задачей становится не просто контроль состояния оборудования, но и упреждающий анализ его работы. Именно здесь на первый план выходят методы машинного обучения [Machine Learning, 2025], которые позволяют не только выявлять проблемные зоны, но и прогнозировать их развитие. Такой подход создает прочную основу для принятия обоснованных решений о необходимости обслуживания или замены оборудования, что существенно повышает эффективность управления производственными процессами.

Ситуационно-онтологический подход к принятию решений по вопросам оборудования

Ситуационно-онтологический подход представляет собой методологию, объединяющую ситуационное моделирование и онтологическое представление знаний для поддержки принятия решений в сложных производственных системах [Конеv, 2024]. Его основу составляет теоретико-множественное описание взаимосвязей между уровнями управления (продукт, процесс, система), а знания о предметной области формализуются через концепты, отношения и правила. Такая структура позволяет эффективно организовать данные о бизнес-процессах, ситуациях, решениях и сценариях их реализации, особенно при работе с большими объемами информации и в условиях неопределенности.

В механосборочном производстве [Воронин, 1985] контроль состояния оборудования усложняется ограниченными ресурсами предприятия [Янов, 2024]. Количество специалистов недостаточно для постоянного мониторинга всего станочного парка, что создает риски возникновения нештатных ситуаций. Неисправности или неправильная настройка оборудования могут привести к серьезным последствиям: росту процента брака, остановке производственной линии и значительным экономическим потерям. Внезапные отказы случаются редко, поскольку обычно им предшествуют деградиационные процессы, которые можно выявить на ранних этапах [Шашок, 2001].

Для решения этой задачи предлагается применить ситуационно-онтологический подход, который формализует знания о работе оборудования, автоматизирует анализ данных и генерирует рекомендации для принятия решений [Антонов, 2021]. На первом этапе

проводится идентификация ситуации с использованием лингвистических переменных и семантических мер, что позволяет учитывать как количественные, так и качественные характеристики проблемы.

Формально ситуация S может быть определена как подмножество онтологии O предметной области $O = \langle C, R, F \rangle$, где C – множество концептов (например, «станок», «ремонт», «брак»), R – множество отношений между концептами, F – множество функций интерпретации [Гаврилова, 2000]. В этом случае $S \subseteq O$, т. е. ситуация является элементом онтологии.

Идентификация ситуации может быть выражена через функцию выбора f_{sel} , которая на основе множества параметров оборудования $Ch = \{ch_1, \dots, ch_n\}$ и множества правил $Cr = \{cr_1, \dots, cr_m\}$ возвращает конкретную ситуацию s_i : $s_i = f_{sel}(Ch, Cr)$.

Каждая ситуация характеризуется набором весовых коэффициентов w_j , соответствующих важности параметра ch_j , а также значениями самих параметров x_{ij} , определёнными для станка i . Тогда взвешенная сумма показателей для ситуации может быть представлена как:

$$W_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}. \quad (1)$$

Особое значение при анализе состояния оборудования имеет метод Парето, позволяющий выделить 20 % наиболее проблемного оборудования, ответственного за 80 % всех производственных отклонений. В рамках СОП метод Парето мы применим на этапе идентификации ситуации для ранжирования оборудования по степени риска.

Пусть $Eq = \{eq_1, \dots, eq_k\}$ – множество единиц оборудования, а $W(eq_i)$ – взвешенная сумма характеристик станка eq_i , определённая по (1). Тогда оборудование ранжируется по убыванию $W(eq_i)$, и выбираются те станки, которые составляют 20 % от общего числа, но дают не менее 80 % совокупного значения W .

Формула для определения порога отбора по методу Парето [Тихвинский, 2022] может быть представлена следующим образом:

$$Eq_{NA} = \left\{ eq_i \in Eq \mid \frac{\sum_{eq_i \in Eq_{i20}} W(eq_i)}{\sum_{eq_i \in Eq} W(eq_i)} \geq 0.8 \right\}, \quad (2)$$

где Eq_{NA} – множество станков, находящихся в состоянии, которое требует детального анализа; Eq_{i20} – лучшие 20 % оборудования по значению $W(eq_i)$.

На основании выражения (2) можно определять перечень станков, которые требуют более детального анализа.

Затем строится классификация возможных решений, учитывающая специфику ситуаций. Особое внимание уделяется интеграции нормативных требований и эмпирических знаний специалистов через формализованные правила «ЕСЛИ-ТО», которые становятся основой для автоматизированных механизмов принятия решений. Интеграция нормативных документов через OWL-модели [Самигулина, 2015] создает единое информационное пространство для принятия решений на всех уровнях управления. Система поддержки принятия решений (СППР), основанная на этом подходе, способна анализировать замеры, данные с датчиков, оценивать риски и генерировать конкретные рекомендации для исполнителей, что повышает эффективность работы механосборочных цехов за счет снижения времени на анализ проблем, минимизации ошибок и автоматизации документооборота.



Описание ситуации на предприятии

Ключевой задачей машиностроительного предприятия является обеспечение точности изготовления деталей, так как значительная часть продукции относится к категории особо ответственных [Казюлин, 2024]. Для анализа текущего состояния оборудования и выявления рисков, связанных с износом узлов и механизмов старых станков, необходимо знать основные характеристики и состояние этого оборудования (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Основные характеристики станков цеха
Main characteristics of the workshop machines

Тип станка	Модель	Год вып.	Посл. ремонт	Основные виды операций	Статус	Примечание (риски)
Токарный	1М63НФ3	1985	кв. 4 2020	Токарная обработка, расточка	Работает	Износ направляющих, риск поломки шпинделя
Токарный	DMG Mori NLX 3000	2021	Нет	Многофункциональная обработка	Работает	—
Токарный	16Б16	1992	кв. 2 2022	Черновая токарная обработка	Работает	Износ направляющих, требуется регулярная смазка
Фрезерный	6Р13	1982	кв. 3 2018	Фрезерование плоскостей	В ремонте	Капитальный ремонт
Фрезерный	Haas VF-2	2015	кв. 1 2023	3D-фрезерование	Работает	Необходима профилактика системы охлаждения
Сверлильный	2А135	1992	кв. 2 2021	Сверление, зенкерование	Работает	Износ шпинделя, возможны отклонения в точности
Шлифовальный	3А151	1995	кв. 4 2021	Плоское шлифование	Работает	Возможны отклонения в размерах
Ленточно-пильный	Kasto Microcut 5.6	2021	Нет	Точная резка заготовок	Работает	—
Электро-эрозионный	APT-250	1991	кв. 3 2021	Электроэрозионная обработка	Работает	Необходима замена электродов
Координатно-расточной	2А458	1985	кв. 4 2020	Расточка прецизионных отверстий	В резерве	Устаревшая модель, низкая точность
Координатно-расточной	Moore Jig Grinders	2020	Нет	Высокоточная расточка	Работает	—

Анализ данных выделяет три основные группы оборудования: изношенные станки старого парка (например, токарный 1М63НФ3), современные высокотехнологичные станки (DMG Mori NLX 3000, Moore Jig Grinders) и оборудование среднего возраста (Haas VF-2, 2А135), требующее регулярного обслуживания. Для систематизации оценки состояния и принятия решений об обслуживании была разработана модель, структурирующая информацию о ситуациях, решениях и сценариях, которая формализует знания о работе

оборудования через классификацию параметров и их взаимодействий. Такая структуризация особенно важна для старого и смешанного парков оборудования разного возраста и состояния, создавая основу для автоматизированного анализа данных и генерации рекомендаций по обслуживанию [Матвеева, 2021]. Рассмотрим описание онтологии о состоянии оборудования и возможных действиях при проблемных ситуациях.

Полное описание онтологии

Для описания онтологии необходимо задать методы, которые будут использоваться на этапах от идентификации ситуации до реализации принятого решения. В этом случае классы, их подклассы и свойства онтологии будут иметь вид:

1. Класс «Ситуация» представляет собой описание текущего состояния оборудования, включая его параметры, тренды и другие характеристики, которые могут указывать на потенциальные проблемы.

Подкласс «Ситуация_Парето» описывает ситуацию, где анализируется оборудование с использованием метода Парето для выявления 20 % станков, ответственных за 80 % проблем.

Характеристики:

- возраст (количество лет с момента выпуска станка);
- количество ремонтов (число проведенных ремонтов);
- время простоя (длительность простоев за период);
- общий ресурс (накопленный ресурс работы);
- замены узлов (число замен ключевых узлов);
- стоимость переделки (затраты на исправление брака);
- критичность деталей (важность изготавливаемых деталей);
- значимость в цепочке (роль оборудования в технологической цепочке);
- тренд брака (направление изменения процента брака: нет, слабый, явный);
- функциональные тренды (наличие негативных изменений по точности обработки).

Правила:

– ЕСЛИ возраст > 3 И количество ремонтов > 3 И время простоя > 50 %, ТО ситуация классифицируется как критическая, и оборудование включается в детальный анализ.

– ЕСЛИ тренд брака = «явный» И функциональные тренды = «слабые или явные» И критичность деталей ≥ 4 , ТО оборудование не включается в детальный анализ.

2. Класс: «Решение» представляет собой действия или рекомендации, предлагаемые системой для устранения выявленной ситуации.

Подкласс «Решение_ГрадиентныйБустинг» описывает решения, основанные на прогнозах модели градиентного бустинга.

Характеристики: прямолинейность (мм/м), круглость (мм), радиальное биение ($^{\circ}$), концентричность (мм), параллельность (мм/м), процент брака (%), кол-во ремонтов, время простоя (часы), стоимость переделки (руб.), критичность деталей (шкала 1–5), значимость в цепочке (шкала 1–5), вероятность отказа (вероятность необходимости ремонта), важность признаков (факторы, влияющие на прогноз).

Правила:

– ЕСЛИ процент брака > 0.7 И прямолинейность > 0.08 мм/м И радиальное биение > 0.03° , ТО решение = «Требуется немедленный ремонт».

– ЕСЛИ вероятность отказа > 0.8 И круглость > 0.1 мм И концентричность > 0.04 мм И параллельность > 0.06 мм/м, ТО решение = «Провести регулировку станка».

– ЕСЛИ важность признака «процент брака» > 0.4 И время простоя > 20 часов, ТО решение = «Проверить точность обработки».

3. Класс «Сценарий» Представляет собой последовательность действий или шагов, которые необходимо выполнить для реализации выбранного решения. В данной задаче он не рассматривается.

4. Класс «Характеристика» Представляет собой параметры, используемые для описания ситуации, решения или сценария.

Подклассы:

- «Характеристика_Оборудования» описывает физические и функциональные параметры оборудования (например, возраст, количество ремонтов).
- «Характеристика_Процесса» описывает параметры производственного процесса (например, процент брака, время простоя).

5. Класс «Правило» представляет собой логические условия, используемые для классификации ситуаций, принятия решений или формирования сценариев.

Подклассы:

- «Правило_Парето» описывает правила, основанные на методе Парето (например, отбор оборудования по сумме взвешенных показателей).
- «Правило_ГрадиентныйБустинг» описывает правила, основанные на прогнозах модели градиентного бустинга (например, вероятность отказа).
- «Правило_ЖесткиеПравила» описывает жесткие правила «ЕСЛИ-ТО» для реализации сценариев.

Обобщённая OWL-модель для данной ситуации показана на рис. 1.

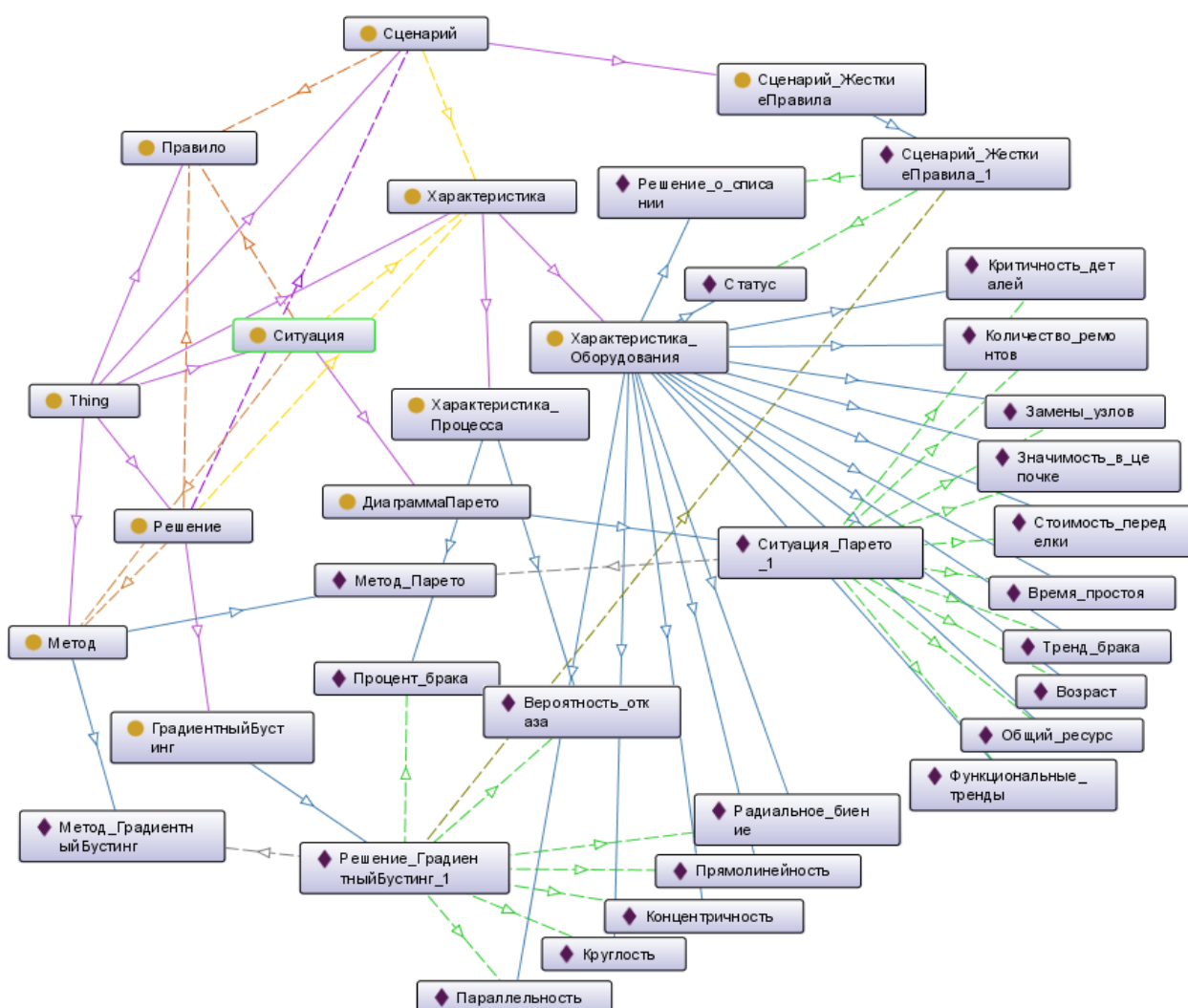


Рис. 1. OWL-модель процесса принятия решений по выявлению проблемных станков
Fig. 1. OWL model of decision making process for identifying problematic machines

6. Свойства:

- «имеетХарактеристику» связывает классы «Ситуация», «Решение» и «Сценарий» с классом «Характеристика»;
- «определяетсяПравилom» связывает классы «Ситуация», «Решение» и «Сценарий» с классом «Правило»;
- «связаноСМетодом» ассоциирует классы «Ситуация» и «Решение» с методами анализа;
- «реализуетсяЧерезСценарий» создаёт связь между классом «Решение» и классом «Сценарий».

На основе представленной OWL-модели процесса принятия решений (рис. 1) можно перейти к практическому анализу оборудования на уровне ситуации, используя метод Парето. Данная модель позволит формализовать взаимосвязь между ключевыми элементами системы: ситуациями, решениями и сценариями их реализации.

Рассмотрим практическое применение этого подхода для анализа состояния описанного выше станочного парка.

Анализ оборудования на уровне ситуации

Точность металлорежущего оборудования является значимым фактором снижения производственных рисков [Пономарев, 2021]. Своевременное выявление отклонений в работе станков уменьшает затраты на устранение брака и повышает качество продукции. Для достижения этой цели предлагаются следующие этапы проверки:

- первичный контроль основных параметров с использованием современных измерительных инструментов;
- регистрация данных в автоматизированной системе мониторинга;
- анализ трендов изменения параметров за определенный период.

Необходимо отметить, что внедрение цифровых технологий для сбора и обработки данных играет ключевую роль в повышении качества проверки [Кабалдин, 2018]. Такой подход позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, сократить время на выполнение замеров и исключить ошибки, связанные с ручным вводом информации. Автоматизация процесса сбора данных также создает основу для более глубокого анализа состояния оборудования.

Рассмотрим две таблицы замеров, демонстрирующие состояние нового токарного станка (DMG Mori NLX 3000, 2021 год выпуска) и старого токарного станка (16Б16, 1992 год выпуска). Из табл. 2 видно, что все параметры [Малкина, 2022] нового станка находятся в пределах допустимых норм, а тренды изменения характеристик полностью отсутствуют, что свидетельствует о высокой надежности оборудования и его способности поддерживать стабильное качество обработки деталей на протяжении длительного времени.

Таблица 2

Table 2

Таблица замеров для нового токарного станка (DMG Mori NLX 3000, 2021 год выпуска)
Measurement table for a new lathe (DMG Mori NLX 3000, 2021)

Параметр	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Тренд
Прямолинейность (мм/м)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	Нет
Круглость (мм)	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	Нет
Радиальное биение (°)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	Нет
Концентричность (мм)	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	Нет
Параллельность (мм/м)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	Нет
Процент брака (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	Нет

Табл. 3, напротив, требует более детального анализа. Несмотря на то, что большинство параметров остаются в пределах допустимых значений, наблюдаются слабые тренды деградации по прямолинейности, круглости и проценту брака. Такая динамика указывает на необходимость дополнительного исследования состояния оборудования для выявления потенциальных рисков.

Рассмотрим шаги для определения перечня оборудования, требующего детального анализа на основе принципа Парето [Денисенко, 2023]. Согласно ему, наиболее значимые проблемы сосредоточены в 20 % оборудования, требующего особого внимания.

Таблица 3
Table 3

Таблица замеров для старого токарного станка (16Б16, 1992 год выпуска)
Measurement table for an old lathe (16B16, manufactured in 1992)

Параметр	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Тренд
Прямолинейность (мм/м)	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,09	0,08	0,09	Слабый
Круглость (мм)	0,08	0,07	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,10	0,12	0,11	Слабый
Радиальное биение (°)	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	Нет
Концентричность (мм)	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	Нет
Параллельность (мм/м)	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	Нет
Процент брака (%)	0,54	0,55	0,53	0,61	0,64	0,65	0,73	0,62	0,69	0,81	0,78	0,79	Слабый

Соберём данные о состоянии оборудования, включая ключевые параметры (возраст, количество ремонтов, время простоя, тренды брака). Используем значимые параметры (возраст, количество ремонтов, время простоя и т. д.), описанные в предыдущей части статьи. Для определения суммарных показателей используем метод многокритериального выбора [Стойчич, 2019]. Каждому параметру присваивается весовой коэффициент (1–5) в зависимости от его значимости. Далее для каждой единицы оборудования рассчитывается взвешенный показатель (произведение значений параметров на их веса) и выполняется ранжирование по убыванию суммы (см. табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Таблица для анализа станков по методу Парето
Table for machine analysis using the Pareto method

Показатель	Вес	1М63НФ3 (Токарный)	16Б16 (Токарный)	6Р13 (Фрезерный)	Haas VF-2 (Фрезерный)	2А135 (Сверильный)	АРТ-250 (Электроэроз.)	DMG Mori NLX 3000	Mazak VCN 510C	Kasto Microcut 5.6	Moore Jig Grinders
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Возраст	3	3	2	3	2	2	2	1	1	1	1
Кол-во ремонтов	2	2	1	3	1	2	1	1	1	1	1
Время простоя	2	2	1	3	1	2	1	1	1	1	1
Общий ресурс	3	3	3	1	2	1	2	1	1	1	1
Замены узлов	3	2	3	2	1	2	1	2	1	1	0

Окончание табл. 4
End of the table 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Стоимость переделки	4	3	2	1	2	3	2	1	0	0	0
Критичность деталей	5	2	3	2	2	2	2	0	0	0	0
Значимость в цепочке	4	3	3	2	2	2	3	1	1	1	1
Тренд брака	5	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
Функциональные тренды	5	2	0	4	2	0	2	0	0	0	0
Σ	-	69	63	61	55	49	49	17	10	10	7

По данным в таблице строится кумулятивная кривая диаграммы Парето, а на основании луча из точки её перегиба на ось абсцисс выделяется ~20 % станков, дающих ~80 % проблем, с проверкой значимости разрывов между ними (рис. 2).

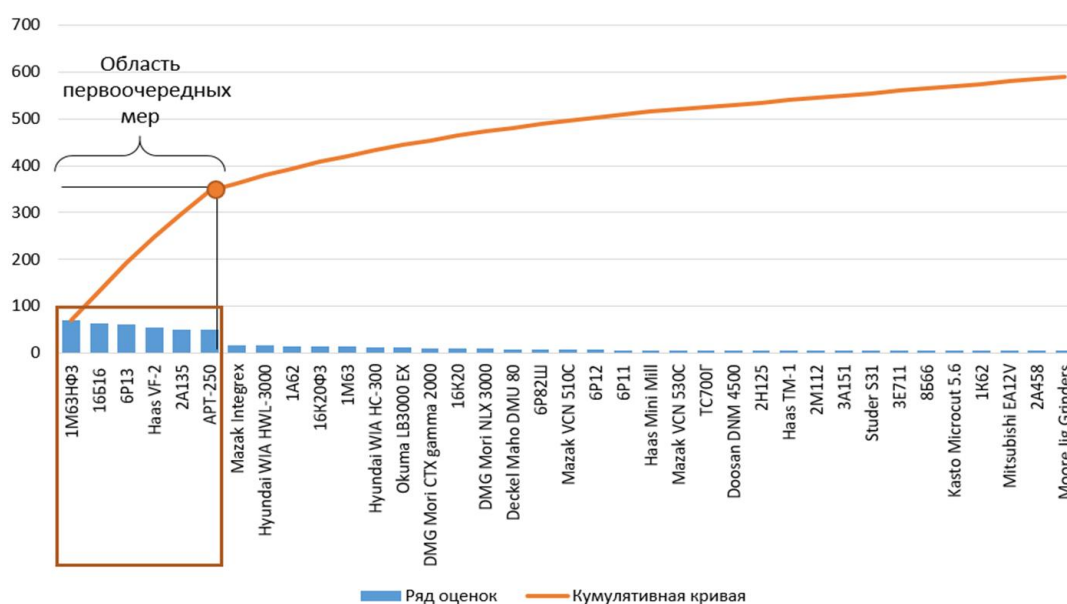


Рис. 2. Диаграмма Парето для выбора станков для углублённого анализа
Fig. 2. Pareto diagram for selecting machines for in-depth analysis

Окончательный список формируется из наиболее критичных единиц с кратким обоснованием отбора (например, высокий износ или влияние на технологический процесс). В нашем случае на основе кумулятивной кривой Парето отобраны 6 станков с наибольшими суммами взвешенных показателей:

- токарный 1M63HФ3, являющийся старым станком с высоким износом и наличием тренда деградации;
- токарный 16B16, также относящийся к категории старых станков с высоким износом направляющих;
- фрезерный 6P13 – устаревшая модель с некоторыми проблемами;
- фрезерный Haas VF-2, который хотя и является новым станком с умеренными показателями, но тем не менее требует наблюдения по причине наличия слабого тренда деградации;
- сверлильный 2A135 – долго использовавшийся станок с признаками износа и слабым трендом брака;
- электроэрозионный APT-250 – станок со средним уровнем рисков, требующий дополнительного анализа.

Отобранные станки являются приоритетными для дальнейшего анализа, так как их состояние и тренды указывают на потенциальные риски, которые могут привести к увеличению брака или простоев. Рассмотрим на уровне решения детальный анализ по одной из единиц оборудования, состояние которой в результате оказалось хуже всех.

Детальный анализ состояния станка с использованием метода машинного обучения на основе исторических данных за 5 лет

Процедура анализа на основе исторических данных была проведена для всех 6 выбранных единиц оборудования, но наиболее тяжёлое состояние было выявлено по токарному станку 1М63НФЗ. Фрагмент таблицы исторических данных по станку 1М63НФЗ показан в табл. 5.

Таблица 5

Table 5

Фрагмент исторических данных за 2016–2020 гг. для станка 1М63НФЗ
Fragment of historical data for 2016–2020 for the 1М63НФЗ machine

Год	Месяц	Прямолинейность (мм/м)	Круглость (мм)	Радиальное биение (°)	Концентричность (мм)	Параллельность (мм/м)	Процент брака (%)	Кол-во ремонтов	Время простоя (часы)	Оценка стоимости переделки (руб.)	Критичность деталей (1–5)	Значимость в цепочке (1–5)
2016	Янв	0,05	0,07	0,02	0,03	0,05	0,40	1	10	5000	3	4
2016	Фев	0,06	0,08	0,02	0,04	0,06	0,45	1	12	5500	3	4
2016	Мар	0,07	0,09	0,03	0,04	0,06	0,50	1	15	6000	3	4
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2020	Ноя	0,08	0,11	0,03	0,04	0,06	0,78	2	20	8000	4	4
2020	Дек	0,09	0,12	0,03	0,04	0,06	0,80	2	22	8500	4	4

Таблица содержит исторические данные о работе станка 1М63НФЗ за период с 2016 по 2020 год. Для каждого месяца указаны значения функциональных параметров (например, прямолинейность, круглость, процент брака) и структурных/системных характеристик (например, количество ремонтов, время простоя, стоимость переделки).

Используем исторические данные для обучения модели градиентного бустинга [Ильичев, 2021] с целью прогнозирования состояния оборудования и выявления трендов деградации, поскольку данный метод (XGBoost, LightGBM, CatBoost) эффективно обрабатывает табличные данные, захватывает нелинейные зависимости, обеспечивает интерпретируемость и устойчивость к дисбалансу.

Отметим, что применение методов машинного обучения для анализа состояния оборудования позволяет не только прогнозировать его отказы, но и формировать обоснованные рекомендации по обслуживанию или ремонту без дополнительных проверок и вывода оборудования из эксплуатации [Конев, 2022]. Важно подчеркнуть, что использование градиентного бустинга над деревьями решений предоставляет возможность эффективно учитывать как функциональные параметры станков, так и их структурные и системные характеристики.

Алгоритм выбора оборудования для ремонта с использованием градиентного бустинга

Применение метода градиентного бустинга следует начать с подготовки исторических данных о состоянии оборудования за последние 5 лет. Данные должны включать как

функциональные параметры (например, прямолинейность, круглость, процент брака), так и структурные характеристики (возраст, количество ремонтов) и системные параметры (критичность деталей, значимость в цепочке).

На основе анализа данных определяется целевая переменная, например, метка «требуется ремонт», которая устанавливается по пороговым значениям ключевых параметров, таких как тренды деградации. Для повышения качества модели данные предварительно обрабатываются: удаляются пропуски, нормализуются числовые признаки и кодируются категориальные переменные.

Центральный этап – обучение модели градиентного бустинга, эффективного для работы с табличными данными, включая смешанные типы признаков. После обучения модель оценивается на тестовой выборке с использованием метрик точности, полноты и F1-меры. Высокие значения этих метрик подтверждают надёжность прогнозов.

Для интерпретации результатов анализируется важность признаков, что позволяет выявить ключевые факторы, влияющие на необходимость ремонта. На основе прогноза делаются выводы о состоянии оборудования и указываются причины, основанные на значимых параметрах.

Для наглядности строятся графики изменения параметров во времени и визуализируется важность признаков (см. рис. 3).

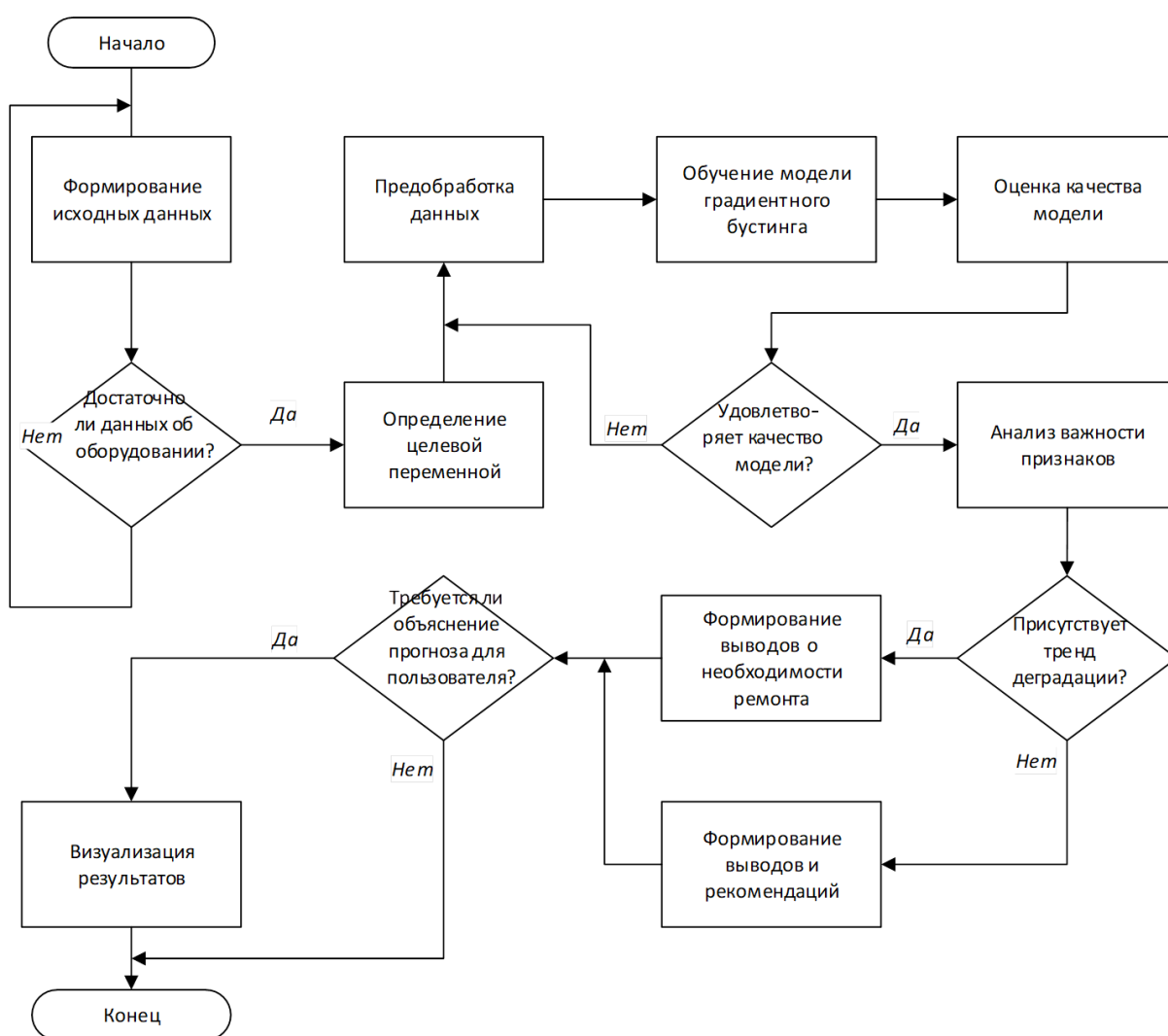


Рис. 3. Алгоритм выбора оборудования для ремонта с использованием градиентного бустинга
Fig. 3. Algorithm for selecting equipment for repair using gradient boosting

Предложенный алгоритм позволяет системно подходить к анализу состояния оборудования и выявлять признаки деградации на ранних этапах, что создает основу для принятия своевременных и обоснованных решений, направленных на минимизацию рисков и повышение эффективности производства.

Рассмотрим ключевые моменты алгоритма на языке Python [Коэльо, 2023].

Программа начинает свою работу с загрузки исторических данных о работе станка из CSV-файла, используя библиотеку `pandas` [McKinney, 2017]. Фрагмент кода и результат работы показаны на рис. 4.

На основе анализа с использованием градиентного бустинга можно сделать вывод, что станок 1М63НФ3 требует ремонта, что подтверждается высоким процентом брака и ухудшением функциональных параметров (см. рис. 5).

```
9 # Загрузка данных
10 data = pd.read_csv("historical_data_1M63NF3.csv")
11
12 # Целевая переменная: требуется ли ремонт
13 data['Requires_Repair'] = (data['Процент брака (%)'] > 0.7).astype(int)
14
15 # Удаление ненужных столбцов
16 data.drop(columns=['Год', 'Месяц'], inplace=True, errors='ignore')
17
18 # Разделение на признаки и целевую переменную
19 X = data.drop(columns=['Requires_Repair', 'Дата'])
20 y = data['Requires_Repair']
21
22 # Разделение на обучающую и тестовую выборки
23 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42, stratify=y)
24
25 # Обучение модели
26 model = CatBoostClassifier(
27     iterations=500,
28     learning_rate=0.1,
29     depth=6,
30     verbose=100,
31     random_state=42,
32     eval_metric='F1'
33 )
34 model.fit(X_train, y_train)
```

Отчет классификации:

	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	1.00	1.00	8
1	1.00	1.00	1.00	4
accuracy			1.00	12
macro avg	1.00	1.00	1.00	12
weighted avg	1.00	1.00	1.00	12

Результат прогноза:
▲ Станок требует ремонта.
Вероятность необходимости ремонта: 99.90%

Рис. 4. Фрагмент кода и результат работы программы, реализующей метод градиентного бустинга на языке Python

Fig. 4. A code fragment and the result of the program implementing the gradient boosting method in Python

Поскольку процедура ремонта токарного оборудования на предприятии определена, то выбор сценария реализации не требуется, он реализуется по жёстким правилам, заданным нормативными документами.

Таким образом, ситуационно-онтологический подход, реализованный в виде системы поддержки принятия решений о состоянии металлорежущего оборудования, реализован и позволяет решать прикладные задачи в промышленности.

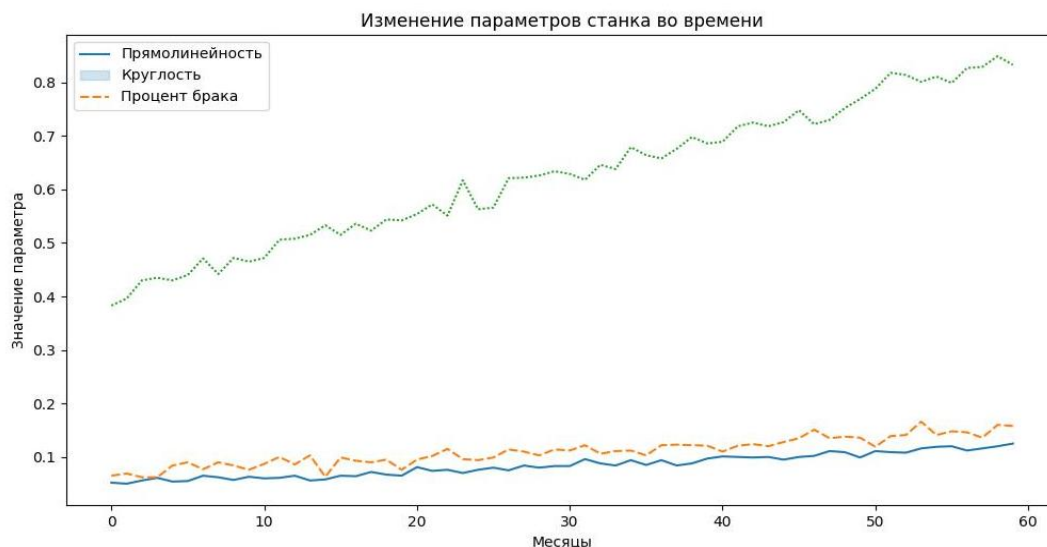


Рис. 5. Изменение параметров станка 1М63НФ3 во времени
Fig. 5. Change in the parameters of the 1M63NF3 machine over time

Важность признаков указывает на ключевые факторы, влияющие на прогноз, что позволяет целенаправленно планировать мероприятия по обслуживанию оборудования (см. рис. 6).

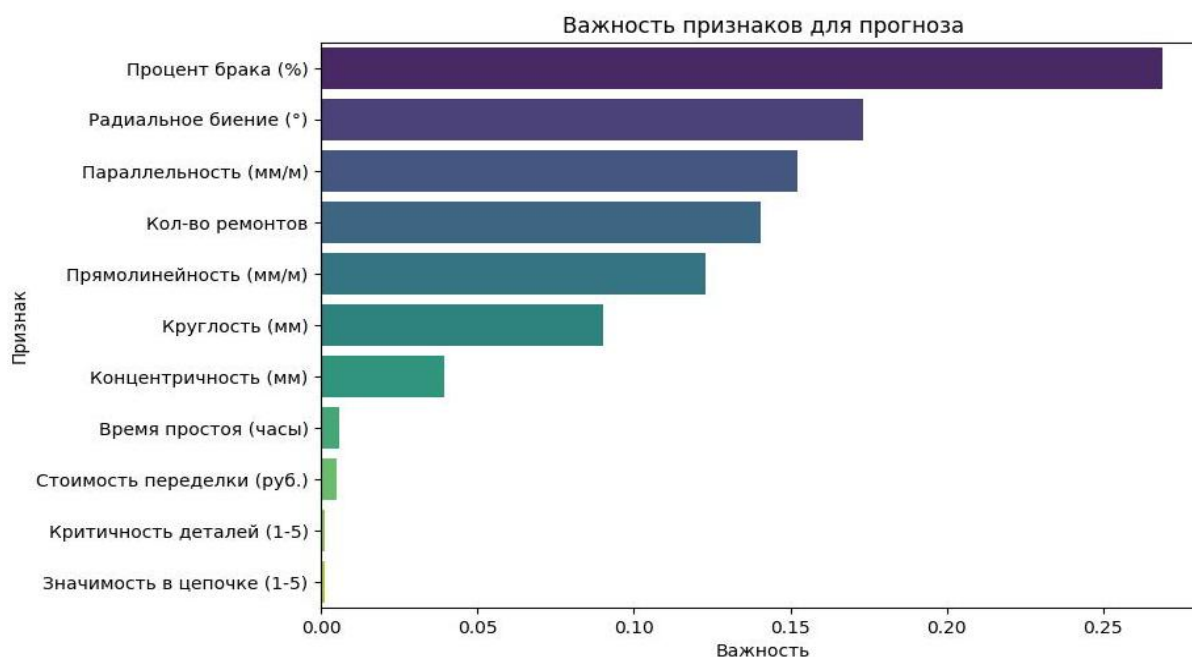


Рис. 6. Влияние измеримых и расчётных параметров станка 1М63НФ3 на результат
Fig. 6. The influence of measurable and calculated parameters of the 1M63NF3 machine on the result

Закключение

В статье представлен подход к двухуровневой поддержке принятия решений о состоянии металлорежущего оборудования на основе ситуационно-онтологического моделирования и методов машинного обучения. Предложенная онтология формализует знания о ситуациях, решениях и сценариях, обеспечивая единую основу для систематизации данных и автоматизации анализа. Метод Парето позволяет выделять 20 % оборудования, ответственного за 80% проблем, что повышает эффективность использования ограниченных ресурсов предприятия. На втором уровне применяется модель градиентного бустинга, обученная на исторических данных, которая прогнозирует необходимость ремонта станков с

высокой точностью. Интерпретируемость результатов через анализ важности признаков делает модель полезной для практиков. Практическая ценность заключается в возможности внедрения системы в реальные производственные процессы механосборочных цехов для снижения уровня брака, минимизации простоев и повышения обоснованности управленческих решений. Результаты исследования демонстрируют работоспособность предложенного подхода и его потенциал для цифровой трансформации процессов технического обслуживания и управления качеством на машиностроительных предприятиях.

Дальнейшие исследования будут посвящены расширению использования интеллектуальных методов в различных отраслях промышленности.

Список источников

Machine Learning in Manufacturing: Industrial Use Cases in 2025 [Электронный ресурс] MobiDev. 2025. Режим доступа: <https://mobidev.biz/blog/machine-learning-application-use-cases-manufacturing-industry> (дата обращения: 13.04.2025).

Список литературы

- Антонов В.В., Конев К.А., Куликов Г.Г. 2021. Трансформация модели системы поддержки принятия решений для типовых ситуаций с применением интеллектуальных и аналитических методов. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 21(3): 14–25. DOI 10.14529/ctcr210302
- Воронин А.В., Гречухин А.И., Калашников А.С. и др. 1985. Механизация и автоматизация сборки в машиностроении. М.: Машиностроение, 272.
- Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. 2000. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 384.
- Денисенко С.А., Булыгин Ф.В., Паньков А.Н. и др. 2023. Методологические основы принципа Парето и его реализация в физике и метрологии. *Компетентность*. 8: 15–23. DOI 10.24412/1993-8780-2023-8-15-23. EDN YGQTUE
- Еленев К.С., Малкова Т.Б., Еленева Ю.Я., Кудряшов С.А. 2023. Подходы к кластеризации металлорежущего и кузнечно-прессового оборудования предприятий машиностроения России. *Экономика и промышленность*. 4: 45–52.
- Ильичев В.Ю., Жукова Ю.М., Шамов И.В. 2021. Использование технологии градиентного бустинга для создания аппроксимационных моделей. *Заметки ученого*. 12-1: 62–67. EDN JPUAYV
- Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. 2018. Интеллектуальное управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 7(700): 30–41. DOI 10.18698/0536-1044-2018-7-30-41. EDN XUELJZ
- Казюлин Р.В., Неподкосова Ю.А., Чернышов Н.Г. 2024. Подход к управлению состоянием режущего инструмента станка с числовым программным управлением. *Modern Science*, 6-2: 24–29. EDN AMEQGJ.
- Конев К.А. 2022. Использование методов машинного обучения в задачах принятия решений при обеспечении качества в приборостроении. *Экономика. Информатика*, 49(4): 820–832. DOI:10.52575/2687-0932-2022-49-4-820-832
- Конев К.А., Антонов В.В. 2024. Поддержка принятия решений при обеспечении качества с использованием ситуационно-онтологического подхода. М.: Русайнс, 152. EDN SHBZGQ
- Коэлью Л., Ричарт В. 2023. Построение систем машинного обучения на языке Python. пер. с англ. А.А. Слинкина. 3-е изд., М.: ДМК Пресс 304.
- Малкина И.В. 2022. Автоматизация контроля качества геометрических параметров деталей в машиностроении. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, Т. 24, № 3(107): 34–41. DOI 10.37313/1990-5378-2022-24-3-34-41. EDN DDURMC
- Матвеева Е.А., Черных О.Н. 2021. Автоматизация контроля состояния производственного оборудования. *Инфокоммуникационные технологии*, 19(1): 53–58. DOI 10.18469/ikt.2021.19.1.07. EDN VHHPMI
- Пономарев А.И. 2021. Анализ современных методов оценки состояния режущего инструмента при обработке металла. Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сборник научных трудов. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. 91–97. EDN KZCKIW

- Самигулина Г.А., Самигулина З.И. 2015. Разработка интегрированной OWL модели для иммуносетевого моделирования сульфаниламидов. *Современный научный вестник*, 2(1): 3–5. EDN VPAFFD.
- Стойич М., Стевич Ж., Николич А., Божичкович З. 2019. Многокритериальная модель оценки и выбора автоматически управляемых транспортных средств (AGV) для складов. *Современные проблемы транспортного комплекса России*, 9(1): 4–20. DOI 10.18503/2222-9396-2019-9-1-4-20
- Тихвинский В.И., Морозов В.А., Пономарев А.Н. 2022. Связь онтологий и метода Парето. *Научно-технический вестник Поволжья*, 6: 86–90. EDN BHESGG
- Шашок А.В. Прогнозирование стойкости и надежности токарных резцов: дис. канд. техн. наук: 05.03.01. Барнаул, 2001. 178 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://tekhnosfera.com/prognozirovanie-stoykosti-i-nadezhnosti-tokarnyh-reztsov> (дата обращения: 14.04.2025).
- Янов Е.С., Антонычев С.В., Анцев А.В. и др. 2024. Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 3(71): 157–166. DOI 10.21685/2072-3059-2024-3-14. EDN BCRMNH
- McKinney Wes. 2017. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython 2nd Edition, O'Reilly Media: 724 p. ISBN 9781449319793.

References

- Antonov V.V., Konev K.A., Kulikov G.G. 2021. Transformation of the decision support system model for typical situations using intelligent and analytical methods. *Bulletin of SUSU. Series "Computer technologies, control, radio electronics"*, 21(3): 14–25 (in Russian). DOI 10.14529/ctcr210302
- Voronin A.V., Grechukhin A.I., Kalashnikov A.S. et al. 1985. Mechanization and automation of assembly in mechanical engineering. M.: Mechanical Engineering, 272 (in Russian).
- Gavrilova T.A., Khoroshevsky V.F. 2000. Knowledge bases of intelligent systems. St. Petersburg: Piter, 384 (in Russian).
- Denisenko S.A., Bulygin F.V., Pankov A.N. et al. 2023. Methodological foundations of the Pareto principle and its implementation in physics and metrology. *Competence*, 8: 15–23 (in Russian). DOI 10.24412/1993-8780-2023-8-15-23. EDN YGQTUE
- Elenew K.S., Malkova T.B., Elenew Yu.Ya., Kudryashov S.A. 2023. Approaches to clustering metal-cutting and forging and pressing equipment of mechanical engineering enterprises of Russia. *Economy and Industry*, 4: 45–52 (in Russian).
- Ilyichev V.Yu., Zhukova Yu.M., Shamov I.V. 2021. Using gradient boosting technology to create approximation models. *Notes of a scientist*, 12-1: 62–67 (in Russian). EDN JPUAYV
- Kabal'din Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. 2018. Intelligent control of enterprise technological equipment in the context of digital production. *Bulletin of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 7 (700): 30–41 (in Russian). DOI 10.18698/0536-1044-2018-7-30-41. EDN XUELJZ.
- Kazyulin R.V., Nepodkosova Yu.A., Chernyshov N.G. 2024. Approach to controlling the state of the cutting tool of a machine with numerical control. *Modern Science*, 6-2: 24–29 (in Russian). EDN AMEQGJ
- Konev K.A. 2022. Using machine learning methods in decision-making problems when ensuring quality in instrument making. *Economics. Information technologies*, 49(4): 820–832 (in Russian). DOI:10.52575/2687-0932-2022-49-4-820-832
- Konev K.A., Antonov V.V. 2024. Support for decision-making in quality assurance using a situational-ontological approach, M. Rusains, 152 (in Russian). EDN SHBZGQ
- Coelho L.P., Richart V. 2023. Building Machine Learning Systems in Python. 3rd ed., Moscow: DMK Press, 304. (trans. from English by A. A. Slinkin).
- Mal'kina I.V. 2022. Automation of quality control of geometric parameters of parts in mechanical engineering. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. V. 24, 3 (107): 34–41 (in Russian). DOI 10.37313/1990-5378-2022-24-3-34-41. EDN DDURMC
- Machine Learning in Manufacturing: Industrial Use Cases in 2025 [Electronic resource]. MobiDev. 2025. Access mode: <https://mobidev.biz/blog/machine-learning-application-use-cases-manufacturing-industry> (date of access: 13.04.2025).
- Matveeva E.A., Chernykh O.N. 2021. Automation of monitoring the condition of production equipment. *Infocommunication technologies*. 19(1): 53–58 (in Russian). DOI 10.18469/ikt.2021.19.1.07. EDN VHHPMI.



- Ponomarev A.I. 2021. Analysis of modern methods for assessing the condition of a cutting tool during metal processing. Automation and control in mechanical engineering and instrument making: collection of scientific papers. Saratov State Technical University: 91–97 (in Russian). EDN KZCKIW
- Samigulina G.A., Samigulina Z.I. 2015. Development of an integrated OWL model for immune network modeling of sulfonamides. *Modern Scientific Bulletin*, 2(1): 3–5 (in Russian). EDN VPAFFD
- Stojcic M., Stevich Z., Nikolic A., Bozickovic Z. 2019. Multicriteria model for evaluation and selection of automatically guided vehicles (AGV) for warehouses. *Modern problems of the transport complex of Russia*, 9(1): 4–20 (in Russian). DOI 10.18503/2222-9396-2019-9-1-4-20
- Tikhvinsky V.I., Morozov V.A., Ponomarev A.N. 2022. Relationship between ontologies and the Pareto method. *Scientific and technical bulletin of the Volga region*, 6: 86–90 (in Russian). EDN BHESGG
- Shashok A.V. 2001. Forecasting the durability and reliability of turning cutters: dis. candidate of technical sciences: 05.03.01. Barnaul: 178 (in Russian). [Electronic resource]. URL: <https://tekhnosfera.com/prognozirovanie-stoykosti-i-nadezhnosti-tokarnyh-reztsov> (date of access: 14.04.2025).
- Yanov E.S., Antonychev S.V., Antsev A.V. et al. 2024. Study of methods for monitoring the condition of milling machines based on the analysis of vibration characteristics. *News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*, 3(71): 157–166 (in Russian). DOI 10.21685/2072-3059-2024-3-14. EDN BCRMNH
- McKinney Wes. 2017. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython 2nd Edition, O'Reilly Media: 724 p. ISBN 9781449319793

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 24.06.2025

Поступила после рецензирования 05.09.2025

Принята к публикации 08.09.2025

Received June 24, 2025

Revised September 05, 2025

Accepted September 08, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Конев Константин Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Konstantin A. Konev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

УДК 004.85
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-697-709
EDN WBJYYP

Метод прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий на основе нечеткого логического вывода

¹ Еремин Д.В., ¹ Польщиков К.А., ² Маматов А.В.

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46
eremdmity@mail.ru, polshchikov@bsuedu.ru, it@bstu.ru

Аннотация. Целью представленного в статье исследования является совершенствование автоматизированных средств планирования капитальных ремонтов зданий на основе разработки метода прогнозирования продолжительности выполняемых работ. Предложенный метод основан на применении нечеткого логического вывода для оценивания коэффициента корректировки продолжительности выполнения работы относительно нормативного значения. Настройка параметров нечеткого вывода осуществляется с помощью нейронной сети, обучение которой производится с применением ретроспективных данных о результатах выполнения аналогичных работ с участием конкретных исполнителей и использованием определенных наименований материалов. Представлены результаты вычислительных экспериментов, которые показали работоспособность предложенного метода и целесообразность его применения на практике.

Ключевые слова: автоматизация планирования капитального ремонта зданий, сетевой график, метод оценки и анализа программ, нечеткие множества, нечеткий логический вывод, нейронная сеть, продолжительность работ

Для цитирования: Еремин Д.В., Польщиков К.А., Маматов А.В. 2025. Метод прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий на основе нечеткого логического вывода. *Экономика. Информатика*, 52(3): 697–709. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-697-709. EDN WBJYYP

Method for Predicting the Duration of Major Repairs of Buildings Based on Fuzzy Logical Inference

¹ Dmitry V. Eremin, ¹Konstantin A. Polshchikov, ²Aleksandr V. Mamatov

¹ Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russia

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia
eremdmity@mail.ru, polshchikov@bsuedu.ru, it@bstu.ru

Abstract. The article presents a solution to an urgent scientific and technical problem consisting in developing a method for forecasting the duration of major repairs of buildings. The proposed method is based on the use of fuzzy logical inference to estimate the coefficient of adjustment of the duration of work relative to the standard value. The input variables are the indicators of the most important factors affecting the duration of a specific job. These include the qualifications of the performers, the quality of the materials used, and the complexity of the conditions for performing the work. To adjust the parameters of fuzzy inference, an ANFIS model is used. To train it, a sample is compiled, taking into consideration the retrospective results of work with the participation of certain performers and the use of certain names of materials. Numerous computational



experiments have confirmed the expediency and practicability of the proposed method. The results obtained can be used in further research on the construction of an automated system for planning major repairs of buildings and the development of appropriate software.

Keywords: automation of planning of buildings capital repairs, network schedule, program evaluation and review technique, fuzzy sets, fuzzy logical inference, neural network, work duration

For citation: Eremin D.V., Polshchikov K.A., Mamatov A.V. 2025. Method for Predicting the Duration of Major Repairs of Buildings Based on Fuzzy Logical Inference. *Economics. Information technologies*, 52(3): 697–709 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-697-709. EDN WBJYYP

Введение

Восстановление ресурса здания обеспечивается с помощью капитального ремонта, эффективность проведения которого достигается, в первую очередь, на основе рациональной организации необходимых работ. Наибольшее распространение при организации работ получило сетевое планирование методом оценки и анализа программ (Program Evaluation and Review Technique, PERT). Этот метод, в частности, применяется при планировании строительных работ [Andiyan et al., 2021; Deng, Jian, 2022; Aliahmad, et al., 2024; Zanelidin, Ahmed, 2024], ремонтных работ дорожного покрытия [Farida, Anenda, 2022], распределении ресурсов промышленных и добывающих предприятий [Chang et al., 2021; Desticioğlu, 2022; Silva et al., 2022; Haekal, Masood, 2023]. Метод PERT дает возможность спланировать капитальный ремонт и реконструкцию зданий [Топчий и др., 2022; Putra et al., 2024], а также решить многие другие задачи [Aulia, Cipta, 2023; Tam et al., 2023; Aliyu, 2024; Hudda et al., 2025]. Однако при его использовании недостаточно проработанными остаются вопросы обоснования используемых значений продолжительности выполнения тех или иных работ.

Предложена методика сетевого планирования капитального ремонта зданий на основе нечетких множеств, в которой значения времени всех этапов выдаются в виде нечетких значений [Ершов, Топчий, 2021]. Использование полученных в таком виде результатов для дальнейшего планирования зависит от склонности к риску лиц, принимающих решения. В целях минимизации влияния этой субъективной составляющей на процесс планирования требуется совершенствование имеющихся научно-технологических средств оценивания продолжительности работ капитального ремонта зданий, что определяет актуальность темы данной статьи.

Предлагаемый метод

Ключевое значение при планировании капитального ремонта жилых зданий имеет учет продолжительности выполнения конкретных работ. При вычислении времени, необходимого для проведения всего планируемого комплекса работ, как правило, используются нормативные значения продолжительности выполнения отдельных работ. Опыт показывает, что в зависимости от ряда факторов реальная продолжительность работы, выполняемой при проведении капитального ремонта жилых зданий, может существенно отличаться от её нормативной продолжительности. Обладая информацией о реальной продолжительности работ, можно оптимизировать выполнение капитального ремонта, перераспределив исполнительские и материальные ресурсы таким образом, чтобы добиться сокращения времени проведения всего планируемого комплекса работ.

Введем величину коэффициента корректировки продолжительности выполнения работы:

$$K = \frac{Act}{St}, \quad (1)$$

где Act – реальная продолжительность работы капитального ремонта здания;
 St – нормативная продолжительность работы капитального ремонта здания.

Значение K является неотрицательным, с помощью него можно соотнести величины реальной и нормативной продолжительности той или иной работы: $Act = St$, если $K = 1$; $Act > St$, если $K > 1$; $Act < St$, если $0 < K < 1$.

Исследования показали, что в наибольшей степени на величину K влияют следующие факторы: INQ – квалификация исполнителей работы, INM – качество материалов, используемых при выполнении работы, INC – сложность (нестандартность) условий выполнения работы. Чтобы учесть влияние вышеуказанных факторов на реальную продолжительность выполнения работы, можно применить аппарат нечеткого логического вывода. Обоснованность такого решения обусловлена тем, что влияние данных факторов на величину Act сложно представить в виде определенных численных значений. В таких случаях целесообразно использовать нечеткие множества, к которым в той или иной степени могут быть отнесены факторы INQ , INM и INC , выступающие в качестве входных переменных нечеткого логического вывода.

Для входной переменной INQ предлагается использовать три нечетких множества: «высокая квалификация исполнителей», «средняя квалификация исполнителей» и «квалификация исполнителей ниже средней». Входная переменная INE в определенной степени может принадлежать также трем нечетким множествам: «высокое качество материалов», «среднее качество материалов» и «качество материалов ниже среднего». Для третьей входной переменной INC предлагается использовать два нечетких множества: «высокая сложность условий» и «стандартная сложность условий».

В качестве выходной переменной нечеткого логического вывода предлагается использовать величину K . Зависимость выходной переменной от входных представляется в виде набора (базы) нечетких правил, формирование которых определяется используемым алгоритмом нечеткого вывода. Одним из наиболее простых и распространенных алгоритмов нечеткого вывода является алгоритм Сугено нулевого порядка. Он успешно применяется для решения многих прикладных задач [Польщиков и др., 2019; Польщиков и др., 2020; Махди и др., 2022; Polshchikov et al., 2022]. Использование этого алгоритма дает возможность представить базу нечетких правил в следующем виде:

$$\text{if } (INQ = QH) \text{ and } (INE = EH) \text{ and } (INC = CS) \text{ then } (K = Kout_1), \quad (2)$$

$$\text{if } (INQ = QH) \text{ and } (INE = EH) \text{ and } (INC = CH) \text{ then } (K = Kout_2), \quad (3)$$

...

$$\text{if } (INQ = QB) \text{ and } (INE = EB) \text{ and } (INC = CH) \text{ then } (K = Kout_{18}), \quad (4)$$

где QH , QA и QB – нечеткие множества «высокая...», «средняя...» и «ниже средней квалификация исполнителей» соответственно; EH , EA и EB – нечеткие множества «высокое...», «среднее...» и «ниже среднего качество материалов» соответственно; CH и CS – нечеткие множества «высокая...» и «стандартная сложность условий» соответственно; $Kout_1$, $Kout_2$, ..., $Kout_{18}$ – значения индивидуальных выводов нечетких правил.

Степень отнесения входных величин к нечетким множествам определяется соответствующей функцией принадлежности. При формализации оценивания продолжительности выполнения работ капитального ремонта зданий обосновано использование П-образной функции принадлежности [Топчий и др., 2022], а также её усеченных вариантов в виде z- и s-образных сплайн-функций. Реализация нечеткого логического вывода в соответствии с алгоритмом Сугено нулевого порядка предполагает последовательное выполнение процедур фаззификации, агрегирования и дефаззификации. Выполнение процедуры фаззификации дает возможность оценить значения функций принадлежности входных переменных тому или иному нечеткому множеству:



$$QH(INQ) = \begin{cases} 1, INQ \leq INQHa; \\ 1 - 2 \left(\frac{INQ - INQHa}{INQHb - INQHa} \right)^2, INQHa < INQ \leq \frac{INQHa + INQHb}{2}; \\ 2 \left(\frac{INQHb - INQ}{INQHb - INQHa} \right)^2, \frac{INQHa + INQHb}{2} < INQ < INQHb; \\ 0, INQHb \leq INQ; \end{cases} \quad (5)$$

$$QA(INQ) = \begin{cases} 0, INQ \leq INQAa; \\ 2 \left(\frac{INQ - INQAa}{INQAb - INQAa} \right)^2, INQAa < INQ \leq \frac{INQAa + INQAb}{2}; \\ 1 - 2 \left(\frac{INQAb - INQ}{INQAb - INQAa} \right)^2, \frac{INQAa + INQAb}{2} < INQ \leq INQAb; \\ 1, INQAb < INQ \leq INQAc; \\ 1 - 2 \left(\frac{INQ - INQAc}{INQAd - INQAc} \right)^2, INQAc < INQ \leq \frac{INQAc + INQAd}{2}; \\ 2 \left(\frac{INQAd - INQ}{INQAd - INQAc} \right)^2, \frac{INQAc + INQAd}{2} < INQ < INQAd; \\ 0, INQAd \leq INQ; \end{cases} \quad (6)$$

$$QB(INQ) = \begin{cases} 0, INQ \leq INQBa; \\ 2 \left(\frac{INQ - INQBa}{INQBb - INQBa} \right)^2, INQBa < INQ \leq \frac{INQBa + INQBb}{2}; \\ 1 - 2 \left(\frac{INQBb - INQ}{INQBb - INQBa} \right)^2, \frac{INQBa + INQBb}{2} < INQ < INQBb; \\ 1, INQBb \leq INQ; \end{cases} \quad (7)$$

где $QH(INQ)$, $QA(INQ)$ и $QB(INQ)$ – значения функции принадлежности входной переменной INQ нечетким множествам «высокая...», «средняя...» и «ниже средней квалификация исполнителей» соответственно; $INQHa$, $INQHb$, $INQAa$, $INQAb$, $INQAc$, $INQAd$, $INQBa$ и $INQBb$ – характерные значения аргумента функций принадлежности входной переменной INQ нечетким множествам. Аналогичным образом вычисляются значения функций принадлежности двух других входных переменных.

Выполнение процедуры агрегирования дает возможность оценить степень истинности условий нечетких правил:

$$Z_1 = QH(INQ) \wedge EH(INE) \wedge CH(INC), \quad (8)$$

$$Z_2 = QH(INQ) \wedge EH(INE) \wedge CS(INC), \quad (9)$$

...

$$Z_{18} = QB(INQ) \wedge EB(INM) \wedge CS(INC). \quad (10)$$

С помощью процедуры дефаззификации оценивается искомое значение показателя K :

$$K = \frac{\sum_{k=1}^{18} Z_k Kout_k}{\sum_{k=1}^{18} Z_k} . \quad (11)$$

Для оценивания значений функций принадлежности входных переменных и индивидуальных выводов нечетких правил предлагается применить нейросетевую настройку параметров нечеткого логического вывода с использованием модели нечеткой нейронной сети (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS). Настройка параметров ANFIS-модели осуществляется с использованием обучающей выборки, которую можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Фрагмент обучающей выборки для настройки ANFIS-модели
Fragment of the training sample for tuning the ANFIS model

Значения первой входной переменной	Значения второй входной переменной	Значения третьей входной переменной	Значения выходной переменной
INQ_1	INE_1	INC_1	K_1
INQ_2	INE_2	INC_2	K_2
INQ_3	INE_3	INC_3	K_3
...	...	...	...
INQ_m	INE_m	INC_m	K_m
...	...	...	...

Нижние индексы элементов табл. 1 обозначают номера капитальных ремонтов зданий, проведенных ранее. Значения выходной переменной вычисляются по формуле (1) с использованием значений нормативной и реальной длительности выполнения работы, зафиксированных при проведении соответствующих капитальных ремонтов. Для оценивания значений входных переменных необходимо создание и пополнение базы данных, содержащей следующие позиции:

- 1) данные об участии каждого исполнителя в работах, выполненных при проведении капитальных ремонтов зданий;
- 2) данные о материалах, которые были использованы при проведении капитальных ремонтов зданий;
- 3) данные о сложности условий, в которых были проведены капитальные ремонты зданий;
- 4) данные о результатах выполнения каждой работы при проведении капитальных ремонтов зданий с позиции соотношения её реальной и нормативной продолжительности.

Квалификация исполнителей работы оценивается с помощью выражения:

$$INQ = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=jm(i)-J}^{jm(i)} Q_{ij} , \quad (12)$$

где I – число исполнителей, привлеченных для выполнения работы в ходе капитального ремонта здания; J – число учитываемых результатов выполнения работы; i – номер исполнителя, привлеченного для выполнения работы в ходе капитального ремонта здания; j – номер результата выполнения работы; $j m(i)$ – максимальный номер результата выполнения работы исполнителем номер i ; Q_{ij} – j -й результат выполнения работы исполнителем номер i .



Значения величины Q_{ij} определяются по формуле:

$$Q_{ij} = \begin{cases} 2, & Act_j < St_j; \\ 1, & Act_j = St_j; \\ 0, & Act_j > St_j. \end{cases} \quad (13)$$

Из формулы (13) видно, что наиболее высокими считаются результаты выполнения работы при проведении тех капитальных ремонтов, когда реальная продолжительность этой работы была меньше, чем её нормативная продолжительность. Качество материалов, используемых при выполнении работы, оценивается с помощью выражения:

$$INE = \frac{1}{N \cdot L} \sum_{n=1}^N \sum_{l=lm(n)-L}^{lm(n)} E_{nl}, \quad (14)$$

где N – число наименований материалов, использованных для выполнения работы при проведении капитального ремонта здания; L – число учитываемых результатов использования материалов для выполнения работы; n – номер наименования материала, использованного для выполнения работы при проведении капитального ремонта здания; l – номер результата использования материала при выполнении работы; $lm(n)$ – максимальный номер результата использования наименования материала номер n при выполнении работы; E_{nl} – l -й результат использования наименования материала номер n при выполнении работы.

Значения величины E_{nl} определяются по формуле:

$$E_{nl} = \begin{cases} 2, & Act_l < St_l; \\ 1, & Act_l = St_l; \\ 0, & Act_l > St_l. \end{cases} \quad (15)$$

Сложность условий выполнения работы принимает значение 1, если условия стандартные, и значение 0, если условия являются сложными (нестандартными).

Таким образом, для прогнозирования реальной продолжительности работы, которая будет выполнена при проведении планируемого капитального ремонта здания, предложен метод, включающий следующие основные этапы:

1) оценивание квалификации привлекаемых исполнителей, качества используемых материалов и сложности условий выполнения работы как входных переменных нечеткого логического вывода;

2) оценивание коэффициента корректировки реальной продолжительности выполнения работы на основе выполнения процедур фаззификации, агрегирования и дефаззификации;

3) вычисление прогнозируемой продолжительности выполнения работы с использованием данных о её нормативной продолжительности и коэффициента корректировки.

Реализация предложенного метода требует создания, пополнения и использования базы данных, содержащей сведения о результатах участия конкретных исполнителей и применения материалов в работах, выполненных при проведении капитальных ремонтов зданий. В целях исследования работоспособности предложенного метода и целесообразности его применения на практике проведены вычислительные эксперименты, результаты которых представлены ниже.

Вычислительные эксперименты

Предложенный метод прогнозирования реальной продолжительности работ был применен при проведении вычислительных экспериментов по планированию капитального ремонта зданий. В качестве примера в табл. 2 представлены данные, используемые для планирования капитального ремонта здания.

Таблица 2
Table 2

Данные, используемые при планировании капитального ремонта здания
Data used in planning major repairs of the building

Код работы	Наименование работы	Число исполнителей	Объем работ, чел.-смен	Продолжительность выполнения работ, дней	Тариф оплаты труда 1 чел.-смены, тыс. руб.	Коэффициент увеличения фонда оплаты труда	Фонд оплаты труда, тыс. руб.
1-2	Замена окон	15	270	18	3,4	1	918
1-3	Ремонт (замена) системы электроснабжения	12	240	20	3,6	1	864
1-4	Ремонт (замена) системы отопления	15	270	18	3,4	1	918
1-5	Ремонт крыши	9	288	32	3,5	1	1008
1-6	Ремонт (замена) системы водоснабжения	8	288	36	3,5	1	1008
5-8	Утепление стен	15	330	22	3,6	1	1188
6-7	Ремонт (замена) системы канализации	6	144	24	3,75	1	540
7-9	Внутренняя отделка	10	140	14	3,6	1	504
8-9	Внешняя отделка	10	100	10	3,6	1	360
Суммарный фонд оплаты труда, тыс. руб.							7308
Затраты на закупку материалов, тыс. руб.							7684
Выделено средств на оплату труда и закупку материалов, тыс. руб.							16000
Суммарные затраты на оплату труда и закупку материалов, тыс. руб.							14664
Остаток средств, тыс. руб.							1008

В первом столбце табл. 2 представлены коды работ. Каждый из этих кодов содержит номер события, являющегося началом выполнения работы, и номер события, которое наступает, когда эта работа завершается. Наименования работ содержатся во втором столбце данной таблицы. Каждая работа имеет определенный объем, который измеряется в человеко-сменах и содержится в третьем столбце указанной таблицы. В четвертом столбце таблицы обозначены данные о том, сколько дней будет продолжаться выполнение каждой работы. Эта величина зависит от объема работы, числа её исполнителей и режима труда. Тариф оплаты за выполнение конкретной работы в объеме 1 человеко-смены указан в пятом столбце. В шестом столбце содержатся значения коэффициента увеличения фонда оплаты труда, выделяемого на выполнение работы, которые зависят от режима труда. Все указанные коэффициенты в таблице 2 равны 1. Это означает, что все работы будут выполняться в обычном режиме (1 смена, т. е. 8 часов, в день). Если для выполнения какой-либо работы будет установлен более интенсивный режим, то значение соответствующего коэффициента будет превышать 1. Для стимулирования исполнителей трудиться в интенсивном режиме устанавливается двойной тариф оплаты за дополнительные часы работы. Так, если для выполнения работы установлен режим 1,5 смены в день, т. е. после обычных 8 часов труда исполнители продолжают работать ещё 4 часа, то коэффициент увеличения оплаты труда будет равен 2. Следуя этой логике рассуждений, если установлен режим 1,25 смены в день, то значение указанного коэффициента составит 1,5. Последний, шестой, столбец содержит значения фонда оплаты труда, вычисляемого как произведение объема работы, тарифа оплаты труда и коэффициента увеличения фонда оплаты труда.

Рассмотрим в качестве примера работу «Утепление стен», имеющую код 5–8. Началом выполнения этой работы является событие номер 5, а завершением – событие номер 8. Другими словами, работа с кодом 5–8 является выходящей по отношению к событию номер 5 и входящей для события номер 8.

В соответствии с методикой сетевого планирования каждое событие, связанное с выполнением работ, может быть графически представлено в виде, показанном на рис. 1.

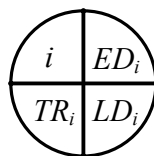


Рис. 1 Обозначения событий
Fig. 1. Event Designations

Значением i обозначен порядковый номер события. Величина ED_i является ранним сроком наступления события номер i , который вычисляется по формуле:

$$ED_i = \max \{ED_k + WC_{ki}\}, \quad (16)$$

где ED_k – ранний срок наступления события номер k , с которым событие номер i связано входящей работой с кодом $k-i$; WC_{ki} – продолжительность выполнения работы с кодом $k-i$. Ранний срок наступления первого события равен 0.

Величина LD_i является поздним сроком наступления события номер i . Значение этой величины вычисляется по формуле:

$$LD_i = \max \{ED_k + WC_{ki}\}, \quad (17)$$

где LD_j – поздний срок наступления события номер j , с которым событие номер i связано выходящей работой с кодом $i-j$; WC_{ij} – продолжительность выполнения работы с кодом $i-j$. Поздний срок наступления заключительного события всегда равен раннему сроку наступления заключительного события.

Величина TR_i является резервом времени наступления события номер i . Значение этой величины вычисляется по формуле:

$$TR_i = LD_i - ED_i. \quad (18)$$

Начальный вид полученного сетевого графика показан на рис. 2. Здесь каждая работа показана в виде стрелки, соединяющей непосредственно связанные с ней события. Число, относящееся к той или иной работе, соответствует продолжительности её выполнения (в данном случае используется нормативная продолжительность, измеряемая в днях). Работы, показанные пунктирной стрелкой, являются фиктивными. Такие работы имеют нулевую продолжительность и фактически не требуют выполнения. Они служат для учета технологической последовательности выполнения работ. Так, например, фиктивная работа, соединяющая событие номер 2 с событием номер 7, показывает, что выполнение работы «Внутренняя отделка» (код 7–9) нельзя начинать раньше, чем будет выполнена работа «Замена окон» (код 1–2).

Время, требуемое для проведения всего комплекса работ капитального ремонта, определяется с помощью критического пути. В состав критического пути входят работы, соединяющие события с нулевым резервом времени. В рассматриваемом случае нулевой резерв времени имеют события с номерами 1, 6, 7 и 9, значит, критический путь включает работы с кодами 1–6, 6–7 и 7–9. Суммарная продолжительность выполнения этих работ составляет 72 дня, т. е. именно столько потребуется времени для проведения всего планируемого капитального ремонта здания.

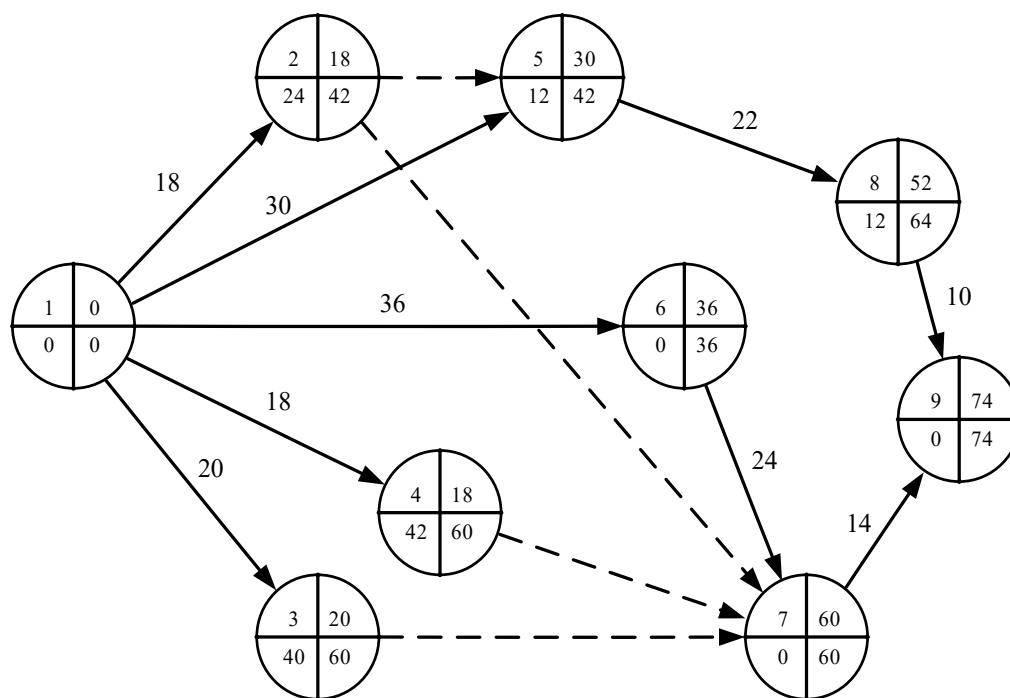


Рис. 2. Начальный вид сетевого графика
Fig. 2. Initial view of the network graph

В табл. 2 показано, что имеется неизрасходованный остаток средств (1008 тыс. руб.), выделенных для проведения планируемого капитального ремонта здания. За счет использования этих средств имеется возможность оптимизировать сетевой график выполнения работ в целях сокращения времени проведения капитального ремонта. Для этого можно уменьшить продолжительность выполнения работ, входящих в состав критического пути, если исполнители будут трудиться не 1 смену в день, а больше, например, 1,5 смены в день. На такой режим труда целесообразно перевести исполнителей той работы в составе критического пути, которой соответствует наименьший тариф оплаты труда. Судя по таблице 2, к ним относятся исполнители работы с кодом 1–6. В целях оптимизации планирования капитального ремонта здания каждого исполнителя работы 1–6 можно перевести на режим 1,5 смены в день с коэффициентом 2. При этом продолжительность работы существенно снизится и составит $36 : 1,5 = 24$ дня, а фонд оплаты труда потребует двойного увеличения и будет равен 2016 тыс. руб. В таком случае все средства, выделенные на капитальный ремонт здания, будут израсходованы. В результате вышеуказанной оптимизации получим два критических пути. Первый критический путь содержит работы 1–5, 5–8 и 8–9. Второй критический путь содержит работы 1–6, 6–7 и 7–9. Суммарная продолжительность работ, входящих в состав любого критического пути, равна 62 дням. Таким образом, выполненная оптимизация дает возможность сократить время проведения планируемого капитального ремонта здания на 12 дней.

Рассмотрим применение предложенного метода прогнозирования продолжительности выполнения работ в целях сокращения времени проведения капитального ремонта. В качестве примера спрогнозируем продолжительность работы 1–6 в соответствии с предложенным методом. Для этого необходимо настроить соответствующую ANFIS-модель. Формирование обучающих массивов должно осуществляться с использованием базы данных, содержащей сведения о составах исполнителей, наборах используемых материалов, сложности условий, а также значениях нормативной и реальной продолжительности работ, выполненных в ходе завершённых капитальных ремонтов зданий. Для настройки ANFIS-модели, предназначенной для прогнозирования реальной продолжительности работы 1–6, использовалась обучающая выборка из 385 строк. Обучение модели выполнялось с использованием гибридного алгоритма. Для минимизации ошибки обучения потребовалось около 120 циклов.

В результате произведенной настройки получены значения параметров функций принадлежности входных переменных и индивидуальных выводов нечетких правил: $INQAa = 0,2846$; $INQAb = 0,6305$; $INQAc = 1,216$ и $INQAd = 1,959$. На основе применения ANFIS-модели выполнены процедуры нечеткого вывода. В результате установлено, что для значений входных переменных $INQ = 1,65$, $INE = 1,38$ и $INC = 1$ значение выходной переменной K составляет 0,833. С использованием формулы (1) и данных о значениях K и St в режиме 1 смена в день, вычислено значение прогнозируемой продолжительности для работы 1–6, которое составило 30 дней. Аналогичным образом на основе применения предложенного метода вычислены значения K и Act для остальных работ планируемого капитального ремонта здания. Для оптимизации данного сетевого графика можно предложить отраженный в табл. 2 остаток средств (1008 тыс. руб.) использовать для оплаты дополнительного труда исполнителям работ 1–5 и 1–6. Чтобы указанный остаток был израсходован, следует перевести исполнителей этих работ на режим 1,25 смены в день, т. е. установить для них 10-часовой ежедневный труд. В таком случае реальная продолжительность этих работ вместо 30 дней составит $30 : 1,25 = 24$ дня. При этом коэффициент увеличения оплаты труда будет равен 1,5, а фонд оплаты труда каждой из этих работ составит 1512 тыс. руб. Тогда суммарный фонд оплаты труда составит 8316 тыс. руб., а все выделенные на капитальный ремонт средства будут израсходованы.

В результате вышеуказанной оптимизации с применением предложенного метода получим сетевой график, изображенный на рис. 3. В нем имеется два критических пути. Первый критический путь содержит работы 1–5, 5–8 и 8–9. Второй критический путь содержит работы 1–6, 6–7 и 7–9. Суммарная продолжительность работ, входящих в состав любого критического пути, равна 52 дням. Таким образом, в рассмотренном примере выполненная оптимизация на основе предложенного метода дает возможность сократить время проведения планируемого капитального ремонта здания на 10 дней или на 16,13 % по сравнению с оптимизацией без применения предложенного метода.

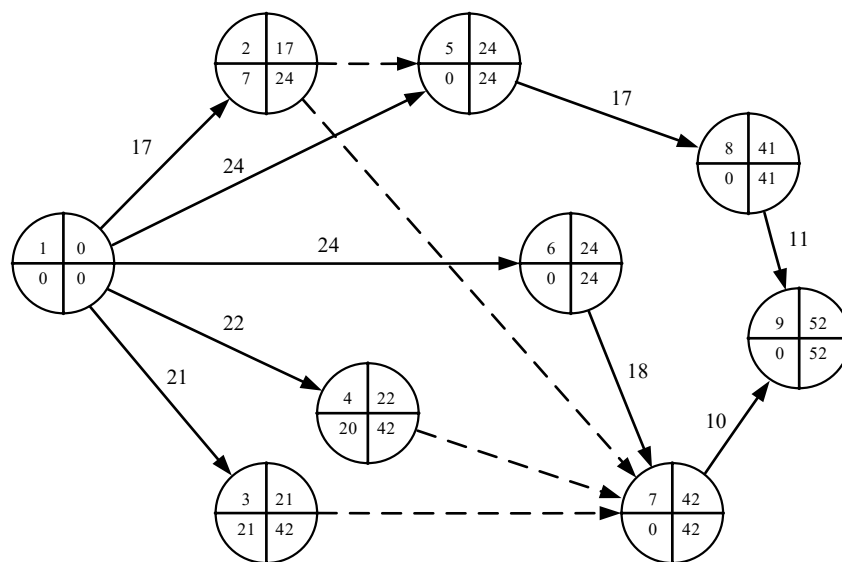


Рис. 3. Сетевой график, оптимизированный на основе применения предложенного метода
 Fig. 3. Network schedule optimized based on the proposed method

В результате проведения многочисленных вычислительных экспериментов с другими исходными данными установлено, что применение предложенного метода позволяет сократить время проведения капитальных ремонтов зданий на величину от 9,26 % до 18,34 %. Таким образом, проведенное исследование показало работоспособность предложенного метода прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий и целесообразность его применения на практике.

Заключение

Таким образом, в статье представлено решение актуальной научно-технической задачи, состоящей в разработке метода прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий. Предложенный метод основан на применении нечеткого логического вывода для оценивания коэффициента корректировки продолжительности выполнения работы относительно нормативного значения. В качестве входных переменных используются показатели важнейших факторов, влияющих на продолжительность выполнения конкретной работы. К ним относятся квалификация исполнителей, качество используемых материалов и сложность условий выполнения работы. Настройка параметров нечеткого вывода осуществляется с применением ANFIS-модели, для обучения которой составляется выборка, учитывающая ретроспективные результаты выполнения работ с участием определенных исполнителей и использованием тех или иных наименований материалов, сведения о которых заносятся в базу данных. Выполнение многочисленных вычислительных экспериментов показало, что применение предложенного метода позволяет существенно сократить время проведения капитальных ремонтов зданий за счет рационального перераспределения исполнительских и материальных ресурсов с учетом прогнозируемой продолжительности работ.

Полученные результаты могут использоваться в дальнейших исследованиях, которые будут посвящены построению автоматизированной системы планирования капитальных ремонтов зданий и разработке соответствующего программного обеспечения.

Список литературы

- Ершов Р.М., Топчий Д.В., 2021. Методика формирования сетевого плана капитального ремонта и реконструкции общественных зданий с использованием теории нечетких множеств. *Строительное производство*, 3: 41–48.
- Махди Т.Н., Игитян Е.В., Польщиков К.А., Корсунов Н.И. 2022. Оценивание эффективности функционирования диалоговой системы на основе применения нечеткого вывода с нейросетевой настройкой. *Экономика. Информатика*, 49(2): 356–374. DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-2-356-374.
- Польщиков К.А., Лазарев С.А., Константинов И.С., Польщикова О.Н., Свойкина Л.Ф., Игитян Е.В., Балакшин М.С. 2020. Модель для оценки эффективности выполнения робототехнической системой коммуникативных функций. *СТИН*, 6: 4–7.
- Польщиков К.А., Польщикова О.Н., Игитян Е.В., Балакшин М.С. 2019. Алгоритм поддержки принятия решений по выбору средств обработки больших массивов естественно-языковых данных. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*, 46(3): 553–562. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-553-562.
- Топчий Д.В., Ершов Р.М., Токарский А.Я. 2022. Особенности строительно-монтажных работ при капитальном ремонте и реконструкции административных зданий. *Строительное производство*, 4: 52–58.
- Aliahmad M., Miri M., Rashki M. 2024. Comparison of Importance Sampling Method with Other Probability Estimation Methods for Completion of Construction Projects. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(3): 131–145.
- Aliyu A.M. 2024. Project Management: An Objective Assessment of Activity Duration. *Open Access Journal of Data Science and Artificial Intelligence*, 2(1), 1–9.
- Andiyan A., Putra R.M., Rembulan G.D., Tannady H. 2021. Construction Project Evaluation Using CPM-Crashing, CPM-PERT and CCPM for Minimize Project Delays. *Journal of Physics: Conference Series*, 1933 (1): 012096.
- Aulia S., Cipta H. 2023. Network Planning Analysis Using CPM and PERT Methods on Optimization of Time and Cost. *Sinkron. Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, 7(1): 171–177.
- Chang Y., Jiang Y., Zhang C., Xue A., Chen B., Zhang W., Xu L., Liu X., Dai Y. 2021. PERT based emergency disposal technique for fracture failure of deepwater drilling riser. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201: 108407.
- Deng J., Jian W. 2022. Estimating Construction Project Duration and Costs upon Completion Using Monte Carlo Simulations and Improved Earned Value Management. *Buildings*, 12 (12): 2173.



- Desticioğlu B. 2022. Project planning with CPM and PERT methods: example of defence industry. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 18(2): 363–385.
- Farida Y., Anenda L.P. 2022. Network Planning Analysis on Road Construction Projects by CV. X Using Evaluation Review Technique (PERT)-Critical Path Method (CPM) and Crashing Method. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4): 377–390.
- Haekal J., Masood I. 2023. Simulation of ERP project scheduling using CPM and PERT method with promodel: A case studies in food and beverage companies in Jakarta Selatan, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2530 (1): 040003.
- Hudda S., Barnwal R., Chejara T., Khurana A. 2025. An MCDA and PERT Based Novel Approach for Prioritization of User Stories in Agile Environment. *Computational Science and Computational Intelligence*, 2505: 248–262.
- Putra E.S., Rodhi N.N., Ratnasari A.K. 2024. Scheduling Analysis on the Heavy Rehabilitation Construction Project of the Dr. R. Koesma Tuban Hospital Building Using the PERT Method. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 8: 4977.
- Polshchikov K.A., Velikanova A.S., Igityan E.V. 2022. Neural network natural language processing tools for identifying personal priorities in the project performer's selection in the field of smart agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1069(1): 012012.
- Silva J., Ávila P., Patrício L. 2022. Improvement of planning and time control in the project management of a metalworking industry – case study. *Procedia Computer Science*, 196: 288–295.
- Tam D.S.H., Liu Y., Xu H., Xie S., Lau W.C. 2023. PERT-GNN: Latency Prediction for Microservice-based Cloud-Native Applications via Graph Neural Networks. *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2155–2165.
- Zaneldin E., Ahmed W. 2024. A Generic Framework for Managing Schedule and Cost Risks of Construction Activities Using PERT and the EV Technique. *Buildings*, 14(7): 1918.

References

- Ershov R.M., Topchiy D.V. 2021. Methodology for Forming a Network Plan for Capital Repair and Reconstruction of Public Buildings Using the Theory of Fuzzy Sets. *Construction production*, 3: 41–48 (in Russian).
- Mahdi T.N., Igityan E.V., Polshchikov K.A., Korsunov N.I. 2022. Evaluation of the Dialogue System Efficiency Based on the Application of Fuzzy Inference with Neural Network Settings. *Economics. Information technologies*, 49(2): 356–374 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-356-374.
- Pol'shnikov K.A., Lazarev S.A., Konstantinov I.S., Pol'shnikova O.N., Svojkina L.F., Igitjan E.V., Balakshin M.S. 2020. Model' dlja ocenki jeffektivnosti vypolnenija robototekhnicheskoy sistemoj kommunikativnyh funkciy [A model for assessing the effectiveness of a robotic system in performing communication functions]. *STIN*, 6: 4–7.
- Polshchikov K.A., Polshchikova O.N., Igityan E.V., Balakshin M.S. 2019. The algorithm of decision support in the choice of means of processing large amounts of natural language data. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies*, 46 (3): 553–562 (in Russian). DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-553-562.
- Topchiy D.V., Ershov R.M., Tokarskiy A.Y. 2022. Specifics of Construction and Installation Works during Capital Repairs and Reconstruction of Administrative Buildings. *Construction production*, 4: 52–58 (in Russian).
- Aliahmad M., Miri M., Rashki M. 2024. Comparison of Importance Sampling Method with Other Probability Estimation Methods for Completion of Construction Projects. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(3): 131–145.
- Aliyu A.M. 2024. Project Management: An Objective Assessment of Activity Duration. *Open Access Journal of Data Science and Artificial Intelligence*, 2(1), 1–9.
- Andiyan A., Putra R.M., Rembulan G.D., Tannady H. 2021. Construction Project Evaluation Using CPM-Crashing, CPM-PERT and CCPM for Minimize Project Delays. *Journal of Physics: Conference Series*, 1933 (1): 012096.
- Aulia S., Cipta H. 2023. Network Planning Analysis Using CPM and PERT Methods on Optimization of Time and Cost. *Sinkron. Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, 7(1): 171–177.
- Chang Y., Jiang Y., Zhang C., Xue A., Chen B., Zhang W., Xu L., Liu X., Dai Y. 2021. PERT based emergency disposal technique for fracture failure of deepwater drilling riser. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201: 108407.

- Deng J., Jian W. 2022. Estimating Construction Project Duration and Costs upon Completion Using Monte Carlo Simulations and Improved Earned Value Management. *Buildings*, 12 (12): 2173.
- Desticioğlu B. 2022. Project planning with CPM and PERT methods: example of defence industry. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 18(2): 363–385.
- Farida Y., Anenda L.P. 2022. Network Planning Analysis on Road Construction Projects by CV. X Using Evaluation Review Technique (PERT)-Critical Path Method (CPM) and Crashing Method. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4): 377–390.
- Haekal J., Masood I. 2023. Simulation of ERP project scheduling using CPM and PERT method with promodel: A case studies in food and beverage companies in Jakarta Selatan, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2530 (1): 040003.
- Hudda S., Barnwal R., Chejara T., Khurana A. 2025. An MCDA and PERT Based Novel Approach for Prioritization of User Stories in Agile Environment. *Computational Science and Computational Intelligence*, 2505: 248–262.
- Putra E.S., Rodhi N.N., Ratnasari A.K. 2024. Scheduling Analysis on the Heavy Rehabilitation Construction Project of the Dr. R. Koesma Tuban Hospital Building Using the PERT Method. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 8: 4977.
- Polshchikov K.A., Velikanova A.S., Igityan E.V. 2022. Neural network natural language processing tools for identifying personal priorities in the project performer's selection in the field of smart agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1069(1): 012012.
- Silva J., Ávila P., Patrício L. 2022. Improvement of planning and time control in the project management of a metalworking industry – case study. *Procedia Computer Science*, 196: 288–295.
- Tam D.S.H., Liu Y., Xu H., Xie S., Lau W.C. 2023. PERT-GNN: Latency Prediction for Microservice-based Cloud-Native Applications via Graph Neural Networks. *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2155–2165.
- Zaneldin E., Ahmed W. 2024. A Generic Framework for Managing Schedule and Cost Risks of Construction Activities Using PERT and the EV Technique. *Buildings*, 14(7): 1918.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 28.07.2025

Поступила после рецензирования 05.09.2025

Принята к публикации 08.09.2025

Received July 28, 2025

Revised September 05, 2025

Accepted September 08, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Еремин Дмитрий Владимирович, соискатель, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Dmitry V. Eremin, external PhD student, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Польшиков Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Konstantin A. Polshchikov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Маматов Александр Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Aleksandr V. Mamatov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Systems, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.93

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-710-725

EDN WTANPO

Вычисление в видеопотоке пространственно-временных характеристик объектов посредством использования методов фотограмметрии и компьютерного зрения

¹ Болгов Д.А., ¹ Деменков Д.В., ^{1,2} Донская А.Р., ^{1,2} Орлова Ю.А., ^{1,2} Зубков А.В.

¹ Волгоградский государственный технический университет,
Россия, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28

² Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России,
Россия, 400066, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1
dima-bolgov.02@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлено исследование, направленное на извлечение пространственно-временных характеристик объектов в видеопотоке с использованием методов фотограмметрии и компьютерного зрения. Особенностью подхода является применение ограниченного количества непрофессиональных видеокамер. В качестве прикладной области была выбрана задача автоматизации спортивной аналитики, в частности – анализ видеозаписей баскетбольных матчей. Тем не менее предложенные решения обладают универсальностью и могут быть адаптированы для других прикладных направлений, таких как системы видеонаблюдения, обеспечение общественной безопасности, мониторинг транспортных потоков, анализ поведения потребителей в розничной торговле, а также повышение эффективности взаимодействия между продавцами и покупателями. Адаптация предложенной методики к различным областям достигается за счёт изменения исходных обучающих данных и настройки соответствующих алгоритмов машинного обучения, подробно рассмотренных в рамках настоящего исследования. Разработанная система включает два последовательных этапа. На первом этапе осуществляется детектирование объектов на видеопотоке с применением методов компьютерного зрения и глубокого обучения, что позволяет выделить интересные объекты на каждом кадре. На втором этапе выполняется расчёт пространственных характеристик обнаруженных объектов с использованием методов фотограмметрической реконструкции, позволяющих восстановить их трёхмерные координаты и траектории движения. Для реализации задачи детектирования объектов (игроков, мяча, судей, баскетбольного кольца и щита) использована модель YOLOv8, обученная на специально сформированном датасете, составленном из видеозаписей матчей FIBA. Для восстановления пространственных координат применён метод прямой фотограмметрической засечки, модифицированный для функционирования с использованием доступного оборудования. В ходе эксперимента, проведённого на баскетбольной площадке размером 23×11 метров с использованием двух камер смартфонов, была достигнута средняя точность позиционирования 4 см при среднеквадратичном отклонении до 8 см. Метрики модели YOLOv8 продемонстрировали значения точности и полноты в диапазоне 0,85–0,95, а показатель mAP составил от 0,70 до 0,85. В рамках работы также предложены усовершенствования, включая использование метода обратной фотограмметрической засечки для автоматизации калибровки на основе разметки площадки. Разработанная система представляет собой перспективное решение для поддержки судейства и аналитики на локальных спортивных соревнованиях, обеспечивая при этом экономичную альтернативу традиционным системам спортивного видеонаблюдения и анализа.

© Болгов Д.А., Деменков Д.В., Донская А.Р., Орлова Ю.А., Зубков А.В., 2025

Ключевые слова: компьютерное зрение, фотограмметрическая засечка, баскетбол, YOLOv8, трекинг объектов, спортивная аналитика

Для цитирования: Болгов Д.А., Деменков Д.В., Донская А.Р., Орлова Ю.А., Зубков А.В. 2025. Вычисление в видеопотоке пространственно-временных характеристик объектов посредством использования методов фотограмметрии и компьютерного зрения. *Экономика. Информатика*, 52(3): 710–725. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-710-725. EDN WTANPO

Calculation of Spatial and Temporal Characteristics of Objects in a Video Stream Using Photogrammetry and Computer Vision Methods

¹ Dmitriy A. Bolgov, ¹ Dmitriy V. Demenkov, ^{1,2} Anastasia R. Donskaia, ^{1,2} Yuliya A. Orlova,
^{1,2} Alexandr V. Zubkov

¹ Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

² Volgograd State Medical University of Public Health Ministry of the Russian Federation,
1 Pavshikh Bortsov Sq., Volgograd 400131, Russia
dima-bolgov.02@mail.ru

Abstract. This article presents the results of a study aimed at extracting the spatiotemporal characteristics of objects in a video stream using photogrammetry and computer vision techniques. A special feature of the approach is the use of a limited number of non-professional video cameras. The task of automating sports analytics was chosen as an application area, in particular, the analysis of video recordings of basketball matches. Nevertheless, the proposed solutions are versatile and may be adapted for other applications, such as video surveillance systems, public safety, traffic flow monitoring, consumer behavior analysis in retail, as well as improving the efficiency of interaction between sellers and buyers. The adaptation of the proposed methodology to various fields is achieved by changing the initial training data and configuring the corresponding machine learning algorithms, which are discussed in detail in the framework of this study. The developed system includes two consecutive stages. At the first stage, objects are detected in the video stream using computer vision and deep learning methods, which makes it possible to identify objects of interest in each frame. At the second stage, the spatial characteristics of the detected objects are calculated using photogrammetric reconstruction methods, which allow restoring their three-dimensional coordinates and motion trajectories. To implement the task of detecting objects (players, ball, referees, basketball hoop and shield), the YOLOv8 model was used, trained on a specially generated dataset compiled from FIBA match videos. To restore the spatial coordinates, we applied the direct photogrammetric serif method, modified to operate using available equipment. During the experiment conducted on a 23x11-meter basketball court using two smartphone cameras, an average positioning accuracy of 4 cm was achieved with a standard deviation of up to 8 cm. The YOLOv8 metrics demonstrated accuracy and completeness values in the range of 0.85-0.95, and the mAP indicator ranged from 0.70 to 0.85. Improvements have also been proposed as part of the work, including the use of the reverse photogrammetric serif method to automate calibration based on site markings. The developed system is a promising solution for supporting refereeing and analytics at local sports competitions, while providing a cost-effective alternative to traditional sports video surveillance and analysis systems.

Keywords: computer vision, photogrammetric resection, basketball, YOLOv8, object tracking, sports analytics

For citation: Bolgov D.A., Demenkov D.V., Donskaia A.R., Orlova Yu.A., Zubkov A.V. 2025. Calculation of Spatial and Temporal Characteristics of Objects in a Video Stream Using Photogrammetry and Computer Vision Methods. *Economics. Information technologies*, 52(3): 710–725 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-710-725. EDN WTANPO

Введение

В современном спорте применяется множество цифровых технологий, которые способствуют улучшению эффективности, точности и безопасности проведения соревнований. Системы на основе трекеров и компьютерного зрения – две самые распространенные технологии цифровизации в спорте, каждая из которых предоставляет информацию для анализа поведения спортсменов, тренеров и судей во время проведения матча [Боровик, Шорох, 2016; Волкова и др., 2022].

Выбор между системами на базе трекеров [Ferraz et al., 2023] и компьютерного зрения [Monier et al., 2009; Thomas et al., 2017] зависит от конкретных потребностей спортсмена, тренера или судьи. Обе технологии предоставляют полезные данные, но различаются в принципах работы и требованиях к оборудованию.

Такие системы дают возможность тренерам и спортсменам тщательно исследовать свою технику, находить ошибки и совершенствовать свои действия [Buldu et al., 2016]. Судьи, в свою очередь, используют видеоповторы для выявления нарушений и минимизации ошибок, связанных с ограниченным обзором судейской бригады.

Системы, основанные на камерах с компьютерным зрением [Rahimian, Toka, 2022; Vidal-Codina et al., 2022], позволяют фиксировать и анализировать движения спортсменов, анализируя видеопоток. Это помогает в оценке техники, ее улучшении и создании реалистичных тренировочных симуляций. Однако такие системы могут требовать дополнительной настройки и калибровки камер и программного обеспечения для каждого вида спорта.

Системы с трекерами используют датчики, которые носят спортсмены или крепят к их инвентарю. Эти системы могут иметь ограничения при анализе сложных движений или в случае, если нужно отслеживать всю команду. К тому же такие системы могут причинять физические неудобства спортсменам, или же быть поврежденными в контактных видах спорта.

Примером систем видеофиксации, используемых в баскетболе, являются SportVU¹ и SecondSpectrum². Они используют несколько камер, расположенных по всей площадке, для отслеживания движения игроков и мяча в режиме реального времени. Эти системы собирают данные о скорости, расстоянии и других статистических показателях игроков и помогают тренерам и аналитикам разобраться в плане тактики, улучшить тренировки и разрабатывать стратегию команды. В настоящее время система SportVU была заменена в профессиональной лиге NBA на систему Second Spectrum, имеющую аналогичные характеристики. Обе системы используют информацию с камер, имеющих частоту съемки 25 кадров в секунду; обе системы представляют из себя комплексные решения для баскетбольной спортивной аналитики.

В данном исследовании предлагается проверить возможность организации процесса автоматической фиксации положения игровых объектов с использованием ограниченного количества непрофессиональных камер с целью внедрения систем отслеживания на соревнованиях.

Постановка задачи

В рамках данного исследования для оценки эффективности системы, состоящей из меньшего количества камер, предлагается разработать программное обеспечение, которое должно предоставлять возможность для отслеживания пространственного положения динамических объектов на игровом поле.

Для реализации такой системы и достижения поставленной цели выделены следующие этапы:

¹ STATS SportVU // STATS Perform: официальный сайт. — URL: <https://www.statsperform.com/> (дата обращения: 15.05.2025).

² Second Spectrum // Second Spectrum: официальный сайт. — URL: <https://www.secondspectrum.com/> (дата обращения: 15.05.2025).

- разработать алгоритм детектирования игровых объектов на баскетбольной площадке;
- подобрать и адаптировать математический метод определения пространственного положения объектов по изображению;
- реализовать вычислительный модуль, который будет рассчитывать пространственное положение объектов на снимках;
- реализовать средство визуализации трехмерной модели игрового поля;
- проверить возможность использования систем слежения, использующих ограниченное число непрофессиональных камер, и оценить эффективность.

Алгоритм обнаружения игровых объектов на поле в видеопотоке

Для распознавания игровых объектов на поле с использованием видеокамер применяются алгоритмы компьютерного зрения [Zheng, Zhang, 2022]. В рамках данного исследования была выбрана задача детектирования – один из ключевых подходов в компьютерном зрении, заключающийся в обнаружении и локализации объектов определенных классов [Shankara et al., 2024]. Детекция предполагает выделение объектов на изображении с помощью ограничивающих рамок (bounding boxes), определяемых координатами, а затем присвоение каждой рамке одного из заранее определенных классов *C*. В рамках задачи детектирования необходим набор данных (датасет), содержащих требуемые выделяемые объекты: игрок (player), судья (referee), мяч (ball), кольцо (basket), баскетбольный щит (backboard).

Авторами были проанализированы найденные в открытом доступе датасеты DeepSport Dataset¹ и SportsMOT², однако были выявлены ограничения, препятствующие их применению для комплексного анализа баскетбольных матчей. DeepSport Dataset не содержит аннотаций для судей, баскетбольных колец и щита, что критически важно для идентификации всех ключевых объектов игровой ситуации, существенно снижая его применимость. В свою очередь, SportsMOT сосредоточен исключительно на задаче трекинга игроков, с аннотациями, ориентированными на отслеживание перемещений спортсменов, но без информации о других объектах сцены, таких как судьи, кольца и щит.

Был собран набор данных, содержащий 30 записей баскетбольных матчей. В качестве источника данных были выбраны баскетбольные матчи формата FIBA, проводимые с 1 октября 2022 года³. Из каждой записи баскетбольного матча вырезались фрагменты по 5–10 минут, содержащие активные фазы баскетбольного матча. После чего фрагменты баскетбольных матчей разбивались покадрово. Затем полученные кадры были загружены в средство аннотирования Roboflow⁴, которое обладает повышенной оптимизацией по сравнению со своим конкурентом CVAT [Ross et al., 2014].

В качестве целевых игровых объектов детектирования были выбраны следующие классы объектов *C*: игрок (player), судья (referee), мяч (ball), кольцо (basket), баскетбольный щит (backboard)⁵. Затем для каждого кадра было проведено аннотирование при помощи интерактивной разметки.

После завершения аннотирования датасет был экспортирован в нужные форматы. После дополнительной проверки и валидации датасета часть примеров была отброшена в связи с некорректностью разметки. Итоговый размер датасета составил более 8000 аннотированных

¹ 300+ high-resolution professional basketball images with multiple annotations // Kaggle: [источник набора данных]. — URL: <https://www.kaggle.com/datasets/gabrielvanzanddycke/deepsport-dataset> (дата обращения: 06.05.2025).

² SportsMOT // Github: [источник набора данных]. — URL: <https://github.com/MCG-NJU/SportsMOT> (дата обращения: 30.04.2025).

³ Official Basketball Rules 2022: Basketball Rules & Basketball Equipment: as approved by FIBA Central Board on 28.04.2023: valid as of 01.07.2023. — Mies: FIBA, 2023. — 104 p.

⁴ Roboflow // Roboflow: официальный сайт. — URL: <https://roboflow.com/> (дата обращения: 15.05.2025)

изображений. Распределение данных между выборками осуществлялось следующим образом: 60 % всех примеров отводилось на обучение, 20 % – на валидацию, и оставшиеся 20 % – на тестирование.

Существуют два основных подхода к детектированию объектов с использованием моделей машинного обучения. Первый – это двухэтапные методы, например, семейство моделей на базе регионов R-CNN (Region Based Convolutional Neural Network) [Ross et al., 2014]¹. Второй – одноэтапные методы, такие как модели семейства YOLO (You Only Look Once) [Redmon et al., 2016]⁷.

Одноэтапные модели, включая YOLO, отличаются высокой скоростью работы, что делает их подходящими для задач в реальном времени, однако они могут уступать в точности при обнаружении небольших объектов из-за особенностей своей архитектуры. В рамках данного исследования предпочтение было отдано одноэтапному подходу, а именно модели YOLOv8, благодаря ее высокой производительности.

Метод восстановления пространственных координат игровых объектов

В качестве основы для реализации метода восстановления пространственных координат игровых объектов был взят метод решения прямой фотограмметрической засечки [Безменов, Сафин, 2020; Gruen, 2021]². Это метод обычно используется для определения координат наземных точек, которые находятся в плоскости перекрытия двух или нескольких снимков. Исходя из того, что мяч имеет форму шара, а, согласно принципу цилиндра⁵, игрок на баскетбольной площадке может быть схематично представлен в форме цилиндра, предлагаемый метод можно использовать для определения пространственного положения геометрического центра области изображения, в которой находится игровой объект. В дальнейшем для получения более детальной информации данный подход можно также адаптировать для определения координат ключевых точек игроков, таких как голова, локоть, колено и т. д. [Egi. 2022; Ye, 2024].

Метод прямой фотограмметрической засечки основан на использовании известных элементов внешнего и внутреннего ориентирования. Внешние элементы включают в себя три линейных и три угловых элемента. В качестве линейных выступают координаты камеры X, Y, Z по отношению к началу выбранной в пространстве системы координат. Угловые элементы представлены следующей системой углов Эйлера: α_0 – угол наклона снимка, t – дирекционный угол оптической оси фотокамеры, χ – угол поворота снимка. Элементы внешнего ориентирования представлены на рис. 1.

Элементами внутреннего ориентирования являются координаты главной точки снимка x_0 и y_0 , а также фокусное расстояние камеры f . С учетом этих элементов получаем координаты точки снимка во вспомогательной системе координат: $\tilde{x} = x - x_0$, $\tilde{y} = y - y_0$, $\tilde{z} = -f$.

Сложность использования данного подхода заключается в трудности определения элементов внутреннего ориентирования. Во-первых, фокусное расстояние объектива камеры непрофессионального оборудования редко указывается производителем. Во-вторых, координаты x и y изображения в плоскости камеры определяются в пикселях, и для перехода к миллиметрам необходимо знать размеры матрица видеокамеры, что в свою очередь является еще более недоступной информацией, чем фокусное расстояние. Ниже представлены способ, позволяющий адаптировать метод фотограмметрической засечки для использования на непрофессиональном оборудовании, и проведение расчетов через его известные характеристики.

На рис. 2 представлен конус зрения камеры S в плоскости xoz . BC ограничивает поле зрения камеры.

¹ Дэвис, Р. Компьютерное зрение: современные методы и перспективы развития / Р. Дэвис, М. Терк; пер. с англ. В. Яценков. — Москва: ДМК Пресс, 2022. — 690 с.

² Гордиенко, А.С. Дистанционное зондирование и фотограмметрия. Теория стереопары снимков. Основы пространственной фототриангуляции: учеб.-метод. пособие / А.С. Гордиенко. — Новосибирск: СГУГиТ, 2015. — 88 с.

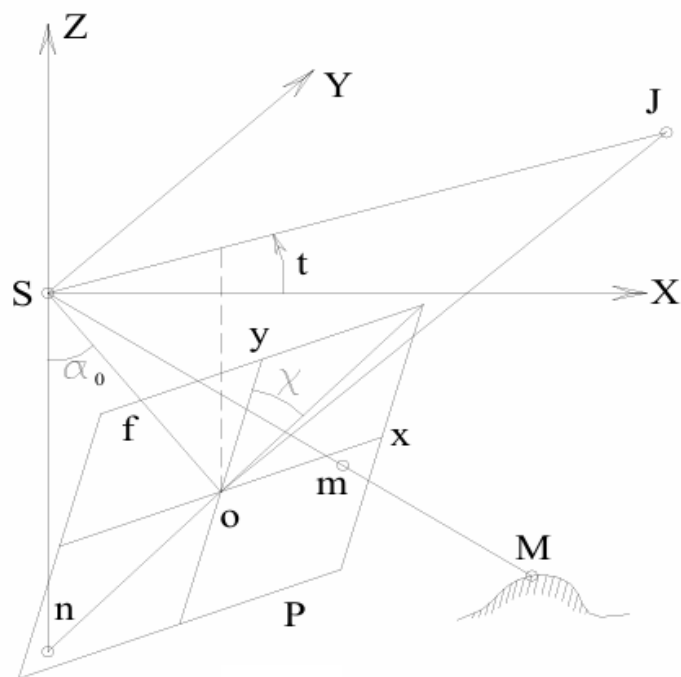


Рис. 1. Элементы внешнего ориентирования системы камер
Fig. 1. Elements of the external orientation of the camera system

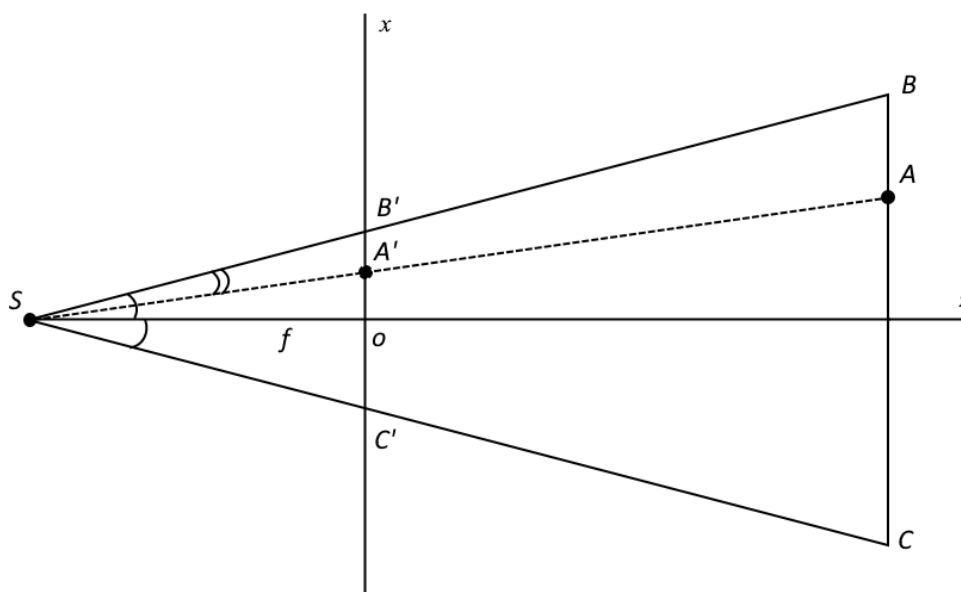


Рис. 2. Конус зрения камеры в плоскости xoz
Fig. 2. The camera's cone of view in the xoz plane

Прямая x проходит в фокальной плоскости объектива, параллельно BC . Объект, попавший в поле зрения камеры, расположен в точке A , его изображение – в точке A' в фокальной плоскости. В силу подобия треугольников SBA и $SB'A'$, а также треугольников SBC и $SB'C'$ можно получить следующее равенство – формула (1):

$$\frac{B'A'}{B'C'} = \frac{BA}{BC} = x_n, \quad (1)$$

где x_n – это нормализованная координата изображения на снимке относительно оси ox . Аналогично в плоскости uoz определяется координата y_n относительно оси ou . Таким образом, использование нормализованных координат изображения дает возможность отказаться от фактического значения фокусного расстояния и принять его за любое положительное число, отличное от 0. В настоящей работе принято считать f равной 1.

Для преобразования нормализованных координат в фактические необходимо определить линейные размеры проекции области видимости на фокальную плоскость. Выполнить данные расчеты можно с помощью σ – диагонального угла обзора видеокамеры. В случае, когда эта величина неизвестна, ее можно вычислить по формуле (2), расположив объект на расстоянии L и определив с его помощью диагональ области видимости D

$$\sigma = 2 \arctg \frac{D}{2L}. \quad (2)$$

Теперь диагональ проекции области видимости d на расстоянии f можно представить следующим образом – формула (3):

$$d = 2f \cdot tg \frac{\sigma}{2}. \quad (3)$$

Тогда координаты объекта на изображении x и y в миллиметрах рассчитываются следующим образом – формула (4):

$$\begin{aligned} x &= x_n \cdot d \sin(\arctg \frac{w}{h}), \\ y &= y_n \cdot d \cos(\arctg \frac{w}{h}), \end{aligned} \quad (4)$$

где w/h – соотношение сторон снимка, в большинстве камер эта величина составляет 16 / 9, но также легко определяется из метаданных файла изображения.

Дальнейшее решение прямой фотограмметрической засечки сводится к нахождению скаляра, показывающего, во сколько раз вектор до изображения отличается от вектора до объекта.

Данный метод является наиболее подходящим для решения поставленной задачи, поскольку для принятия судебных решений необходимо оценивать все три пространственные координаты каждого объекта на площадке; дополнение технического оборудования двумя камерами [Chen et al., 2021] является относительно недорогим решением [Magre Colorado, Martinez Santes, 2015]. Их размещение полностью контролируется технической группой, следовательно, системы внешнего ориентирования известны всегда, а расчет элементов внутреннего ориентирования подробно представлен в данном разделе.

Реализация программного обеспечения

Главным компонентом вычислительного сервера является вычислительный модуль, задачей которого является восстановление пространственного положения объектов по их паре изображений. Алгоритм работы вычислительного модуля основывается на решении прямой фотограмметрической засечки.

На первом этапе после получения данных об объектах на изображении происходит расчёт вектора от позиции камеры до изображения объекта – мнимой точки в фокальной плоскости видеокамеры.

На втором этапе вычисляется коэффициент масштабирования. Так как вектор до изображения и вектор до объекта в пространстве коллинеарные, расстояние до объекта можно

найти, умножив вектор изображения на некоторое скалярное значение – коэффициент масштабирования [Kundegorski, Breckon, 2014].

На заключительном этапе на основе коэффициента масштабирования и вектора изображения основной камеры рассчитывается вектор до пространственного положения объекта в пространстве. Этапы с первого по третий выполняются для каждого объекта на изображении.

Описание эксперимента

Для проверки предложенного решения был поставлен эксперимент, в рамках которого была произведена съемка игровых объектов на баскетбольной площадке с помощью пары видеокамер. Испытания проводились на игровом поле размерами 23 x 11 м, схема которого представлена на рис. 3.

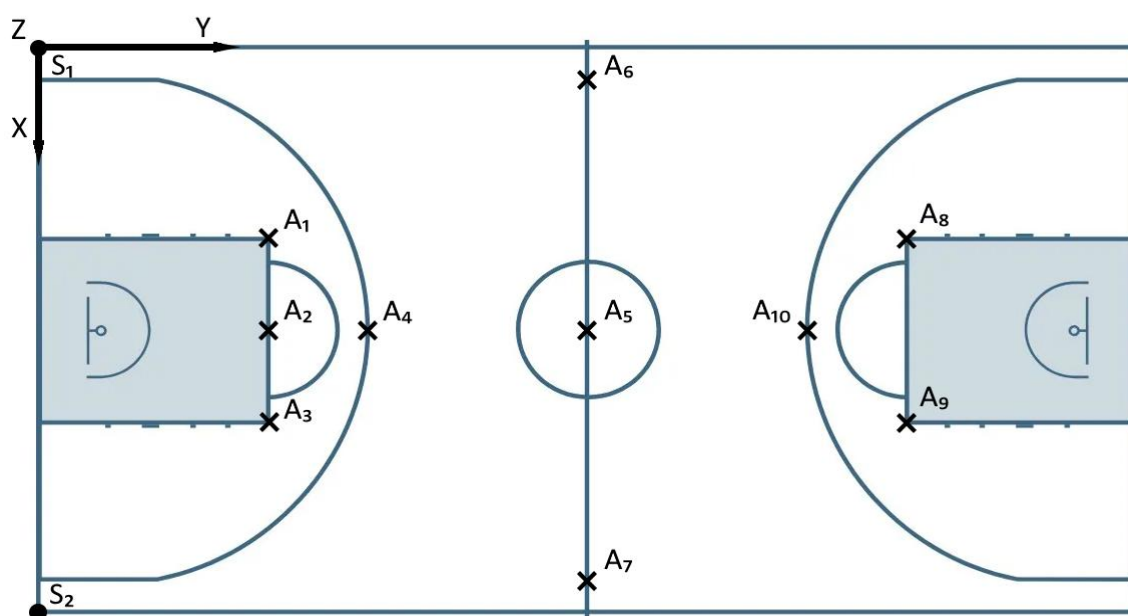


Рис. 3. Схема баскетбольной площадки с контрольными точками
Fig. 3. Diagram of a basketball court with control points

В качестве видеозаписывающих устройств использовались камеры смартфонов, так как они являются наиболее доступными непрофессиональными устройствами данного типа. Первая камера S_1 была расположена в начале выбранной системы координат, вторая S_2 – в другом углу поля вдоль оси OX , как показано на схеме баскетбольной площадки с контрольными точками (рис. 3). Угловые элементы ориентирования для S_1 составили $\alpha_0 = 90^\circ$, $t = 45^\circ$, $\chi = -90^\circ$, для S_2 – $\alpha_0 = 90^\circ$, $t = 45^\circ$, $\chi = -90^\circ$. То есть снимки имели альбомную ориентацию, а их плоскости располагались перпендикулярно плоскости площадки под углом 45° к оси OX . Таким образом вся площадка оказалась в области перекрытия обеих камер.

Для оценки качества на поле были выбраны 10 контрольных точек, которые также отмечены на рис. 3 крестиками. Точки выбирались таким образом, чтобы они были на различном расстоянии от камер и покрывали их границы области видимости. Помимо этого, в расчет принимались некоторые значимые позиции на поле, такие как штрафная линия, трехочковая зона и центр поля.

В каждой контрольной точке были запечатлены игрок и мяч, так как отслеживание именно этих игровых объектов является наиболее важным во время проведения матча. Визуализация расчетных позиций объектов представлена на рис. 4. Визуализация выполнена при помощи игрового движка Unity.



Рис. 4. Визуализация расчётных позиций игрока и мяча
Fig. 4. Visualization of the calculated positions of the player and the ball

В качестве условного обозначения для игрока выбран цилиндр, так как именно пространство внутри данной фигуры должен занимать игрок, согласно правилам ФИБА. Для условного обозначения мяча по объективным причинам выбран шар.

Метрики оценки качества метода

Апостериорная оценка точности результатов фототриангуляции [Chibunichev et al., 2016] выполняется по следующим критериям:

– разность фактических координат опорных точек и полученных в результате расчетов по формулам (5)

$$\begin{aligned}\Delta X &= X' - X \\ \Delta Y &= Y' - Y \\ \Delta Z &= Z' - Z,\end{aligned}\tag{5}$$

где X' , Y' , Z' – координаты опорных точек, полученные в результате фототриангуляции, X , Y , Z – фактические координаты опорных точек;

– среднее квадратичное отклонение разности координат опорных и контрольных точек, как показано в формуле (6)

$$m_{\Delta X} = \sqrt{\frac{\sum_i^n \Delta X^2}{n}} \quad m_{\Delta Y} = \sqrt{\frac{\sum_i^n \Delta Y^2}{n}} \quad m_{\Delta Z} = \sqrt{\frac{\sum_i^n \Delta Z^2}{n}},\tag{6}$$

где n – количество опорных точек;

– средняя ошибка – формула (7) – расхождения фактических и расчетных координат опорных точек

$$\delta X = \frac{\sum_i^n \Delta X}{n},\tag{7}$$

где δY , δZ вычисляются аналогично.

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 представлена серия графиков, иллюстрирующих метрики обучения и валидации модели для анализа объектов. По оси X отложено количество эпох (от 0 до 200), а по оси Y – соответствующие значения метрик. Графики включают: trainbox loss и valbox loss (потери на тренировочных и валидационных данных для рамок), traincls loss и valcls loss (потери на тренировочных и валидационных данных для классификации), trainloss и valloss (общие потери), metrics/precision(B) и metrics/recall(B) (точность и восстановление для рамок), а также metrics/mAP50(B) и metrics/mAP50-95(B) (средняя точность при IoU 0,5 и в диапазоне 0,5–0,95). Синие линии показывают исходные данные, а оранжевые – сглаженные значения. Все метрики демонстрируют снижение потерь и рост точности/восстановления с увеличением эпох, с валидационными значениями, стабилизирующимися около 0,85–0,95 для precision и recall, и 0,70–0,85 для mAP.

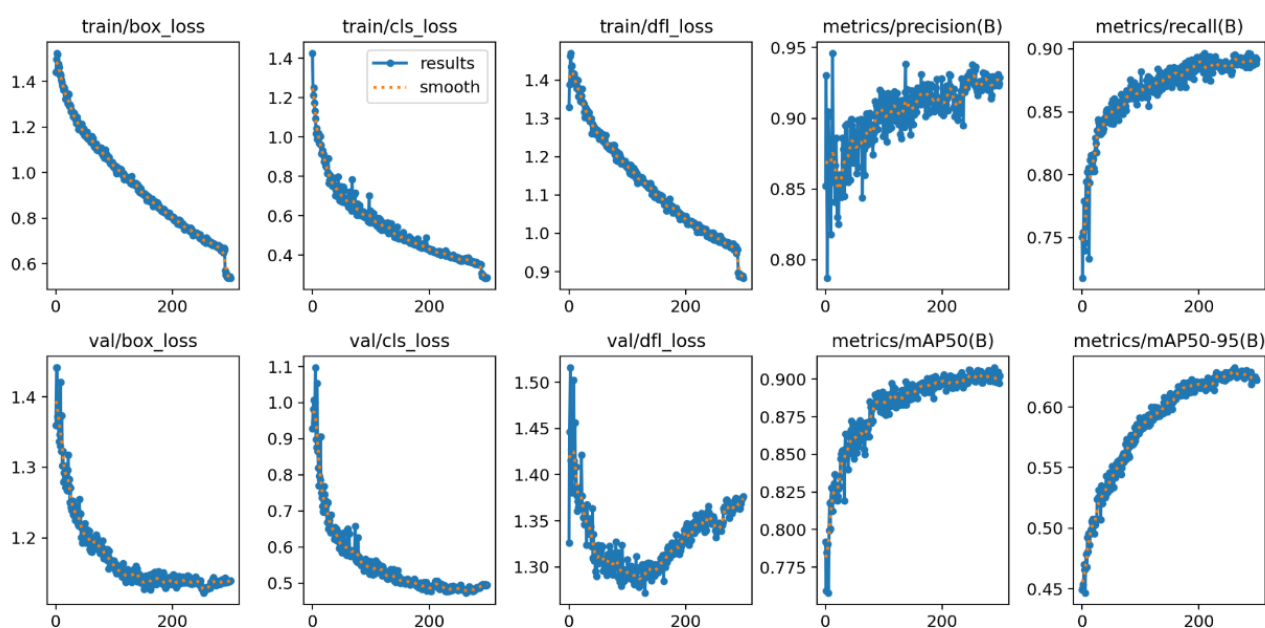


Рис. 5. Графики основных метрик обученной модели
Fig. 5. Graphs of the main metrics of the trained model

На рис. 6 представлены графики кривых Recall-Confidence (восстановление-по уверенности) (слева), Precision-Confidence (точность-по уверенности) (в центре) и F1-Confidence (F1-оценка по уверенности) (справа) [Yacoubu, Axman. 2020] для анализа объектов на баскетбольной площадке. Общая кривая Recall-Confidence для всех классов имеет пик со значением 0,93 в 0,00, что указывает на высокую общую производительность модели при низкой уверенности. Кривая Recall-Confidence всех классов показывает плавное снижение восстановления с увеличением уверенности с заметным пересечением других кривых, что отражает различия в детекции каждого объекта. Общая кривая Precision-Confidence для всех классов (all classes) показывает почти идеальную точность при высокой уверенности, что указывает на отличную производительность модели в условиях строгих порогов. Кривая плавно возрастает и стабилизируется ближе к 1 при уверенности около 0,98, демонстрируя высокую надежность детекции объектов. Общая кривая F1-Confidence для всех классов (all classes) показывает пиковую F1-оценку около 0,90 при уверенности 0,446, после чего значение постепенно убывает, отражая баланс между точностью и восстановлением при изменении порога уверенности.

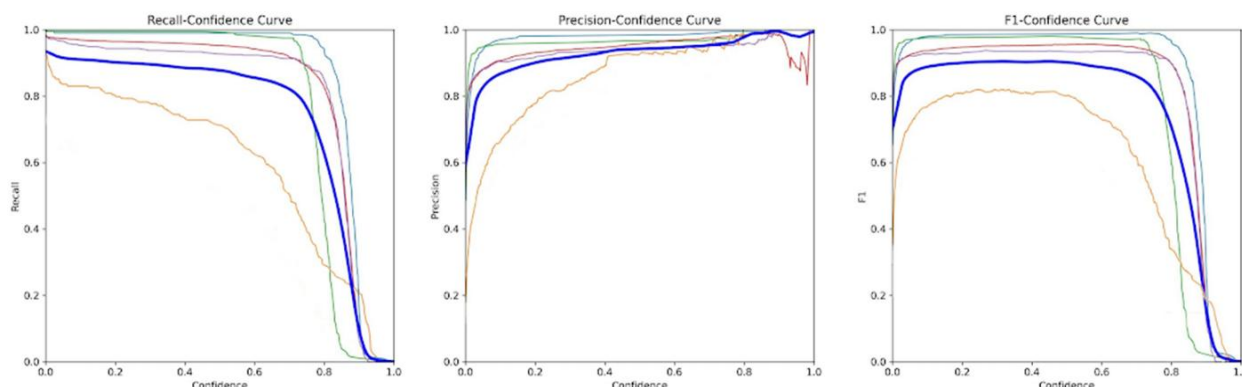


Рис. 6. Графики кривых Recall-Confidence (слева), Precision-Confidence (в центре) и F1-Confidence (справа). На левом графике По оси X на всех графиках отложена уверенность (Confidence) от 0 до 1, а по оси Y на левом графике – восстановление (Recall), также в диапазоне от 0 до 1, на центральном графике – точность (Precision), также в диапазоне от 0 до 1, на правом графике – F1-оценка, варьирующаяся от 0 до 1. На графике показаны отдельные кривые для различных классов объектов: щит (backboard) – оранжевая линия, игрок (player) – зеленая линия, мяч (ball) – розовая линия, судья (referee) – голубая линия и корзина (basket) – синяя линия. Также отображена общая кривая для всех классов (all classes), обозначенная тёмно-синей линией

Fig. 6. Graphs of Recall-Confidence curves (left), Precision-Confidence (center) and F1-Confidence (right). On the left graph, Confidence is set from 0 to 1 on the X – axis on all graphs, and on the Y – axis on the left graph, Recall is set, also in the range from 0 to 1, on the central graph, Precision is set, also in the range from 0 to 1, on the right graph – F1-score, ranging from 0 to 1. The graph shows separate curves for different classes of objects: The backboard is the orange line, the player is the green line, the ball is the pink line, the referee is the blue line and the basket is the blue line. The general curve for all classes is also displayed, indicated by a dark blue line

На рис. 7 представлен пример работы модели детектирования на тестовом видео.

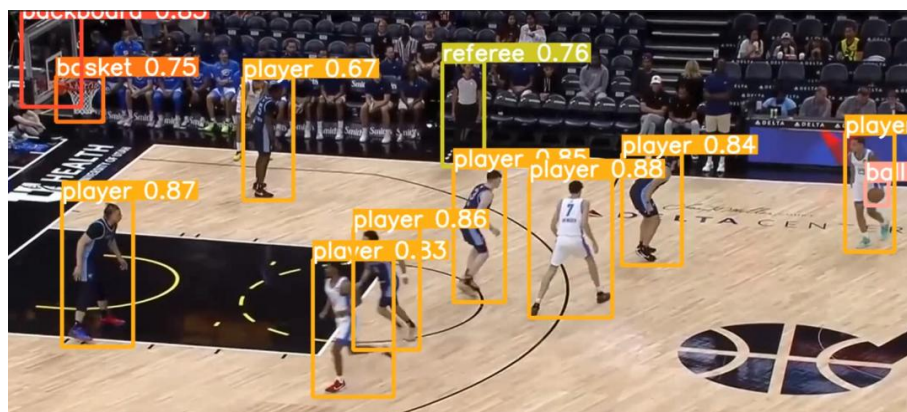


Рис. 7. Пример работы модуля обнаружения игровых объектов
Fig. 7. An example of the operation of the game object detection module

Испытания по оценке точности проводились на тестовом стенде по 10 опорным точкам. Результаты тестирования представлены в табл. 1.

Из результатов, приведенных в табл. 1, видно, что среднее расхождение координат опорных точек примерно равно 4 см, а среднеквадратичное отклонение не превышает 8 см. Данные испытаний показывают – реализованный вычислительный метод предоставляет достаточную точность для использования его при восстановлении пространственных координат игровых объектов во время проведения баскетбольных матчей.

Также реализованный метод расчета пространственного положения сильно зависит от настройки оборудования и элементов внешнего ориентирования.

Таблица 1
Table 1

Результаты оценки точности вычислительного метода
The results of evaluating the accuracy of the computational method

Критерии оценки точности	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
Среднее расхождение	0.04	0.06	0.03
Среднеквадратичное отклонение	0.05	0.08	0.04

Заключение

Исследование, посвященное разработке системы автоматической фиксации положения игровых объектов на баскетбольной площадке с использованием ограниченного числа непрофессиональных камер, демонстрирует значительный потенциал для применения в спортивной аналитике и судействе. Авторами была успешно реализована методика, включающая создание специализированного датасета, обучение модели компьютерного зрения на основе YOLOv8 и применение метода прямой фотограмметрической засечки. Основным результатом стало достижение средней точности определения пространственных координат объектов на уровне 4 см, что подтверждает пригодность предложенного подхода для использования в баскетбольных матчах местного уровня. Среднеквадратичное отклонение координат не превышало 8 см, что свидетельствует о стабильности метода при работе с непрофессиональным оборудованием.

В ходе эксперимента была протестирована система на баскетбольной площадке размером 23 x 11 м с использованием двух камер смартфонов, размещенных в противоположных углах поля. Тестирование проводилось на 10 контрольных точках, охватывающих ключевые зоны площадки, такие как штрафная линия и трехочковая зона. Модель YOLOv8 показала высокую производительность в задачах детектирования игровых объектов (игроки, мяч, судьи, кольцо, щит), с метриками точности и восстановления на уровне 0,85–0,95 и средней точностью (mAP) в диапазоне 0,70–0,85. Эти показатели подчеркивают эффективность одноэтапного подхода к детекции в условиях реального времени.

При дальнейших исследованиях можно повысить точность результатов с помощью уточнения положения камер в пространстве путем решения обратной фотограмметрической засечки [Симинеев, Тарасова, 2012]. В качестве опорных точек можно использовать линии разметки и полностью автоматизировать процесс калибровки оборудования. В дальнейших исследованиях планируется развитие методики обнаружения и описания пространственно-временных событий в видеопотоке. Эта технология позволит автоматически идентифицировать происходящие события, определять вовлеченные объекты, фиксировать их положение и взаимодействие, а также строить выводы на основе экспертных правил и механизмов рассуждений. Подобную систему можно в дальнейшем использовать для разработки интеллектуальных инструментов поддержки принятия решений судьями, повышая объективность и качество оценки игровой ситуации в реальном времени или оценки взаимодействия участников сервисов [Ульев и др., 2023]. В заключение, разработанная система представляет собой экономичное и доступное решение для локальных спортивных мероприятий, способное поддерживать судейские бригады в принятии объективных решений. Полученные результаты подтверждают возможность использования непрофессиональных камер для задач спортивной аналитики, а предложенные улучшения открывают перспективы для создания универсальных систем трекинга, применимых в широком спектре спортивных дисциплин.

Список источников

1. Гордиенко, А.С. Дистанционное зондирование и фотограмметрия. Теория стереопары снимков. Основы пространственной фототриангуляции: учеб.-метод. пособие / А.С. Гордиенко. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – 88 с.
2. Дэвис, Р. Компьютерное зрение: современные методы и перспективы развития / Р. Дэвис, М. Терк; пер. с англ. В. Яценков. – Москва: ДМК Пресс, 2022. – 690 с.
3. CVAT // CVAT: официальный сайт. – URL: <https://www.cvat.ai/> (дата обращения: 15.05.2025).
4. Official Basketball Rules 2022: Basketball Rules & Basketball Equipment: as approved by FIBA Central Board on 28.04.2023: valid as of 01.07.2023. – Mies: FIBA, 2023. – 104 p.
5. Roboflow // Roboflow: официальный сайт. – URL: <https://roboflow.com/> (дата обращения: 15.05.2025).
6. Second Spectrum // Second Spectrum: официальный сайт. – URL: <https://www.secondspectrum.com/> (дата обращения: 15.05.2025).
7. SportsMOT // Github: [источник набора данных]. – URL: <https://github.com/MCG-NJU/SportsMOT> (дата обращения: 30.04.2025).
8. STATS SportVU // STATS Perform: официальный сайт. – URL: <https://www.statsperform.com/> (дата обращения: 15.05.2025).
9. 300+ high-resolution professional basketball images with multiple annotations // Kaggle: [источник набора данных]. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/gabrielvanzanddycke/deepsport-dataset> (дата обращения: 06.05.2025).

Список литературы

- Безменов В.М., Сафин К.И. 2020. Оценка точности прямой фотограмметрической засечки для произвольного случая съёмки разными камерами. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 64(4): 415–422. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-4-415-422
- Боровик И.Г., Шорох Д.К. 2016. Обнаружение и ведение движущихся объектов на примере спортивного мероприятия. *Молодой ученый*, 6: 75–83. URL: <https://moluch.ru/archive/110/26905/> (дата обращения: 22.04.2025).
- Волкова М.А., Романов М.П., Бычков А.М. 2022. Трекер объектов на спортивных мероприятиях. *Российский технологический журнал*, 10(5): 38–48. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48
- Симинеев А.А., Тарасова Е.И. 2012. Обратная фотограмметрическая засечка: надежность решения задачи. *Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География*, Вып. 4: 129–134.
- Ульев А.Д., Донская А.Р., Зубков А.В. 2023. Автоматизированное распознавание и контроль взаимодействия людей по видеоизображению. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*, 13(2): 45–64. DOI: 10.21869/2223-1536-2023-13-2-45-64
- Buldu J.M., Busquets J., Echegoyen I. 2019. Defining a historic football team: Using Network Science to analyze Guardiola's FC Barcelona. *Scientific Reports*, 9(1). Article ID 13602. DOI: 10.1038/s41598-019-49969-2
- Chen L., et al. 2021. A real-time photogrammetric system for acquisition and monitoring of three-dimensional human body kinematics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 87(5): 363–373. DOI: 10.14358/PERS.87.5.363
- Chibunichev A.G., et al. 2016. Investigation of phototriangulation accuracy with using of various techniques laboratory and field calibration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 41: 1227–1233. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-1227-2016.
- Egi Y. 2022. Basketball self training shooting posture recognition and trajectory estimation using computer vision and Kalman filter. *Journal of Electrical Engineering*. 73(1): 19–27. DOI: 10.2478/jee-2022-0003.
- Ferraz A., Duarte-Mendes P., Sarmento H., et al. 2023. Tracking devices and physical performance analysis in team sports. *Frontiers in Sports and Active Living*. Vol. 5: 123–145. DOI: 10.3389/fspor.2023.1067969.
- Gruen A. 2021. Everything moves: The rapid changes in photogrammetry and remote sensing. *Geo-spatial Information Science*. 24(1): 33–49. DOI: 10.1080/10095020.2020.1859359.
- Kundegorski M.E., Breckon T.P. 2014. A photogrammetric approach for real-time 3D localization and tracking of pedestrians in monocular infrared imagery. *Optics and Photonics for Counterterrorism*,

- Crime Fighting, and Defence X; and Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XI. SPIE. Vol. 9253: 139–154. – DOI: 10.1117/12.2067217.
- Magre Colorado L.A., Martínez Santos J.C. 2015. Kinematic parameter estimation using close range photogrammetry for sport applications. 11th International Symposium on Medical Information Processing and Analysis. Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Vol. 9681. DOI: 10.1117/12.2208354.
- Monier E., Wilhelm P., Rückert U. 2009. A computer vision based tracking system for indoor team sports. The Fourth International Conference on Intelligent Computing and Information Systems. 5 p.
- Rahimian P., Toka L. 2022. Optical tracking in team sports: A survey on player and ball tracking methods in soccer and other team sports. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*. 18(1): 35–57. DOI:10.1515/jqas-2020-0088.
- Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. 2016. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Las Vegas, 27–30 June 2016). New York: IEEE, pp. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- Ross G., Donahue J., Darrel T., Malik J. 2014. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Washington, 23–28 June 2014). Washington: IEEE Computer Society, pp. 580–587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81.
- Shankara V. et al. 2024. Object detection and tracking for football data analytics. Proceedings of the 2024 International Conference on Sports Analytics. 10 p. DOI: 10.4108/eai.23-11-2023.2343216.
- Thomas G., Gade R., Moeslund T.B., Carr P., Hilton A. 2017. Computer vision for sports: Current applications and research topics. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol. 159: 3–18. DOI: 10.1016/j.cviu.2017.04.011.
- Vidal-Codina F. et al. 2022. Automatic event detection in football using tracking data. *Sports Engineering*. 25(1): 1–15. DOI: 10.1007/s12283-022-00381-6.
- Yacoub R., Axman D. 2020. Probabilistic Extension of Precision, Recall, and F1 Score for More Thorough Evaluation of Classification Models. Proceedings of the First Workshop on Evaluation and Comparison of NLP Systems. Online: Association for Computational Linguistics. 79–91. DOI: 10.18653/v1/2020.eval4nlp-1.9.
- Ye M. 2024. Application of 3D recognition algorithm based on spatio-temporal graph convolutional network in basketball pose estimation. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. Vol. 15: 9. DOI: 10.1051/smdo/2024004.
- Zheng Y., Zhang H. 2022. Video Analysis in Sports by Lightweight Object Detection Network under the Background of Sports Industry Development. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022(1). Article ID 3844770. DOI: 10.1155/2022/3844770.

References

- Bezmenov V.M., Safin K.I. 2020. The accuracy estimation of photogrammetric spatial intersection with different cameras for an arbitrary case of aerial survey. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'yemka [News of universities. Geodesy and aerial photography]*, 64(4): 415–422. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-4-415-422.
- Borovik I.G., Shorokh D.K. 2016. Obnaruzhenie i vedenie dvizhushchikhsya ob'ektov na primere sportivnogo meropriyatiya [Detection and tracking of moving objects using the example of a sports event]. *Molodoy uchenyy [Young scientist]*, 6: 75–83. URL: <https://moluch.ru/archive/110/26905/> (accessed: 22.04.2025).
- Volkova M.A., Romanov M.P., Bychkov A.M. 2022. 3D object tracker for sports events. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal [Russian Technological Journal]*, 10(5): 38–48. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48.
- Simineev A.A., Tarasova E.I. 2012. Obratnaya fotogrammetricheskaya zasechka: nadezhnost' resheniya zadachi [Inverse photogrammetric resection: reliability of the solution]. *Vestnik SPbGU. Seriya 7. Geologiya. Geografiya [Bulletin of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography]*, Issue 4: 129–134.
- Ulyev A.D., Donskaia A.R., Zubkov A.V. 2023. Automated Recognition and Control of Human Interaction by Video Image. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie [News of the South-West State University. Series: Management, computing, informatics. Medical instrumentation]*, 13(2): 45–64. DOI: 10.21869/2223-1536-2023-13-2-45-64.



- Buldu J.M., Busquets J., Echegoyen I. 2019. Defining a historic football team: Using Network Science to analyze Guardiola's FC Barcelona. *Scientific Reports*, 9(1). Article ID 13602. DOI: 10.1038/s41598-019-49969-2.
- Chen L., et al. 2021. A real-time photogrammetric system for acquisition and monitoring of three-dimensional human body kinematics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 87(5): 363–373. DOI: 10.14358/PERS.87.5.363.
- Chibunichev A.G., et al. 2016. Investigation of phototriangulation accuracy with using of various techniques laboratory and field calibration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 41: 1227–1233. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-1227-2016.
- Egi Y. 2022. Basketball self training shooting posture recognition and trajectory estimation using computer vision and Kalman filter. *Journal of Electrical Engineering*, 73(1): 19–27. DOI: 10.2478/jee-2022-0003.
- Ferraz A., Duarte-Mendes P., Sarmento H., et al. 2023. Tracking devices and physical performance analysis in team sports. *Frontiers in Sports and Active Living*, Vol. 5: 123–145. DOI: 10.3389/fspor.2023.1067969.
- Gruen A. 2021. Everything moves: The rapid changes in photogrammetry and remote sensing. *Geo-spatial Information Science*, 24(1): 33–49. DOI: 10.1080/10095020.2020.1859359.
- Kundegorski M.E., Breckon T.P. 2014. A photogrammetric approach for real-time 3D localization and tracking of pedestrians in monocular infrared imagery. Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence X; and Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XI. SPIE. Vol. 9253: 139–154. – DOI: 10.1117/12.2067217.
- Magre Colorado L.A., Martínez Santos J.C. 2015. Kinematic parameter estimation using close range photogrammetry for sport applications. 11th International Symposium on Medical Information Processing and Analysis. Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Vol. 9681. DOI: 10.1117/12.2208354.
- Monier E., Wilhelm P., Rückert U. 2009. A computer vision based tracking system for indoor team sports. The Fourth International Conference on Intelligent Computing and Information Systems. 5 p.
- Rahimian P., Toka L. 2022. Optical tracking in team sports: A survey on player and ball tracking methods in soccer and other team sports. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 18(1): 35–57. DOI:10.1515/jqas-2020-0088.
- Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. 2016. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Las Vegas, 27–30 June 2016). New York: IEEE, pp. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- Ross G., Donahue J., Darrel T., Malik J. 2014. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Washington, 23–28 June 2014). Washington: IEEE Computer Society, pp. 580–587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81.
- Shankara V. et al. 2024. Object detection and tracking for football data analytics. Proceedings of the 2024 International Conference on Sports Analytics. 10 p. DOI: 10.4108/eai.23-11-2023.2343216.
- Thomas G., Gade R., Moeslund T.B., Carr P., Hilton A. 2017. Computer vision for sports: Current applications and research topics. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 159: 3–18. DOI: 10.1016/j.cviu.2017.04.011.
- Vidal-Codina F. et al. 2022. Automatic event detection in football using tracking data. *Sports Engineering*, 25(1): 1–15. DOI: 10.1007/s12283-022-00381-6.
- Yacoub R., Axman D. 2020. Probabilistic Extension of Precision, Recall, and F1 Score for More Thorough Evaluation of Classification Models. Proceedings of the First Workshop on Evaluation and Comparison of NLP Systems. Online: Association for Computational Linguistics. 79–91. DOI: 10.18653/v1/2020.eval4nlp-1.9.
- Ye M. 2024. Application of 3D recognition algorithm based on spatio-temporal graph convolutional network in basketball pose estimation. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 15: 9. DOI: 10.1051/smdo/2024004.
- Zheng Y., Zhang H. 2022. Video Analysis in Sports by Lightweight Object Detection Network under the Background of Sports Industry Development. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1). Article ID 3844770. DOI: 10.1155/2022/3844770.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 28.05.2025
Поступила после рецензирования 01.08.2025
Принята к публикации 08.08.2025

Received May 28, 2025
Revised August 01, 2025
Accepted August 08, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Болгов Дмитрий Александрович, магистрант направления «Программная инженерия», профиль «Машинное обучение и интеллектуальный анализ данных», программист кафедры «Программное обеспечение автоматизированных систем», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия.

Деменков Дмитрий Владимирович, магистрант направления «Программная инженерия», профиль «Машинное обучение и интеллектуальный анализ данных», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия.

Донская Анастасия Романовна, старший преподаватель кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет; старший преподаватель кафедры клинической инженерии и технологий искусственного интеллекта, Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Волгоград, Россия.

Орлова Юлия Александровна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет; профессор кафедры клинической инженерии и технологий искусственного интеллекта, Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Волгоград, Россия.

Зубков Александр Владимирович, кандидат технических наук, начальник управления информационного развития, Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России; доцент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy A. Bolgov, Master's Student in Software Engineering, "Machine Learning and Data Mining" Profile, Programmer of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.

Dmitriy V. Demenkov, Master's Student in Software Engineering, "Machine Learning and Data Mining" Profile, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.

Anastasia R. Donskaia, Senior Lecturer of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University; Senior lecturer of the Department of Clinical Engineering and Artificial Intelligence Technologies, Volgograd State Medical University of Public Health Ministry of the Russian Federation, Volgograd, Russia

Yulia A. Orlova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University; Professor of the Department of Clinical Engineering and Artificial Intelligence Technologies, Volgograd State Medical University of Public Health Ministry of the Russian Federation, Volgograd, Russia

Alexandr V. Zubkov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Information Development Department, Volgograd State Medical University of Public Health Ministry of the Russian Federation; Associate Professor at the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.



УДК 621.398
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-726-734
EDN XWNPJT

Применение методов представления данных образами-остатками при передаче и обработке информации в современных телекоммуникационных системах

¹Ширяев А.А., ²Олейник И.И., ²Сидоренко И.А., ²Урсол Д.В.

¹МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),
пр-т Вернадского, д. 78, стр. 4, Москва, 119454, Россия

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия
a.shyriaev@mail.ru, oleinik_i@bsuedu.ru, sidorenko@bsuedu.ru, ursol@bsuedu.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке методов нетрадиционного представления данных образами-остатками и построению единой технологии, объединяющей в непротиворечивую систему процессы представления, передачи и обработки информации в современных телекоммуникационных системах. Ранее они развивались обособленно друг от друга, однако рост числа противоречий, который связан как с усложнением техники, так и с расширением круга решаемых при её использовании задач, приводит к необходимости поиска новых резервов, обеспечивающих возможность их разрешения. Такую возможность предоставляет разработанная конструктивная теория измерений и передачи полученной информации. Её основу составляет математическая теория конечных полей, адаптированная к решению прикладных задач представления, передачи и обработки данных, принятых в условиях помех. Методологической основой данного подхода выступает конструктивная теорема об остатках, ключевыми преимуществами которой являются: существенное расширение области практического применения, снижение вычислительной сложности обработки значительных объемов данных, а также повышение устойчивости решений для некорректно поставленных задач.

Ключевые слова: расширение возможностей классической теории конечных полей, данные и погрешности измерений, искажения информации при её передаче, обработка данных, система остаточных классов, регуляризация некорректных задач

Для цитирования: Ширяев А.А., Олейник И.И., Сидоренко И.А., Урсол Д.В. 2025. Применение методов представления данных образами-остатками при передаче и обработке информации в современных телекоммуникационных системах. *Экономика. Информатика*, 52 (3): 726–734. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-726-734. EDN XWNPJT

Application of Data Representation Methods Using Residue Images for Transmitting and Processing Information in Modern Telecommunication Systems

¹Alexey A. Shyriaev, ²Ivan I. Oleinik, ²Igor A. Sidorenko, ²Denis V. Ursol

¹MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
building 4, 78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russia

²Belgorod State National Research University
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
a.shyriaev@mail.ru, oleinik_i@bsuedu.ru, sidorenko@bsuedu.ru, ursol@bsuedu.ru

Abstract. The article is devoted to the development of methods for non-traditional data representation using residue images and the construction of a unified technology that combines the processes of data representation,

© Ширяев А.А., Олейник И.И., Сидоренко И.А., Урсол Д.В., 2025

transmission, and processing in modern telecommunication systems into a consistent system. Previously, these processes were developed independently of each other, but the growing number of contradictions, which is associated with both the complexity of technology and the expansion of the range of tasks that can be solved using it, necessitates the search for new resources that can be used to resolve these issues. This is where the developed constructive theory of measurement and information transmission comes in. It is based on the mathematical theory of finite fields, which is adapted to solving applied problems of data representation, transmission, and processing in the presence of interference. The methodological basis of this approach is the constructive remainder theorem, which has the following key advantages: a significant expansion of the practical application area.

Keywords: expansion of the classical theory of finite fields, data and measurement errors, information distortion during transmission, data processing, residual class system, and regularization of ill-posed problems

For citation: Shiryayev A.A., Oleinik I.I., Sidorenko I.A., Ursol D.V. 2025. Application of Data Representation Methods Using Residue Images for Transmitting and Processing Information in Modern Telecommunication Systems. *Economics. Information technologies*. 52 (3): 726–734 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-726-734. EDN XWNPJT

Введение

В современных условиях быстро развивающихся информационных технологий мониторинга технического состояния сложных технических комплексов и безопасности их функционирования особую актуальность приобретает разработка новых методов измерений, передачи и обработки получаемых экспериментальных данных. Появляется комплекс проблем, касающихся различных информационных процессов и повышения их эффективности.

Для их разрешения недостаточно хорошо развитого воображения и сложившегося представления. Необходимо, как свидетельствует история науки, привлечение математического аппарата для упрощения поиска наиболее подходящих решений. Основу мониторинга составляют системы измерений, сбора и обработки данных. При этом значительная роль в повышении точностных характеристик измерений отводится алгоритмическим методам.

В настоящее время они разработаны и находят расширенное применение при измерениях и передаче измерительной информации с использованием нетрадиционного представления данных образами-остатками и замещающими их проблемно-ориентированными структурно-алгоритмическими преобразованиями [Булычев, Васильев, Кукушкин, 2016].

Однако при этом недостаточно были рассмотрены вопросы обработки и анализа экспериментальных данных. В современных условиях актуальность, научный и практический интерес представляют методы прикладной теории конечных полей. [Волков, 1982].

Быстро растут объёмы данных измерений, поэтому появляется настоятельная необходимость и в реконструкции системы их обработки. Известные алгоритмические направления повышения быстродействия вычислений ЭВМ связаны с нетрадиционным представлением данных в системе остаточных классов (СОК).

Однако это многообещающее направление исследований не вышло за пределы теоретических исследований. Основное препятствие, которое так и не удалось преодолеть, было связано с алгоритмами обратного перехода от результатов вычислений с использованием образов-остатков к исходному, традиционно используемому представлению данных. Для этой цели предлагалось использование алгоритмов китайской теоремы об остатках и усовершенствованного его варианта, известного, как теорема Х.Л. Гарнера [Кнут, 1977].

Данные алгоритмы отличались повышенной сложностью вычислений, поэтому то время, которое было сэкономлено при вычислениях с использованием остатков, необходимо было истратить на заключительную процедуру перехода к исходному представлению данных.



Поэтому основная проблема обработки, как и передачи данных с использованием образов-остатков, заключалась в необходимости разработки усовершенствованных алгоритмов обратного восстановления результатов вычислений в СОК.

Была доказана конструктивная теорема об остатках (КтТО) и разработана новая технология восстановления данных в их исходном виде. Наиболее простой она стала при минимальной наполненности СОК, когда данные, сигналы и сообщения представляют двумя образами-остатками.

В этом случае появляется необходимость синтеза безызбыточных помехоустойчивых кодов и новых сигнально-кодовых конструкций (СиКК), острая необходимость в которых появлялась при разработке современных телекоммуникационных систем [Кукушкин, 1997].

В рамках такого исследования закономерно формулируется фундаментальная проблема создания современных измерительных технологий: необходимо ли преобразовывать полученные данные к их первоначальному формату, использовавшемуся в процессе измерений, или же целесообразно осуществлять обработку непосредственно в области образов?

В настоящей статье предлагается четкое решение этой дилеммы: в качестве метода представления передаваемой и принимаемой информации предлагается использовать данные в их образной форме в системе остаточных классов с последующим применением на этапе восстановления данных КтТО.

Важнейшим достоинством КтТО, образующей методологический фундамент современной прикладной теории конечных полей, является возможность обработки остатков ($b_i \in Q$) от деления чисел на модули сравнения, возникающее как следствие модификации аппарата полиномиальных вычислений, находящего широкое применение при решении разнообразных прикладных задач [Князев, Кукушкин, 2011].

Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений делится на непосредственные прямые или косвенные измерения. Характер деления условный. При прямых измерениях используются значения самого измеряемого параметра (или его величины Θ_k).

При косвенных измерениях используется только функция от некоторой выборки величин этого параметра.

Измерительные процедуры обладают дуализмом. С одной позиции, они представляют собой прямое определение значений физических параметров (таких как линейные расстояние, угловые характеристики и др.), а с другой – могут рассматриваться как величины, находящиеся в функциональной связи с измеряемым параметром. В случаях, когда исследовательская задача сводится к получению информации исключительно о целевой величине, функциональные взаимосвязи подвергаются упрощению.

Практика экспериментальных исследований показывает, что такой распространенностью обладают именно косвенные методы определения искомых параметров.

Характерной иллюстрацией косвенных измерений служат радиотехнические методы, в рамках которых определяются такие параметры, как длительность распространения радиосигнала, разность фаз между зафиксированными сигналами и другие аналогичные характеристики [Кукушкин, 2000].

В этой связи принципиальное значение приобретает анализ необходимых методов представления информации для определения искомых результатов измерений необходимых параметров в условиях помех.

Среди распространенных методов подавления помеховых воздействий следует выделить подходы, основанные на обработке измерительной информации с обеспечением оптимального приближения интерполяционного полинома к экспериментальным точкам, содержащим погрешности [Лидл, Нидеррайтер, 1988].

Важным требованием при этом является обеспечение условия, при котором максимальное отклонение значений восстанавливаемой функции $f(x)$ по модулю и значениями $P(x)$ не должно превышать величины ε , которая представляет из себя степень приближения с точностью до ε в узлах интерполяции $x_0, x_1, \dots, x_n$, когда:

$$\max_{0 \leq i \leq n} |f(x_i) - P(x_i)| \leq \varepsilon$$

На практике допускается присутствие единичных аномальных позиций: $|f(x_i) - P(x_i)| \geq \varepsilon$, когда выбранному критерию соответствует оценка проведённых экспериментов с использованием наименьших квадратов:

$$\sigma = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - P(x_i)]^2,$$

заключающаяся в том, чтобы подобрать коэффициенты $P(x)$, минимизирующие σ .

Пример:

Найти многочлены $P_1(x) = a_0 + a_1 x$, $P_2(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$, приближающие наилучшим образом в среднем функцию, заданную в соответствии со значениями измерений (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Результаты с ошибками измерений
Results with measurement errors

x	0	1	2	3	4	5	6	7
y	1,4	1,3	1,4	1,1	1,3	1,8	1,6	2,3

При $P_1(x) = a_0 + a_1 x$, выражение для σ будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma = \sum_{i=0}^7 [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2.$$

Таким образом, проблема сглаживания (фильтрации) экспериментальных данных заключается в поиске таких коэффициентов a_0 и a_1 , при значениях которых σ минимальна.

Такое условие минимизации σ достигается уравниванием с нулем частных производных: $d\sigma/da_0$ и $d\sigma/da_1$

$$-0,5 d\sigma / da_0 = \sum_{i=0}^7 [y_i - (a_0 + a_1 x_i)] = 0,$$

$$-0,5 d\sigma / da_1 = \sum_{i=0}^7 [y_i - (a_0 + a_1 x_i)] x_i = 0.$$

После упрощения получим следующую систему линейных уравнений:

$$8a_0 + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i = \sum_{i=0}^7 y_i,$$

$$a_0 \sum_{i=0}^7 x_i + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i^2 = \sum_{i=0}^7 x_i y_i.$$

Таблица 2
Table 2

Результаты вычислений
Calculation results

x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2	$x_i^2 y_i$	x_i^3	x_i^4
0	1,4	0	0	0	0	0
1	1,3	1,3	1	1,3	1	1
2	1,4	2,8	4	5,6	8	16
3	1,1	3,3	9	9,9	27	81
4	1,3	5,2	16	20,8	64	256
5	1,8	9,0	25	45,0	125	625
6	1,6	9,6	36	57,6	216	1296
7	2,3	16,1	49	112,7	343	2401
$\Sigma 28$	12,2	47,3	140	252,9	784	4676

Получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} 8a_0 + 28a_1 &= 12,2, \\ 28a_0 + 140a_1 &= 47,3, \end{aligned}$$

решение которой приводит к данным результатам:

$$\begin{aligned} \det A &= \begin{vmatrix} 8 & 28 \\ 28 & 140 \end{vmatrix} = 336; \\ \det A_0 &= \begin{vmatrix} 12,2 & 28 \\ 47,3 & 140 \end{vmatrix} = 383,6; \\ \det A_1 &= \begin{vmatrix} 8 & 12,2 \\ 28 & 47,3 \end{vmatrix} = 36,8. \end{aligned}$$

В результате вычислений получаем: $a_0 = 383,6/336 = 1,142$; $a_1 = 36,8/336 = 0,110$.

**Сглаживание данных, полученных экспериментальным путем
на основе теории конечных полей и конструктивной теоремы об остатках**

Системы уравнений, при использовании модулей сравнений $m_1 = 19$ и $m_2 = 20$ приводятся к виду:

$$\begin{aligned} 8a_0 + 9a_1 &= 12,2 \pmod{19}; \\ 9a_0 + 7a_1 &= 9,3 \pmod{19}; \\ 8a_0 + 8a_1 &= 12,2 \pmod{20}; \\ 8a_0 + 9a_1 &= 7,3 \pmod{20}; \\ \det A_{(19)} &= \begin{vmatrix} 8 & 9 \\ 9 & 7 \end{vmatrix} = -25 \equiv -6 \pmod{19}; \end{aligned}$$

$$\det A_{0(19)} = \begin{vmatrix} 12,2 & 9 \\ 9,3 & 7 \end{vmatrix} = 1,7 \pmod{19};$$

$$\det A_{1(19)} = \begin{vmatrix} 8 & 12,2 \\ 9 & 9,3 \end{vmatrix} = -35,4 \equiv -16,4 \pmod{19};$$

$$\det A_{(20)} = \begin{vmatrix} 8 & 8 \\ 8 & 0 \end{vmatrix} = -64 \equiv -4 \pmod{20};$$

$$\det A_{0(20)} = \begin{vmatrix} 12,2 & 8 \\ 7,3 & 0 \end{vmatrix} = -58,4 \equiv -18,4 \pmod{20};$$

$$\det A_{1(20)} = \begin{vmatrix} 8 & 12,2 \\ 8 & 7,3 \end{vmatrix} = -39,2 \equiv -19,2 \pmod{20}.$$

Алгоритм восстановления с применением КтТО.

1. Для первой системы сравнений:

$$\det A_{(19)} \equiv -6 \pmod{19};$$

$$\det A_{(20)} \equiv -4 \pmod{20};$$

$$\text{получим: } n_{12} = 1; \Delta_{12} = -6 - (-4) = -2;$$

$$\det A_{(3\ 80)} = m_1(m_2 + \Delta_{12}) + b_1 = m_2(m_1 + \Delta_{12}) + b_2 = 19 \times 18 - 6 = 20 \times 17 - 4 = 336.$$

2. При решении второй системы:

$$\det A_{0(19)} \equiv 1,7 \pmod{19};$$

$$\det A_{0(20)} \equiv -18,4 \pmod{20};$$

$$\text{получаем результат: } n_{12} = 1; \Delta_{12} = 1,7 - (-18,4) = 20,1;$$

$$\det A_{0(3\ 80)} = m_1 \Delta_{12} + b_1 = m_2 \Delta_{12} + b_2 = 19 \times 20,1 + 1,7 = 20 \times 20,1 - 18,4 = 383,6.$$

3. При решении третьей системы:

$$\det A_{1(19)} \equiv -16,4 \pmod{19};$$

$$\det A_{1(20)} \equiv -19,2 \pmod{20};$$

$$\text{получаем результат: } n_{12} = 1; \Delta_{12} = -16,4 - (-19,2) = 2,8;$$

$$\det A_{1(3\ 80)} = m_1 \Delta_{12} + b_1 = m_2 \Delta_{12} + b_2 = 19 \times 2,8 - 16,4 = 20 \times 2,8 - 19,2 = 36,8.$$

Результаты полученных решений наглядно показывают расширенный потенциал КтТО.

В отличие от классических теорем об остатках, которые применимы исключительно для целочисленных значений, КтТО позволяет получать общее решение даже для дробных значений остатков [Ширяев, 2023]. Единственное ограничение касается выбора модулей сравнения и состоит в требовании равенства единице абсолютной величины их разности ($n_{12} = 1$).

Полином, обеспечивающий наилучшее среднеквадратическое приближение экспериментальных данных, может быть представлен в форме:

$$P_1(x) = 1,142 + 0,11x.$$

Система при $P_2(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ преобразовывается к виду:

$$8a_0 + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i + a_2 \sum_{i=0}^7 x_i^2 = \sum_{i=0}^7 y_i$$

$$a_0 \sum_{i=0}^7 x_i + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i^2 + a_2 \sum_{i=0}^7 x_i^3 = \sum_{i=0}^7 x_i y_i$$

$$a_0 \sum_{i=0}^7 x_i^2 + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i^3 + a_2 \sum_{i=0}^7 x_i^4 = \sum_{i=0}^7 x_i^2 y_i.$$

При подстановке соответствующих значений коэффициентов, взятых из таблицы, получим:

$$\begin{aligned} 8a_0 + 28a_1 + 140a_2 &= 12,2 \\ 28a_0 + 140a_1 + 784a_2 &= 47,3 \\ 140a_0 + 784a_1 + 4676a_2 &= 252,9 \end{aligned}$$

Проанализировав системы ЛУ, можно сделать вывод о том, что увеличение степени аппроксимирующего полинома влечет за собой возрастание порядка соответствующих систем сравнений, а также существенное увеличение разрядности чисел-коэффициентов, входящих в их состав [Ширяев, 24].

Очевидно, что применение КтТО существенно упрощает процедуру восстановления данных из области образов при выполнении условия минимизации параметра n_{12} , определяемого как модуль разности выбранных модулей:

$$\min \{n_{12}^{(i)}\}, n_{12} = |m_1 - m_2|,$$

$$n_{12}^{(i)} - \text{var.}$$

При рассмотрении примера оптимизации процесса восстановления класс-решений можно отметить следующее. Решение достигается с использованием стратегии выбора модулей сравнения ($m_1=17, m_2=18, m_3=19, m_4=20$) и группированием их в пары: (m_1, m_4), (m_2, m_3). С использованием указанных модулей определяем:

$$\det A_{(18)} = \begin{vmatrix} 8 & 10 & 14 \\ 8 & 14 & 10 \\ 14 & 10 & 14 \end{vmatrix} = 8 \begin{vmatrix} 4 & 5 & 7 \\ 4 & 7 & 5 \\ 7 & 5 & 7 \end{vmatrix} = 8 \begin{vmatrix} 4 & 5 & 7 \\ 0 & 2 & -2 \\ 3 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 24 \begin{vmatrix} 5 & 7 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} = -576 \equiv 0 \pmod{18}$$

В результате получены системы сравнений:

$$\begin{aligned} \det A_{(17)} &\equiv 8 \pmod{17}, \\ \det A_{(20)} &\equiv 8 \pmod{20}, \\ \det A_{(18)} &\equiv 0 \pmod{18}, \\ \det A_{(19)} &\equiv 18 \pmod{19}. \end{aligned}$$

Алгоритмы восстановления с применением КтТО:

$$\begin{aligned} 1) n_{23} &= 1; \Delta_{23} = 0 - 18 = -18; \\ \det A_{(342)} &= m_2 \Delta_{23} + b_2 = m_3 \Delta_{23} + b_3 = 18(19 - 18) + 0 = 19(18 - 18) + 18 = 18 \pmod{342}; \end{aligned}$$

$$2) n_{14} = 3; \Delta_{14} = 8 - 8 = 0;$$

$$3) \det A_{(340)} = m_1 \Delta_{14} + b_1 = m_4 \Delta_{14} + b_4 = 17 \times 0 + 8 = 20 \times 0 + 8 = 8 \pmod{340}$$

При решении система сравнений преобразовывается к следующему виду:

$$\begin{aligned} \det A_{(340)} &\equiv 8 \pmod{340}, \\ \det A_{(342)} &\equiv 18 \pmod{342}. \end{aligned}$$

Дальнейшее решение ЛУ с использованием метода Крамера приводит к решению задачи с нахождением определителя следующего вида:

$$\begin{aligned} \det A_0 &= \begin{vmatrix} 12,2 & 28 & 140 \\ 47,3 & 140 & 784 \\ 252,9 & 784 & 4676 \end{vmatrix} \cong 49 \times 16 \begin{vmatrix} 12,2 & 1 & 5 \\ 47,3 & 5 & 28 \\ 252,9 & 28 & 167 \end{vmatrix} = -784 \begin{vmatrix} 12,2 & 5 & 1 \\ 47,3 & 28 & 5 \\ 252,9 & 167 & 28 \end{vmatrix} \cong \\ &\cong 784 \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -13,7 & 3 & 5 \\ -88,7 & 27 & 28 \end{vmatrix} = -784 \begin{vmatrix} -13,7 & 3 \\ -88,7 & 27 \end{vmatrix} = -784 \times 3 \begin{vmatrix} -13,7 & 1 \\ -88,7 & 9 \end{vmatrix} = 2352 \times 24,6 = 81379,2. \end{aligned}$$

Следовательно, $a_0 = \det A_0 / \det A = 81379,2 / 56488 = 1,442$.

Аналогичным образом находятся и остальные оставшиеся коэффициенты:

$$a_1 = \det A_1 / \det A = -0,190; a_2 = \det A_2 / \det A = 0,043, \\ P_2(x) = 1,442 - 0,190x + 0,043x^2.$$

Заключение

Продemonстрировано применение современной теории конечных полей для решения задачи фильтрации (сглаживания) экспериментальных данных.

Показано, что применение современной теории конечных полей, основанной на адаптивных алгоритмах конструктивной теоремы об остатках (КтТО), позволяет достичь значительного упрощения вычислительных процедур и повышения эффективности обработки значительных массивов измерительных данных.

Список литературы

- Булычев Ю.Г., Васильев В.В., Кукушкин С.С. и др. 2016. Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний сложных технических комплексов. М.: Машиностроение, Полёт: 440.
- Волков Е.А. 1982. Численные методы. М, Наука: 256–258.
- Кнут Д. 1977. Искусство программирования для ЭВМ т. 2. Получисленные алгоритмы. М., Мир: 724.
- Князев В.В., Кукушкин С.С. 2011. Математические и методические основы использования конструктивной теоремы об остатках при обработке результатов телеизмерений. М.: *Научный Интернет-журнал: Технологии техносферной безопасности* (<http://ipb.mos.ru/ttb/2011-6/2011-6.html>), вып. 6 (40):6.
- Князев В.В., Кукушкин С.С. 2011. Применение конструктивной теоремы об остатках при решении некорректных задач обработки результатов телеизмерений. Научно-технический сборник. Известия № 248. М.: ВА РВСН им. Петра Великого: 78.
- Кукушкин С.С. 2000. Конечные поля и информатика (монография): в 2-х томах, т. 1. Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. М.: МО РФ: 260.
- Кукушкин С.С. 1997. Использование конструктивной теоремы об остатках для повышения эффективности вычислений в системах передачи и обработки телеметрической информации. Измерительная техника. М.: «Стандарты», № 4: 13.
- Лидл Р., Нидеррайтер Г. 1988. Конечные поля. В 2-х томах. Пер с англ. М.: Мир: 884.
- Ширяев А.А. 2023. Анализ методов повышения эффективности систем передачи данных в беспроводных информационных коммуникациях. Сборник статей Межвузовского международного конгресса «Высшая школа: научные исследования», Москва: 138.
- Ширяев А.А. 2024. Разработка методов обеспечения помехоустойчивости космических инфокоммуникаций на основе кодирования в системе остаточных классов. Материалы диссертации, изд-во НИУ БелГУ: 103.

References

- Bulychev Yu.G., Vasilyev V.V., Kukushkin S.S. 2016. Information and Measurement Support for Field Tests of Complex Technical Systems, Moscow: Mashinostroenie-Polet: 440 (in Russian).
- Volkov E.A. 1982. Numerical Methods. M: Nauka: 256 (in Russian).
- Knuth D. 1977. The Art of Computer Programming, Vol. 2, Semi-Numerical Algorithms, Moscow: Mir: 724 (in Russian).
- Knyazev V.V., Kukushkin S.S. 2011. Mathematical and Methodological Foundations of Using the Constructive Remainder Theorem in Processing Telemetry Results, Moscow, *Scientific Internet Journal: Technologies of Technosphere Safety* (<http://ipb.mos.ru/ttb/2011-6/2011-6.html>), Issue 6 (40): 6 (in Russian).
- Knyazev V.V., Kukushkin S.S. 2011. Application of the constructive remainder theorem in solving ill-posed problems of processing telemetry results, Scientific and Technical Collection. Izvestiya No. 248. Moscow: Peter the Great Strategic Missile Forces Academy: 78 (in Russian).



- Kukushkin S.S. 2000. Finite Fields and Computer Science (Monograph): in 2 volumes, vol. 1. Methods and Algorithms, Classical and Non-Traditional, Based on the Use of the Constructive Remainder Theorem. Moscow: Ministry of Defense of the Russian Federation: 260 (in Russian).
- Kukushkin S.S. 1997. Using the constructive remainder theorem to improve the efficiency of calculations in telemetry information transmission and processing systems. Measurement Techniques. Moscow: Standards, No. 4: 13 (in Russian).
- Lidl R., Niederreiter H. 1988. Finite Fields. In 2 volumes. Translated from English. Moscow, Mir: 884.
- Shiryaev A.A. 2023. Analysis of Methods for Improving the Efficiency of Data Transmission Systems in Wireless Information Communications. Collection of Articles from the Interuniversity International Congress «Higher Education: Scientific Research», Moscow: 138 (in Russian).
- Shiryaev A.A. 2024. Development of methods for ensuring the noise immunity of space information communications based on coding in the residual class system. Dissertation materials, Belgorod State University: 103 (in Russian).

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 01.08.2025

Поступила после рецензирования 04.09.2025

Принята к публикации 05.09.2025

Received August 01, 2025

Revised September 04, 2025

Accepted September 05, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ширяев Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических систем Института радиоэлектроники и информатики, Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва, Россия

Олейник Иван Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Сидоренко Игорь Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Урсол Денис Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Shiryaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Systems at the Institute of Radioelectronics and Computer Science, Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

Ivan I. Oleinik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Igor A. Sidorenko, Candidate of Technical Sciences, senior researcher, associate professor of the department of information and telecommunication systems and technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Denis V. Ursol, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

УДК 621.396
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-735-744
EDN YEHGIJ

Инновационные методы распараллеленной передачи и обработки измерительной информации, основанные на использовании конструктивной теории конечных полей

¹Кукушкин С.С., ²Кукушкин Л.С., ³Махов Ф.С., ³Головко М.В.

¹АО «Военно-инженерная корпорация»,
Россия, 141092, Московской обл., г. Королёв, микрорайон Юбилейный, ул. Пионерская д.1-4,
²АО «Рязанское производственно-техническое предприятие»,
Россия, 390039, г. Рязань, ул. Интернациональная 12,
³Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85,
adaptermetod@mail.ru, leofrontier@gmail.com, lfmakhov@gmail.com, golovko_m@bsuedu.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке новых методов передачи и обработки измерительной информации, что связано с необходимостью разрешения следующих противоречий. Объёмы передаваемой и получаемой измерительной информации быстро увеличиваются, что связано с растущими потребностями науки и техники. Но при этом значительно ухудшаются условия, в которых проводят измерения, погрешности измерительных приборов и систем не удовлетворяют предъявляемым требованиям, увеличивается интенсивность помехового фона. При этом возможности повышения основных показателей эффективности измерений за счёт аппаратных средств ограничены, а резервы используемых методов истощены. В этой ситуации основная надежда на повышение показателей точности и достоверности измерений оказывается связанной с обработкой полученной информации. Но, как это часто бывает, существующие методы и технологии обработки экспериментальных данных также оказываются не способными исправить полученные результаты. Поэтому появляется необходимость в разработке необычных (нетрадиционных) математических методов обработки данных измерений, чему и посвящена данная статья.

Ключевые слова: неопределённость данных измерений, искажения, вызванные действием помех, обработка данных, конструктивная теория конечных полей, система остаточных классов, регуляризация некорректных задач

Для цитирования: Кукушкин С.С., Кукушкин Л.С., Махов Ф.С., Головко М.В. 2025. Инновационные методы распараллеленной передачи и обработки измерительной информации, основанные на использовании конструктивной теории конечных полей. *Экономика. Информатика*, 52(3): 735–744. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-735-744. EDN YEHGIJ

Innovative Methods of Parallelized Transmission and Processing of Measurement Information Based on Using Constructive Finite Field Theory

¹Sergej S. Kukushkin, ²Leonid S. Kukushkin, ³Fyodor S. Makhov, ³Marina V. Golovko

¹JSC Military Engineering Corporation,
1-4 Pionerskaya St., Yubileiny microdistrict, Korolyov, Moscow region 141092, Russia
²JSC Ryazan Production and Technical Enterprise, 12 Internatsionalnaya St., Ryazan 390039, Russia
³Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
adaptermetod@mail.ru, leofrontier@gmail.com, lfmakhov@gmail.com, golovko_m@bsuedu.ru

Abstract. The article is devoted to the development of new methods for transmitting and processing measurement information, which requires that the following contradictions should be resolved. The volumes

© Кукушкин С.С., Кукушкин Л.С., Махов Ф.С., Головко М.В., 2025

of transmitted and received measurement information are rapidly increasing, which is associated with the growing needs of science and technology. Meanwhile, the conditions in which measurements are carried out are considerably worsening, the errors of measuring devices and systems do not meet the requirements, and the intensity of interference background is increasing. At the same time, the possibilities of increasing the main indicators of measurement efficiency at the expense of hardware are limited, and the reserves of used methods are exhausted. In this situation, the main hope for increase of accuracy and reliability of measurements appears to be connected with processing of the received information. But, as it often happens, the existing methods and technologies of experimental data processing are also unable to correct the obtained results. Therefore, there is a need to develop unusual (non-traditional) mathematical methods of measurement data processing, which is the subject of this article.

Keywords: measurement data uncertainty, distortions caused by interference, data processing, constructive finite field theory, residual class system, regularization of incorrect problems

For citation: Kukushkin S.S., Kukushkin L.S., Makhov F.S., Golovko M.V. 2025. Innovative Methods of Parallelized Transmission and Processing of Measurement Information Based on Using Constructive Finite Field Theory. *Economics. Information technologies*, 52 (3): 735–744 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-735-744. EDN YEHGIJ

Введение

В современных условиях особую актуальность приобретает разработка новых методов измерений, передачи и обработки получаемых экспериментальных данных. Составляющие их основу противоречия ожесточаются, повышается уровень неопределённости измерений. Для их уменьшения разрабатываются новые методы и технологии повышения помехозащищённости как самих измерений, так и передачи их результатов в центр обработки и анализа.

Ранее использовавшиеся подходы исчерпали свои резервы, а синтезу необычных (нетрадиционных) технических решений мешают ограниченные возможности существующего математического аппарата. Предлагаются разработки, которые базируются на расширении области прикладного использования математических теорий высокого абстрактного уровня. К их числу относится классическая теория конечных полей и её приложения к области кодирования передаваемых данных и вычислений, составляющих основу их обработки [Кнут, 1977]. Основное её применение к области вычислений, известное под названием «система остаточных классов (СОК)», было ограничено отсутствием быстродействующих способов обратного преобразования данных, обладающих неопределённостью [Кукушкин, 2000]. Для того, чтобы их перевести при представлении образами-остатками в исходную область представления, использовался алгоритм китайской теоремы об остатках (КиТО). Но он обладал множеством недостатков, из-за чего методы обработки информации в системе остаточных классов (СОК) не нашли ожидаемого расширенного практического применения.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран математический аппарат СОК. Наиболее известная область его применения связана с вычислениями [Торгашев, 1973]. Следующее направление прикладного его использования было связано с обеспечением помехоустойчивости передачи информации, обладающей внутренней избыточностью [Кукушкин, 2008]. Так, при передаче телеметрической информации (ТМИ) суть инновационных методов СОК заключалась в том, чтобы данные телеизмерений (ТИ) X_i , представленные ($N = 2n = 10$) - разрядным двоичным кодом, преобразовать в безызбыточный помехоустойчивый код C_i . Такая возможность, как показано на иллюстрации, приведенной на рис. 1, заключается в том, чтобы в результате сравнений по оптимально выбранным модулям $m_1 = 2^n - 1$ и $m_2 = 2^n + 1$ получить образы-остатки $b_{1i}(\text{mod } m_1)$ и $b_{2i}(\text{mod } m_2)$. При этом результат

безызбыточного помехоустойчивого кодирования $C_i = \langle b_{1i}(\bmod m_1), b_{2i}(\bmod m_2) \rangle_2$ получают в результате их формального объединения в новое закодированное сообщение. Так, например, сообщение $X_i = \langle 157 \rangle_2$, использующее для представления ($N = 2n = 10$) - разрядное кодовое слово при делении на оптимальные модули сравнения $m_1 = 2^5 - 1 = 31$ и $m_2 = 2^5 + 1 = 33$ даст остатки $b_1(\bmod m_1) = 2$ и $b_2(\bmod m_2) = 25$. Значение каждого из них может быть представлено 5-разрядным двоичным кодом ($n = 5$). После их формального объединения в новое кодовое слово, например, $C_i = \langle 2; 25 \rangle_2 = \langle 00010, 11001 \rangle_2$ получим при традиционном прочтении, учитывая позиционную его структуру, следующий результат безызбыточного кодирования: $C_i = \langle 00010, 11001 \rangle_2 = \langle 89 \rangle_{10}$. При этом, если следующее значение будет на «1» больше: $X_i = \langle 90 \rangle_{10}$, то результат соответствующего дополнительного безызбыточного кодирования: $C_{i+1} = \langle 00011, 11010 \rangle_2 = \langle 123 \rangle_{10}$ увеличится на значение минимального кодового расстояния $d_{\min} = \langle 1, 00001 \rangle_2 = \langle 33 \rangle_{10}$, представленного в метрике Евклида.

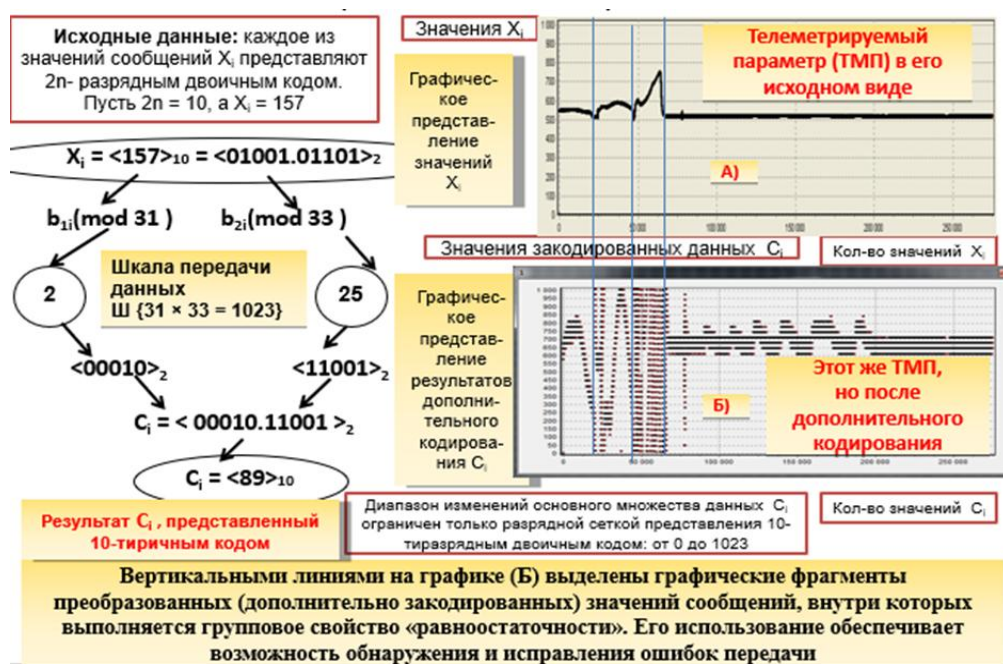


Рис. 1. Модель проблемно-ориентированного дополнительного безызбыточного помехоустойчивого кодирования передаваемой информации с использованием системы остаточных классов
Fig. 1. Model of problem-oriented additional non-redundant noise-resistant coding of transmitted information using the residual class system

При этом на приёмной стороне для восстановления предлагается использовать два декодера передаваемых сообщений, условно называемые «жесткий» и «мягкий». Основу первого из них составлял алгоритм конструктивной теоремы об остатках (КтТО). Под его управлением работал «мягкий» декодер, предназначенный для обнаружения и исправления ошибок передачи ТМИ.

Проблемы, связанные с обработкой ТМИ, также потребовали совершенствования классической теории конечных полей Э. Галуа. Этому разделу разработки инновационных методов и технологий посвящены монографии [Кукушкин, 2008]. Их основная направленность заключалась в том, чтобы расширить возможности прикладного использования теории конечных полей. Одна из проблем заключалась в расширении областей числового представления данных [Roy, 1959]. Например, при кодировании информации значения сообщений должны быть представлены целыми числами: $x_i \in \mathbb{Z}$, в то время, как обработка данных ТМИ основывается на использовании рациональных чисел: $x_i \in \mathbb{Q}$. А в современных системах инфотелекоммуникации передача информации и её обработки представляют собой единое целое. Классическая теория конечных полей Э. Галуа также

предполагает, $x_i \in \mathbb{Z}$. Поэтому и основное её применение было связано с помехоустойчивым кодированием информации. Это ограничение связано с известной процедурой обратного восстановления данных в их исходном представлении.

Известный алгоритм китайской теоремы об остатках (КиТО) требует подбора дополнительных значений в виде мультипликативно-обратных величин m_i' , удовлетворяющих условию: $m_i \times m_i' \equiv 1 \pmod{m_j}$. Рассмотрим случай использования двух модулей сравнения m_1 и m_2 . В этом случае алгоритм китайской теоремы об остатках (КиТО) представляют в виде следующей формулы [Кнут, 1977]:

$$x_i = (m_1 \times m_1')b_{2i} + (m_2 \times m_2')b_{1i} \pmod{(m_1 \times m_2)}, \quad (1)$$

где b_{1i} и b_{2i} – образы-остатки, полученные в результате сравнений по модулям m_1 и m_2 , соответственно; m_1' и m_2' – мультипликативные элементы конечного поля, определяемые на основе следующих сравнений: $m_1 \times m_1' \equiv 1 \pmod{m_2}$ и $m_2 \times m_2' \equiv 1 \pmod{m_1}$.

Алгоритм КиТО сложен в вычислительном отношении. Об этом недостатке говорят, как об основной причине, ограничивающей возможности оперативного восстановления данных, представленных в СОК. Так, например, в [Романец, 1999] на с. 311 отмечено, что «китайская теорема об остатках является мощным криптографическим инструментом». Однако её прикладное применение ограничено, помимо сложности реализации, и другими недостатками [Wilkinson, 2005]. Она включает в себя сложные для определения и вычислений мультипликативные операции, предполагающие умножение значений образов-остатков на коэффициенты, представляющие собой большие числа. Так, при байтовом представлении исходных данных оптимальные модули сравнения равны: $m_1 = 15$, $m_2 = 17$, а мультипликативно-обратные элементы m_1' и m_2' находятся методом подбора подходящих значений. Для рассматриваемого случая $m_1' = m_2' = 8$. Тогда алгоритм (1) применительно к байтовым сообщениям будет иметь следующий вид:

$$X_i = 120b_{2i} + 136b_{1i} \pmod{15 \times 17 = 255}. \quad (2)$$

Но если для передачи использованы $(N = 2n = 10)$ - разрядные двоичные слова, то выбранные оптимальные модули сравнения будут другими: $m_1 = 2^n - 1 = 31$, а $m_2 = 2^n + 1 = 33$. Тогда алгоритм КиТО будет записан, как:

$$X_i = 496b_{2i} + 528b_{1i} \pmod{31 \times 33 = 1023}. \quad (3)$$

Из представленных выражений (2) и (3) следует, что алгоритмы КиТО изменчивы. Входящие в них большие коэффициенты, на которые умножаются значения образов-остатков, постоянны только для определённого выбора модулей сравнения m_1 и m_2 .

Этого основного недостатка лишён алгоритм конструктивной теоремы об остатках [Акушский, 1968]:

$$x = \begin{cases} m_1 \Delta / n + b_1, \Delta = b_1 - b_2 \geq 0 (m_1 < m_2); \\ m_1(m_2 + \Delta/n) + b_1, \Delta < 0 \end{cases} \Bigg\} n | \Delta \quad (4)$$

$$\begin{cases} m_1(m_2 + \Delta/n) + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n | (m_2 + \Delta); \\ m_1 \left[m_2 - \frac{(m_2 - \Delta)}{n} + b_1 \right], \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n | (m_2 - \Delta); \\ m_1(2m_2 + \Delta)/n + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n | (2m_2 + \Delta); \\ m_1[m_2 - (2m_2 - \Delta)]/n + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n | (2m_2 - \Delta); \\ \dots\dots\dots \\ (2k + 1)m_1(km_2 + \Delta)/n + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n | (km_2 + \Delta); \\ (2k + 2)m_1[m_2 - (km_2 - \Delta)]/n + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta \end{cases}$$

Обозначения $n \nmid \Delta$, $n/(km_2 + \Delta)$, n/Δ , $n/(km_2 - \Delta)$ ($k = 0, 1, \dots$) читаются так: Δ не делится на n без остатка и $km_2 + \Delta$, $km_2 - \Delta$ делятся на n без остатка. Символ $\nmid$ означает, что $\Delta = b_1 - b_2$ не делится без остатка (или с остатком, не равным 0) на значение $n = |m_1 - m_2|$.

При модулях, отличающихся друг от друга на 1: ($n = |m_1 - m_2| = 1$), алгоритм восстановления с использованием КтТО наиболее прост:

$$x = \begin{cases} m_1 \Delta / n + b_1, \Delta = b_1 - b_2 \geq 0 (m_1 < m_2) \\ m_1(m_2 + \Delta / n) + b_1, \Delta < 0 \end{cases} n|\Delta. \quad (5)$$

При модулях, отличающихся друг от друга на 2: ($n = |m_1 - m_2| = 2$), в алгоритм восстановления с использованием КтТО добавляется ещё одно звено вычислений:

$$x = \begin{cases} m_1 \Delta / n + b_1, \Delta = b_1 - b_2 \geq 0 (m_1 < m_2); \\ m_1(m_2 + \Delta / n) + b_1, \Delta < 0; \\ m_1(m_2 + \Delta) / n + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n/(m_2 + \Delta). \end{cases} n/\Delta \quad (6)$$

Если $n = |m_1 - m_2| = 3$, то адаптивная процедура восстановления будет дополнена ещё одним (четвертым) звеном восстановления x . Благодаря этому свойству алгоритм восстановления x (2) становится адаптивным, что в итоге приводит к существенному уменьшению числа вычислительных операций и, как следствие этого, к повышению показателей оперативности и достоверности установления истинного значения величины x [Кукушкин, 2000].

Более того, алгоритм (2) может быть использован и в случае, когда обрабатываемые и восстанавливаемые данные представлены в области рациональных чисел: $b_i \in \mathcal{Q}$ и $x_i \in \mathcal{Q}$. Такая возможность связана с тем, что многозвенные формулы восстановления значений $x_i \in \mathcal{Q}$ используют в качестве основы структуру одной из основных теорем арифметики:

$$x_i = m_j l_i + b_i, \quad (7)$$

где x_i – делимое, m_j – делитель, l_i – частное, а b_i – остаток.

Несмотря на то, что она сформулирована для случая целых чисел ($x_i, m_j, l_i, b_i \in \mathbb{Z}$), она оказывается справедливой и для случая, когда $x_i \in \mathcal{Q}$ и $b_i \in \mathcal{Q}$. Но это возможно тогда, когда для восстановления используют адаптивный алгоритм восстановления, основу которого составляет конструктивная теорема об остатках (КтТО).

В этом случае исходные данные $n = |m_1 - m_2|$ и $\Delta = b_1 - b_2$ также целые числа ($n, \Delta \in \mathbb{Z}$), при $x_i \in \mathcal{Q}$ и $b_i \in \mathcal{Q}$.

Покажем это на численном примере, составляющем основу решения следующего сравнения:

$$\begin{aligned} x &= m_1 l_1 + b_1 \\ x &= m_2 l_2 + b_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Предположим, что $x = 539,21$, а модули сравнения $m_1 = 31$, $m_2 = 33$. Тогда $b_1 = 12,21$, а $b_2 = 11,21$. Определяем исходные данные для восстановления на основе КтТО: $n = |m_1 - m_2| = |31 - 33| = 2$ и $\Delta = b_1 - b_2 = 12,21 - 11,21 = 1$. Они свидетельствуют о том, что в формуле (4) для восстановления значения $x_i = 539,21$ на основе известных образов-остатков необходимо воспользоваться третьим звеном, так как результат деления $\Delta = 1$ на $n = 2$ не относится к целым числам ($\mathbb{Z}$):

$$x = m_1 \frac{(m_2 + \Delta)}{n} + b_1. \quad (9)$$

Подставляя данные, получим: $x = 31 \times 17 + 12,21 = 539,21$. Проверяем достоверность полученного результата на основе замены индексов в формуле (9) 1 на 2: $x = 33 \times 16 + 11,21 = 539,21$. Результаты вычислений совпали, следовательно, ошибки при вычислениях не было.

Проверим, что будет при использовании алгоритма китайской теоремы об остатках. Вначале посмотрим, что даст решение системы сравнений при приёме $(N=2n)$ -разрядных двоичных сообщений X_i , дополнительно закодированных на передающей стороне с использованием образов-остатков

$$\begin{aligned} C_i^{(l)} &= \langle b_{li}(\bmod m_1), b_{2i}(\bmod m_2) \rangle, \\ X_i &= 496b_{2i} + 528b_{1i} \pmod{31 \times 33 = 1023}, \end{aligned} \quad (10)$$

при представлении исходных значений целыми числами: $X_i = 539$; $b_{1i} = 12$, и $b_{2i} = 11$ (пример и иллюстрации такого дополнительного кодирования в системе остаточных классов (СОК) приведены на рис. 1).

Выполним вычисления: 1) $X_i = 496b_{2i} + 528b_{1i} = 496 \times 11 + 528 \times 12 = 5456 + 6336 = 11792$; 2) найдем остаток b от деления числа 11792 на укрупнённый модуль сравнения $31 \times 33 = 1023$ – он равен значению $x = b = 539$. Сравнивая с исходным значением сообщения, которое было дополнительно закодировано в системе остаточных классов (СОК) и передано в канал связи, убеждаемся, что результат восстановления является верным. При этом необходимо отметить, что влияние помех, которые могут привести к искажению результата восстановления, не учитывалось.

Также все исходные данные были представлены целыми числами. Это условие выполняется при кодировании передаваемой информации. Но для последующей обработки полученных данных, ориентированной, например, на их фильтрацию (сглаживание), существующий математический аппарат классической теории Э. Галуа нуждается в доработке. Такая потребность появляется в связи с тем, что исходные данные, подвергаемые обработке, принадлежат области рациональных чисел $\mathcal{Q}$. Например, если данные телеизмерений X_i , графики изменения которых во времени были представлены целыми числами, принадлежащими $\mathbf{Z}$ (рис. 1), то при приёме, используя тарифовочные характеристики датчиков, их преобразуют, в общем случае, в числа рациональные $\mathcal{Q}$.

Но для того чтобы убедиться, будет ли при этом возможность использования математического аппарата образов-остатков, посмотрим, что при этом даст результат восстановления на основе алгоритма китайской теоремы об остатках (КиТО). Воспользуемся при этом ранее заданными исходными данными: $x = 539,21$, модулями сравнения $m_1 = 31$, $m_2 = 33$, а также образами-остатками: $b_1 = 12,21$ и $b_2 = 11,21$.

Повторим вычисления при задании новых условий: 1) $X_i = 496b_{2i} + 528b_{1i} = 496 \times 11,21 + 528 \times 12,21 = 5560,16 + 6446,72 = 12006,88$; 2) найдем остаток b от деления числа 12006,88 на укрупнённый модуль сравнения $31 \times 33 = 1023$. В результате получим остаток $b = 753,88$. Сравнивая с исходным значением $x = 539,21$, видим значительное его отличие от того, что было получено на основе алгоритма КиТО. Отсюда следует вывод, который и до вычислений был очевидным: существующая теория конечных полей не может быть использована при разработке инновационных технологий обработки информации: она ориентирована на область представления данных в целых числах ($\mathbf{Z}$). В этом заключается её существенное ограничение. Но оно исчезает, как только алгоритм КиТО заменяем на алгоритмы КтТО [Кукушкин, 2000]. Тогда, оказывается, появляется и новый «мощный криптографический инструмент», о котором мечтали выдающиеся учёные, занимающиеся проблемами защиты информации [Романец, 1999]. Он существенно проще, является адаптивным, поскольку количество звеньев формулы (2) определяется абсолютной разностью между модулями сравнения $n = |m_1 - m_2|$. При передаче информации их выбирают, исходя из разрядности $(N = 2n)$ двоичного кода, которым представлены передаваемые данные и сообщения X_i . Они являются оптимальными при $m_1 = 2^n - 1$, $m_2 = 2^n + 1$. В этом случае $n = |m_1 - m_2| = 2$. Тогда в соответствии с известным алгебраическим тождеством: $m_1 \times m_2 = (2^n - 1)(2^n + 1) = 2^{2n} - 1 = 2^N - 1$. А это означает, что произведение выбранных модулей сравнения обеспечивает возможность однозначного восстановления всех значений N - разрядного двоичного кода. При выбранных модулях

сравнения $m_1 = 2^5 - 1 = 31$ и $m_2 = 2^5 + 1 = 33$ диапазон восстанавливаемых значений сообщений определяется шкалой однозначного их представления (Ш): Ш = 0 ... 1023, что совпадает с аналогичным показателем для десятиразрядного двоичного кода N: N = 2n = 10.

Также необходимо отметить и ещё одну особенность восстановления дополнительно закодированных данных при передаче информации. Она связана с эффектом дублирования передаваемых данных при их дополнительном кодировании образами-остатками [Сухорученко, 1995]. Для подтверждения этой особенности воспользуемся примером графического представления исходного телеметрического параметра (ТПП), представленного дискретными его отчётами, полученными в результате применения теоремы В.А. Котельникова о дискретизации [Кукушкин, 2008]. В этом случае каждое из передаваемых 10 - разрядных сообщений X_i подвергают, как это было показано на рис. 1, дополнительному кодированию. Вначале находят значения образов-остатков $b_{1i}(\text{mod } m_1)$ и $b_{2i}(\text{mod } m_2)$, которые объединяют в такое же по разрядности двоичное слово: $C_i^{(1)} = \langle b_{1i}(\text{mod } m_1), b_{2i}(\text{mod } m_2) \rangle_2$.

При приёме образы-остатки $b_{1i}(\text{mod } m_1)$ и $b_{2i}(\text{mod } m_2)$ выделяют на основе разделения принятых закодированных сообщений $C_i^{(1)}$ на старшее $A_i = b_{1i}(\text{mod } m_1)$ и младшее $B_i = b_{2i}(\text{mod } m_2)$ полуслова. Эта операция составляет основу «жёсткого» декодирования данных на основе алгоритмов КтТО, что и было рассмотрено ранее. Под его управлением работает «мягкий» декодер значений дополнительно закодированных данных и сообщений. Но разделение на старшее $A_i = b_{1i}(\text{mod } m_1)$ и младшее $B_i = b_{2i}(\text{mod } m_2)$ полуслова также необходимо для получения второго инвариантного результата кодирования данных в СОК $C_i^{(2)} = \langle b_{2i}(\text{mod } m_2), b_{1i}(\text{mod } m_1) \rangle_2$. Его использование при передаче могло оказаться неприемлемым из-за ограничений на пропускную способность канала связи. Но после приёма сообщений $C_i^{(1)}$ нет таких препятствий, поэтому в результате перестановки полуслов $A_i = b_{1i}(\text{mod } m_1)$ и $B_i = b_{2i}(\text{mod } m_2)$ может быть сформировано и дополнительное закодированное сообщение $C_i^{(2)} = \langle b_{2i}(\text{mod } m_2), b_{1i}(\text{mod } m_1) \rangle_2$, что и показано на примере графических представлений на рис. 2. В результате такой операции исходный телеметрируемый параметр (ТПП) X_i^* , который при традиционной передаче был бы искажён помехой и восстановлен при приёме с ошибками ε_i^* : $X_i^* = X_i + \varepsilon_i^*$, может быть представлен в виде двух версий представления данных в СОК: $C_i^{(1)} = \langle b_{1i}(\text{mod } m_1), b_{2i}(\text{mod } m_2) \rangle_2$ и $C_i^{(2)} = \langle b_{2i}(\text{mod } m_2), b_{1i}(\text{mod } m_1) \rangle_2$ (рис. 2). При этом одна из них, например, $C_i^{(1)}$ была передана по каналу связи, а вторая – $C_i^{(2)}$ – синтезирована на приёмной стороне.

Затем каждая из закодированных копий в СОК была подвергнута обработке с использованием алгоритма сглаживания (фильтрации) данных, основу которого, например, составляет метод наименьших квадратов К. Гаусса. Результаты помехоустойчивого кодирования $C_i^{(1)*}$ и $C_i^{(2)*}$, искажённые в результате действия помех, имеют различные значения минимального кодового расстояния в метрике Евклида $d_{\min}$.

Из графических представлений изменения во времени значений $C_i^{(1)*}$ и $C_i^{(2)*}$ следует, что они, копируя друг друга, отличаются тем, что их значения не совпадают (не являются простым повторением, как это имеет место при традиционном дублировании данных). Также не совпадают по времени и их разрывы значений дополнительно закодированных значений ТПП первого рода, определяемые на основе неравенств:

$$\begin{aligned} \Delta C_i^{(1)*} &= |C_i^{(1)*} - C_{i+1}^{(1)*}| \geq 0,8 \times 2^N \\ \Delta C_i^{(2)*} &= |C_i^{(2)*} - C_{i+1}^{(2)*}| \geq 0,8 \times 2^N, \end{aligned} \quad (11)$$

где N – число разрядов двоичных слов, используемых для передачи сообщений.

Использование существующих информационных технологий фильтрации данных также упрощается за счёт того, что на основе неравенств (11) определяют моменты разрывов дополнительно закодированных значений $C_i^{(1)*}$ и $C_i^{(2)*}$. Таким образом определяют интервалы сглаживания (фильтрации): они должны находиться между соседними разрывами, определяемыми с использованием неравенств (11).

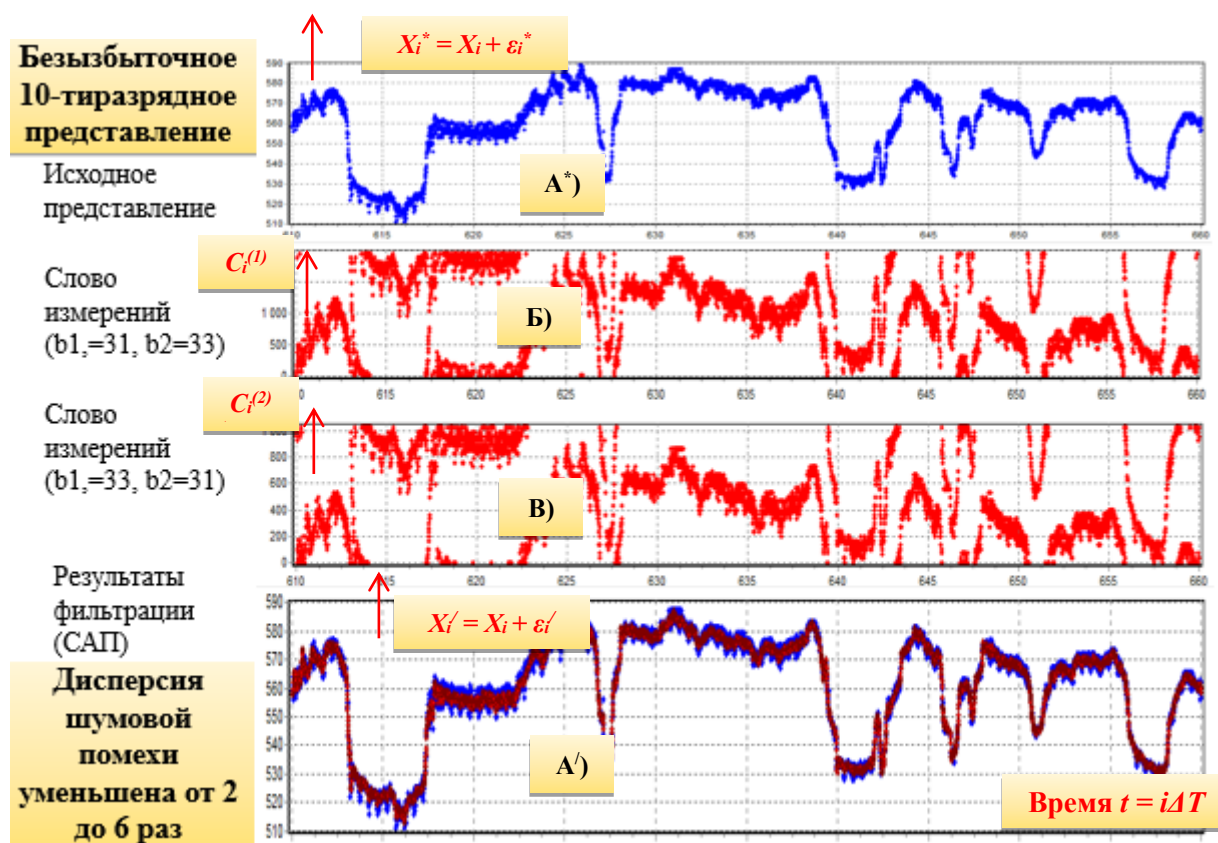


Рис. 2. Результаты графического изменения во времени значений телеметрируемого параметра одного и того же ТМП: при традиционной передаче $X_i^* = X_i + \varepsilon_i^*$ (А*), а также при дополнительном кодировании в СОК в двух вариантах: переданном $C_i^{(1)*} = \langle b_{1i}(\text{mod } m_1), b_{2i}(\text{mod } m_2) \rangle_2$ (Б) и дополнительно сформированном при приёме $C_i^{(2)*} = \langle b_{2i}(\text{mod } m_2), b_{1i}(\text{mod } m_1) \rangle_2$ (В) с результатами совместной их обработки с использованием метода наименьших квадратов

Fig. 2. Results of graphical time variation of the telemetered parameter values of the same TMP: in case of traditional transmission $X_i^* = X_i + \varepsilon_i^*$ (А*), as well as with additional encoding in the SOC in two versions: transmitted $C_i^{(1)*} = \langle b_{1i}(\text{mod } m_1), b_{2i}(\text{mod } m_2) \rangle_2$ (Б) and additionally generated at the reception $C_i^{(2)*} = \langle b_{2i}(\text{mod } m_2), b_{1i}(\text{mod } m_1) \rangle_2$ (В) with the results of their joint processing using the least squares method

Результаты кодирования $C_i^{(1)*}$ и $C_i^{(2)*}$ также могут отличаться тем, что при обработке отсутствует как таковая необходимость в экономии количества разрядов двоичного кода, который используют при представлении их значений данных при передаче. Необходимость в этом появляется только при передаче, когда особо актуальной становится проблема сжатия данных с целью уменьшения требований к пропускной способности каналов связи [Фалеев, 2015].

Как показали проведенные экспериментальные исследования с использованием реальной теплетрической информации (ТМИ) в результате искусственного увеличения на приёмной стороне копий данных, закодированных в СОК, дисперсия шума, искажающего восстановленный ТМП, уменьшается от 2 до 6 раз (рис. 2). График А' отфильтрованного ТМП представлен на фоне традиционно получаемого красным цветом.

Заклучение

В настоящее время существенное научное и практическое значение для совершенствования информационных процессов передачи и обработки информации приобретает конструктивная теория конечных полей. Она, как показывают частные исследования, приведенные в статье, способствует расширению возможности прикладного применения классической теории Э.Галуа. В статье показано, как может быть полезно использована СОК по новому назначению: для передачи ТМИ и её обработки. Отмечается, что

эта технология может быть единой и взаимодополняющей. С одной стороны, передача ТМИ на основе дополнительного кодирования с использованием образов-остатков не только позволяет обнаруживать и исправлять ошибки телеизмерений (ТИ). Она обеспечивает повышение оперативности обработки и уменьшения дисперсии шума, искажающего значения ТМП при использовании алгоритмов фильтрации. Новизна предлагаемого подхода заключается также и в том, что обработке, в том числе и с целью сглаживания (фильтрации) данных, могут подвергаться сами значения образов-остатков. Полученные при этом по каждому из модулей сравнения класс-решения задачи фильтрации объединяют на основе алгоритмов КтТО. В результате этого, как показали результаты экспериментальных исследований, дисперсия шумовой составляющей может быть существенно уменьшена. Также при этом имеются и другие возможности повышения эффективности передачи информации и её обработки. Они связаны с обнаружением и исправлением ошибок передачи.

Список литературы

- Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. 1968. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Сов. Радио, 140.
- Кнут Д. 1977. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 2 Получисленные алгоритмы. М.: Мир, 724.
- Кукушкин С.С. 2000. Конечные поля и информатика. в 2-х томах, т. 1. Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. М.: МО РФ, 260.
- Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. 2008. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. М.: МО РФ, 328.
- Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. 1999. Защита информации в компьютерных системах и сетях. М.: Радио и связь, 328.
- Торгашев В.А. 1973. Система остаточных классов и надёжность ЦВМ. М.: Сов. Радио, 120.
- Сухорученко Б.И., Меньшиков В.А. 1995. Методы анализа характеристик летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 368.
- Фалеев О.В. 2015. Принципы реализации параллельной обработки измерительной информации. *Вестник РГРТУ*, № 54. Часть 2: 23–37.
- Roy B. 1959. Transitivity et connexité. C. R. Acad. Sci. Paris. 249: 216–218.
- Wilkinson B., Allen M. 2005. Parallel programming techniques and applications using networked workstations and parallel computers. Pearson Education, 468.

References

- Akushsky I.Ya., Yuditsky D.I. 1968. Machine Arithmetic in Remainder Classes. Moscow: Sov. Radio, 140.
- Knuth D. 1977. The Art of Computer Programming. Vol. 2. Seminumerical Algorithms. Moscow: Mir, 724.
- Kukushkin S.S. 2000. Finite Fields and Computer Science. in 2 volumes, vol.1. Methods and algorithms, classical and non-traditional, based on the use of the constructive remainder theorem. M.: MO RF, 260.
- Kukushkin S.S., Gladkov I.A., Chaplinsky V.S. 2008. Methods and information technologies of monitoring the state of dynamic systems. M.: MO RF, 328.
- Romanets Yu.V., Timofeev P.A., Shangin V.F. 1999. Information protection in computer systems and networks. M.: Radio and communication, 328.
- Torgashev V.A. 1973. The System of Remainder Classes and the Reliability of the Computer. Moscow: Sov. Radio, 120.
- Sukhoruchenko B.I., Menshikov V.A. 1995. Methods of Aircraft Characteristics Analysis. Moscow: Mashinostroenie, 368.
- Faleev O.V. 2015. Principles of implementing parallel processing of measurement information. *Vestnik RGRU*, No. 54. Part 2: 23–37.
- Roy B. 1959. Transitivity et connexité. C. R. Acad. Sci. Paris. 249: 216–218.
- Wilkinson B., Allen M. 2005. Parallel programming techniques and applications using networked workstations and parallel computers. Pearson Education, 468.



Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 01.08.2025
Поступила после рецензирования 04.09.2025
Принята к публикации 05.09.2025

Received August 01, 2025
Revised September 04, 2025
Accepted September 05, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кукушкин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, ведущий научный сотрудник АО «Военно-инженерная корпорация», г. Королёв, Московская обл., Россия

Кукушкин Леонид Сергеевич, научный сотрудник АО «Рязанское производственно-техническое предприятие», г. Рязань, Россия

Махов Федор Сергеевич, магистрант кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Головко Марина Викторовна, ассистент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey S. Kukushkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Leading Researcher at the JSC Military Engineering Corporation, Korolev, Moscow region, Russia

Leonid S. Kukushkin, Researcher at JSC Ryazan Production and Technical Enterprise, Ryazan, Russia

Makhov F. Sergeevich, Master's Student of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Marina V. Golovko, Assistant at the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia