Print ISSN 1991-6639
Online ISSN 2949-1940

Том 28 № 1 2026

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИЗВЕСТИЯ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

DOI: 10.35330/1991-6639

12+

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» (КБНЦ РАН)

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

Том 28 № 1 2026

Сквозной номер выпуска – 129

Журнал основан в 1998 г. Выходит 6 раз в год

ISSN 1991-6639 (печатная версия), ISSN 2949-1940 (электронная версия)

Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77-90616 от 29.12.2025 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

360010, Российская Федерация, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2
E-mail: ired07@mail.ru

© КБНЦ РАН, 2026

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Budgetary Scientific Establishment “Federal Scientific Center “Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (KBSC RAS)

Science journal

NEWS
OF THE KABARDINO-BALKARIAN SCIENTIFIC CENTER OF RAS

Vol. 28 No. 1 2026

Continuous issue number – 129

The journal was founded in 1998, 6 issues per year

ISSN 1991-6639 (print), ISSN 2949-1940 (online)

The online publication is registered in the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media. Certificate of registration El No. FS 77-90616 from December 29, 2025.

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE:

360010, Russian Federation, Kabardino-Balkarian, Nalchik, 2 Balkarov street
E-mail: ired07@mail.ru

© KBSC RAS, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН Том 28 № 1 2026

Редакционная коллегия……5

Информационные технологии и телекоммуникации

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Моделирование оптимального уровня денежных потоков с использованием методологии Cash Flow at Risk (CFaR) для российских корпораций
Н. А. ГАРУНОВ, Д. А. МАКСИМОВ…….11

Управление робототехническим комплексом в стохастической неопределенной динамической среде с использованием аппарата сетей Петри
Ф. В. ДЕВЯТКИН, Д. И. АРАБАДЖИЕВ, М. А. ШЕРЕУЖЕВ, А. И. ДЫШЕКОВ…….25

Сравнительное статистическое моделирование динамических рядов при прогнозировании суточного электропотребления на языках Python, R, C#, C++, Go, Java
А. Э. ДЗГОЕВ, СЯН ХУА, А. Д. ЛАГУНОВА, Я. А. КОПЫЛОВА, Д. В. МОРОЗОВ, Я. В. МАЖЕЙ, А. В. БРАЙЛОВСКИЙ, Д. А. ЮДИН, Р. АЛЛАБЕРГЕНОВ……..39

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Разработка и моделирование роботизированной системы контроля микроклимата для биотехнологических применений
У. Р. ТАХАЕВ, М. Р. ИСАЕВА, А. А-В. САДУЛАЕВ, А. И. НАСУХАНОВ…….57

Разработка математической модели для шестизвенного промышленного робота-манипулятора с механическим захватом
З. Л. ХАКИМОВ, В. В. ШУХИН, М. А. ЛАБАЗАНОВ…….75

Обзор методов машинного обучения для автоматической идентификации и сопровождения конвективных ячеек по данным метеорадиолокации
В. А. ШАПОВАЛОВ, А. А. АДЖИЕВА, М. М. АХМАТОВ, А. Ж. ХИТИЕВА…….90

Архитектура двухуровневой системы управления автономным мобильным роботом для складской логистики
В. В. ШУХИН, З. Л. ХАКИМОВ, М. А. ЛАБАЗАНОВ……102

Информатика и информационные процессы

Сравнительный анализ производительности сокетов: TCP, UDP, SCTP, QUIC
Д. В. ГАДАСИН, М. В. ГАЛИЦКИЙ, Р. О. ЦЫГАНКОВ……..117

Физические науки

Определение активности примордиальных радионуклидов в образце вулканического туфа
М. Б. МАСАЕВ, А. М. ГАНГАПШЕВ, Д. А. ТЕКУЕВА, А. М. МАСАЕВ……...135

Агрономия, лесное и водное хозяйство

Общее земледелие и растениеводство

Адаптивная ресурсосберегающая технология возделывания амаранта на основе изучения агротехнических приемов и их влияния на рост, развитие и продуктивность в условиях лесостепной зоны Республики Ингушетия
Л. Ю. КОСТОЕВА, З. С. ВИНОГРАДОВ, З. М. БАЗГИЕВ, А. М. ГАЗДИЕВ……...147

Экономика

Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

Наборы данных маркетинговых исследований в цифровых экосистемах девелопмента: ITSM-подход Индустрии 5.0
А. И. ВАСИЛЬЕВ……..161

Нечеткий метаэвристический метод распределения сотрудников по задачам проекта
Д. Д. ЯРЦЕВ, М. Ю. ВОРОТИЛОВА, С. В. МОРДВИН……175

Региональная и отраслевая экономика

Методологические подходы к оценке инновационных экосистем в условиях развития платформенной экономики
К. В. ДЬЯЧКОВ……188

Статистика как инструмент переформатирования общественного сознания
М. В. КАРМАНОВ, И. А. КИСЕЛЕВА, В. И. КУЗНЕЦОВ, А. М. ТРАМОВА……..201

Исследования цифровых экосистем: современное состояние, тенденции и направления развития
Т. В. МАУГАТИЕ, Е. В. КОРЧАГИНА……210

Особенности цифровой трансформации российской экономики
И. В. ПЕРФИЛЬЕВ, Е. С. БАЛАШОВА……..224

Анализ социально-экономической мобильности населения Кабардино-Балкарии и возможные ее последствия
И. А. ТАБАКСОЕВ, Ф. Ж. БЕРОВА……237

Социально-экономическая оценка размещения и специализации животноводства в Российской Федерации
А. Г. ЧУРАЕВ……252

Менеджмент

Структурная эффективность региональных инновационных систем: методологические и институционально-правовые основания
С. А. МАХОШЕВА, А. А. КУМУКОВ……..266

Филология

Метафорические эпитеты в поэзии Расула Гамзатова
М. Н. НАБИГУЛАЕВА……..283

Юбиляры

Владимиру Мицаховичу Гукежеву – 85 лет……...293

Анатолию Беталовичу Иванову – 75 лет……...295

Алихану Яковлевичу Кибирову – 75 лет……..297

Махти Зейтуновичу Улакову – 75 лет……299

Правила для авторов журнала……302

CONTENTS

News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS Vol. 28 No. 1 2025

Editorial Board……5

Information Technologies and Telecommunications

System analysis, management and information processing, statistics

Optimal cash flow modeling using the Cash Flow at Risk (CFaR) method for Russian corporations
N.A. GARUNOV, D.A. MAKSIMOV……11

Control of a robotic complex in a stochastic uncertain dynamic environment using Petri nets
F.V. DEVYATKIN, D.I. ARABADZHIEV, M.A. SHEREUZHEV, A.I. DYSHEKOV……25

Comparative statistical modeling of dynamic series for forecasting daily electricity consumption in Python, R, C#, C++, Go, and Java
A.E. DZGOEV, XIANG HUA, A.D. LAGUNOVA, Ya.A. KOPYLOVA, D.V. MOROZOV, Ya.V. MAZHEY, A.V. BRAILOVSKY, D.A. YUDIN, R. ALLABERGENOV……39

Automation and control of technological processes and productions

Development and modeling of a robotic microclimate control system for biotechnological applications
U.R. TAKHAEV, M.R. ISAEVA, A.A-V. SADULAEV, A.I. NASUKHANOV……57

Mathematical model development for a six-link industrial robotic arm with mechanical gripper
Z.L. KHAKIMOV, V.V. SHUKHIN, M.A. LABAZANOV……75

Review on machine learning methods for convective cell identification and tracking using weather radar
V.A. SHAPOVALOV, A.A. ADZHIEVA, M.M. AKHMATOV, A.Zh. KHITIEVA……90

Architecture for two-level mobile robot control system for warehouse logistics
V.V. SHUKHIN, Z.L. KHAKIMOV, M. A. LABAZANOV……102

Informatics and information processes

Socket performance comparative analysis: TCP, UDP, SCTP, QUIC
D.V. GADASIN, M.V. GALITSKY, R.O. TSYGANKOV……117

Physical sciences

Determination of primordial radionuclides activity in a sample of volcanic tuff
M.B. MASAEV, A.M. GANGAPSHEV, D.A. TEKUEVA, A.M. MASAEV……135

Agronomy, Forestry and Water Management

General farming and crop production

Adaptive resource-saving technology of amaranth cultivation based on the study of agricultural practices and their impact on growth, development, and productivity in the forest-steppe zone of the Republic of Ingushetia
L.Yu. KOSTOEVA, Z.S. VINOGRADOV, Z.M. BAZGIEV, A.M. GAZDIEV……147

Economy

Mathematical, statistical and instrumental methods in economics

Marketing research datasets in digital development ecosystems: an Industry 5.0 ITSM approach
A.I. VASILYEV……161

Fuzzy metaheuristic method for allocating employees to project tasks
D.D. YARTSEV, M.Yu. VOROTILOVA, S.V. MORDVIN……...175

Regional and sectoral economics

Methodological approaches to assessing innovation ecosystems in context of a developing platform economy
K.V. DYACHKOV……...188

Statistics as a tool for reformatting public consciousness
M.V. KARMANOV, I.A. KISELEVA, V.I. KUZNETSOV, A.M. TRAMOVA……...201

Research of digital ecosystems: current state, trends and directions of development
T.W. MAWUGATIE, E.V. KORCHAGINA……210

Features of digital transformation in Russia's economy
I.V. PERFILIEV, E.S. BALASHOVA……224

Analysis for population socio-economic mobility in Kabardino-Balkaria and its possible consequences
I.A. TABAKSOEV, F.Zh. BEROVA……237

Socioeconomic assessment of animal husbandry placement and specialization in the Russian Federation
A.G. CHURAEV……252

Management

Structural efficiency of regional innovation systems: methodological and institutional-legal foundations
S.A. MAKHOSHEVA, A.A. KUMUKOV……266

Philology

Metaphorical epithets in the poetry of Rasul Gamzatov
M.N. NABIGULAEVA……283

Anniversaries

Vladimir Mitsakhovitch Gukezhev is 85 years old ……....293

Anatoly Betalovich Ivanov is 75 years old……...295

Alikhan Yakovlevich Kibirov is 75 years old……...297

Makhti Zeitunovich Ulakov is 75 years old……..299

Publishing regulations for the authors …….....302

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Иванов Петр Мацович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Заместитель главного редактора:

Улаков Махти Зейтунович, доктор филологических наук, профессор, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Ответственный секретарь:

Энеева Лиана Магометовна, кандидат физико-математических наук, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Члены редакционной коллегии:

Абазов Алексей Хасанович, доктор исторических наук, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Адуков Рухман Хасаинович, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Алтухов Анатолий Иванович, академик РАН, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Амирханов Хизри Амирханович, академик РАН, доктор исторических наук, профессор, Институт археологии РАН, Москва, Россия

Бабенко Людмила Клементьевна, доктор технических наук, профессор, Таганрогский технологический институт ЮФУ, Таганрог, Россия

Барыкин Сергей Евгеньевич, доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа сервиса и торговли, Санкт-Петербург, Россия

Бижоев Борис Чамалович, доктор филологических наук, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Гукежев Владимир Мицахович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Дзамихов Касболат Фицевич, доктор исторических наук, профессор, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Дзюба Владимир Алексеевич, доктор биологических наук, профессор, неаффилированный ученый, Краснодар, Россия

Дохолян Сергей Владимирович, доктор экономических наук, профессор, Федеральный научно-исследовательский социологический центр РАН, Москва, Россия

Завалин Алексей Анатольевич, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова, Москва, Россия

Закшевский Василий Георгиевич, академик РАН, доктор экономических наук, профессор, Научно-исследовательский институт экономики и организации агропромышленного комплекса Центрально-Черноземного района РФ, Воронеж, Россия

Иванов Анатолий Беталович, доктор биологических наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Кибиров Алихан Яковлевич, доктор экономических наук, профессор, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Клейнер Георгий Борисович, член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, профессор, Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

Комков Николай Иванович, доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Санкт-Петербург, Россия

Котляков Владимир Михайлович, академик РАН, доктор географических наук, профессор, Институт географии РАН, Москва, Россия

Кузьминов Валерий Васильевич, доктор физико-математических наук, Баксанская нейтринная обсерватория – центр коллективного пользования Института ядерных исследований РАН, Нейтрино, Приэльбрусье, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Кусраев Анатолий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Владикавказский научный центр РАН, Владикавказ, РСО–Алания, Россия

Мазлоев Виталий Зелимханович, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Малкандуев Хамид Алиевич, доктор сельскохозяйственных наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Мамбетова Фатимат Абдуллаховна, доктор экономических наук, доцент, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Маслиенко Любовь Васильевна, доктор биологических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В. С. Пустовойта, Краснодар, Россия

Матишов Геннадий Григорьевич, академик РАН, доктор географических наук, профессор, Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

Махошева Салима Александровна, доктор экономических наук, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Нагоев Залимхан Вячеславович, кандидат технических наук, Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Нечаев Василий Иванович, доктор экономических наук, профессор, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Попков Юрий Соломонович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление», Москва, Россия

Псху Арсен Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Пшихопов Вячеслав Хасанович, доктор технических наук, профессор, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Рехвиашвили Серго Шотович, доктор физико-математических наук, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Ронжин Андрей Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

Савин Игорь Юрьевич, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Российский университет дружбы народов, департамент рационального природопользования Института экологии, Москва, Россия

Семин Александр Николаевич, академик РАН, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Уральский государственный университет, Институт мировой экономики, Екатеринбург, Россия

Симаков Евгений Алексеевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт картофельного хозяйства имени А. Г. Лорха, Москва, Россия

Скляров Игорь Юрьевич, доктор экономических наук, профессор, Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

Склярова Юлия Михайловна, доктор экономических наук, профессор, Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

Стемпковский Александр Леонидович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия

Супрунов Анатолий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Национальный центр зерна им. П. П. Лукьяненко, Краснодар, Россия

Темботова Фатимат Асланбиевна, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, Институт экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Трамова Азиза Мухамадияевна, доктор экономических наук, доцент, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия

Филюшин Михаил Александрович, кандидат биологических наук, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Россия

Чочаев Алим Хусеевич, доктор экономических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное предприятие «Агронаучсервис», Москва, Россия

Шевхужев Анатолий Фоадович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, Михайловск, Россия

Шогенов Юрий Хасанович, академик РАН, доктор технических наук, Отделение сельскохозяйственных наук РАН, Москва, Россия

Янбых Рената Геннадьевна, член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, доцент, профессор РАН, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief:

Petr M. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Deputy Editor in Chief:

Makhti Z. Ulakov, Doctor of Philology, Professor, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Responsible Secretary:

Liana M. Eneeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Members of the Editorial Board:

Aleksey Kh. Abazov, Doctor of Historical Sciences, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Rukhman Kh. Adukov, Doctor of Economics, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center for Agricultural Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Economics of Agriculture, Moscow, Russia

Anatoly I. Altukhov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center for Agricultural Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Economics of Agriculture, Moscow, Russia

Khizri A. Amirkhanov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Historical Sciences, Professor, Institute of Archeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Lyudmila K. Babenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Taganrog Institute of Technology, Southern Federal University, Taganrog, Russia

Sergey E. Barykin, Doctor of Economics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Service and Trade, St. Petersburg, Russia

Boris Ch. Bizhoev, Doctor of Philology, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vladimir M. Gukezhev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Agriculture – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Kasbolat F. Dzamikhov, Doctor of Historical Sciences, Professor, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vladimir A. Dzyuba, Doctor of Biological Sciences, Professor, nonaffiliated scientist, Krasnodar, Russia

Sergey V. Dokholyan, Doctor of Economics, Professor, Federal Center of Theoretical and Applied Sociology of RAS, Moscow, Russia

Aleksey A. Zavalin, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, Moscow, Russia

Vasily G. Zakshevsky, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Research Institute for Economics and Organization of the Agro-Industrial Complex of the Central Black Earth Region of the Russian Federation, Voronezh, Russia

Anatoly B. Ivanov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Alikhan Ya. Kibirov, Doctor of Economics, Professor, Federal Scientific Center for Agricultural Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia

Georgy B. Kleiner, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Nikolai I. Komkov, Doctor of Economics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Economic Forecasting of RAS, St. Petersburg, Russia

Vladimir M. Kotlyakov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Valery V. Kuzminov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Baksan Neutrino Observatory – center of collective use of Institute for Nuclear Research, Neutrino, Elbrus region, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Anatoly G. Kusraev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, North Ossetia – Alania, Russia

Vitaly Z. Mazloev, Doctor of Economics, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center for Agrarian Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia

Khamid A. Malkanduev, Doctor of Agricultural Sciences, Institute of Agriculture – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Fatimat A. Mambetova, Doctor of Economics, Associate Professor, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Lyubov V. Maslienko, Doctor of Biological Sciences, All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoit, Krasnodar, Russia

Gennady G. Matishov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geography, Professor, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

Salima A. Makhosheva, Doctor of Economics, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Zalimkhan V. Nagoev, Candidate of Technical Sciences, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vasily I. Nechaev, Doctor of Economics, Professor, Federal Research Center for Agrarian Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Center Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia

Yuri S. Popkov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center “Informatics and Control”, Moscow, Russia

Arsen V. Pskhu, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vyacheslav Kh. Pshikhopov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Sergo Sh. Rekhviashvili, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Applied Mathematics and Automation – Branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Andrey L. Ronzhin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Igor Yu. Savin, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Peoples Friendship University of Russia, Department of Environmental Management of the Institute of Ecology, Moscow, Russia

Alexander N. Semin, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Ural State University, Institute of World Economy, Department of Strategic and Production Management, Ekaterinburg, Russia

Evgeny A. Simakov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, All-Russian Research Institute of Potato Economy named after A.G. Lorkh, Moscow, Russia

Igor Yu. Sklyarov, Doctor of Economics, Professor, Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

Yulia M. Sklyarova, Doctor of Economics, Professor, Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

Alexander L. Stempkovsky, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Anatoly I. Suprunov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, National Grain Center named after P.P. Lukyanenko, Krasnodar, Russia

Fatimat A. Tembotova, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Ecology of Mountain Territories named after A.K. Tembotov of RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Aziza M. Tramova, Doctor of Economics, Associate Professor, Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov, Moscow, Russia

Mikhail A. Filyushin, Candidate of Biological Sciences, Federal Research Center "Fundamental Foundations of Biotechnology" of RAS, Moscow, Russia

Alim Kh. Chochaev, Doctor of Economics, Professor, Federal State Unitary Enterprise "Agronauchservis", Moscow, Russia

Anatoly F. Shevkhuzhev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center, Mikhailovsk, Russia

Yuri Kh. Shogenov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Renata G. Yanbykh, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economic Sciences, Professor, HSE University, Moscow, Russia

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 330.46 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-11-24
МЈНАММ

Моделирование оптимального уровня денежных потоков с использованием методологии Cash Flow at Risk (CFaR) для российских корпораций

Н. А. Гарунов✉, Д. А. Максимов

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью применения передовых проактивных методов, таких как Cash Flow at Risk (CFaR), для управления ликвидностью и обоснования управленческих решений. Статья посвящена решению задачи количественной оценки рисков денежных потоков российских сырьевых корпораций в условиях макроэкономической волатильности.

Цель исследования – разработка и апробация практического алгоритма оценки CFaR, адаптированного к факторной структуре риска российских корпораций.

Методология включает построение регрессионной модели, связывающей денежный поток с ключевыми макроэкономическими переменными, и последующее вероятностное моделирование.

Результаты исследования показывают, что прогнозное значение EBITDA на плановый период составляет около 1600 млрд руб. Расчеты на основе распределения случайной ошибки модели демонстрируют, что с вероятностью 5 % EBITDA может оказаться ниже ожидаемого значения не более чем на 80 млрд руб., что количественно определяет показатель CFaR. Научная новизна заключается в разработке структурного алгоритма, интегрирующего регрессионный анализ и методологию CFaR для российских корпораций.

Выводы. Практическая значимость подтверждается тем, что данный подход предоставляет финансовым менеджерам инструмент для формирования резервов ликвидности и разработки стратегий хеджирования.

Ключевые слова: Cash Flow at Risk (CFaR), управление рисками, денежные потоки, макроэкономическая волатильность, регрессионная модель, стресс-тестирование, российские корпорации, ПАО «Лукойл»

Поступила 08.12.2025, одобрена после рецензирования 02.02.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Гарунов Н. А., Максимов Д. А. Моделирование оптимального уровня денежных потоков с использованием методологии Cash Flow at Risk (CFaR) для российских корпораций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 11–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-11-24

© Гарунов Н. А., Максимов Д. А., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

MSC: 90-10 Scientific article

Optimal cash flow modeling using the Cash Flow at Risk (CFaR) method for Russian corporations

N.A. Garunov✉, D.A. Maksimov

Plekhanov Russian University of Economics
36, Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia

Abstract. The relevance of this study stems from the need to apply advanced proactive methods, such as Cash Flow at Risk (CFaR), to manage liquidity and inform management decisions. This article addresses the problem of quantitatively assessing the cash flow risks of Russian commodity corporations in the face of macroeconomic volatility.

Aim. The study is to develop and test a practical algorithm for assessing CFaR, adapted to the factor structure of risk for Russian corporations.

The methodology involves constructing a regression model linking cash flow to key macroeconomic variables, followed by probabilistic modeling.

The study results indicate that the projected EBITDA value for the planning period is approximately 1,600 billion rubles. Calculations based on the model's random error distribution demonstrate that, with a 5% probability, EBITDA could be less than the expected value by up to 80 billion rubles, which quantifies the CFaR indicator. The scientific novelty lies in the development of a structural algorithm integrating regression analysis and the CFaR methodology for Russian corporations.

Conclusions. The practical significance of this approach is confirmed by the fact that it provides financial managers with a tool for building liquidity reserves and developing hedging strategies.

***Keywords**:* Cash Flow at Risk (CFaR), risk management, cash flows, macroeconomic volatility, regression model, stress testing, Russian corporations, PJSC Lukoil

Submitted 08.12.2025, approved after reviewing 02.02.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Garunov N.A., Maksimov D.A. Optimal cash flow modeling using the Cash Flow at Risk (CFaR) method for Russian corporations. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 11–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-11-24

Введение

Эффективное управление денежными потоками в условиях нестабильной макроэкономической среды является критически важной задачей для обеспечения финансовой устойчивости российских сырьевых корпораций. Высокая зависимость их финансовых результатов от конъюнктуры мировых товарных и валютных рынков обусловливает значительные риски ликвидности [9]. В этой связи возникает насущная потребность в переходе от традиционных, зачастую реактивных, методов управления к более сложным и проактивным количественным инструментам [5].

Одним из наиболее эффективных инструментов для решения этой задачи выступает методология Cash Flow at Risk (CFaR), позволяющая оценить потенциальное негативное отклонение денежного потока от ожидаемого значения с заданной вероятностью. Несмотря на свою распространенность в международной практике адаптация CFaR к специфике российских корпораций, в частности к структуре их ключевых риск-факторов, остается областью, требующей дальнейшей проработки и конкретных практических алгоритмов.

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Целью данного исследования являются разработка, тестирование и демонстрация на практическом примере работоспособного алгоритма оценки риска денежных потоков на основе методологии CFaR для российской сырьевой корпорации.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Выявить и формализовать ключевые макроэкономические факторы, определяющие волатильность денежных потоков компании на примере ПАО «Лукойл».
- Построить и специфицировать регрессионную модель, количественно связывающую показатель EBITDA с отобранными факторами (цена на нефть марки Urals, курс USD/RUB, индекс потребительских цен, доходность государственных облигаций).
- Реализовать процедуру вероятностного моделирования, включив в модель случайную ошибку для получения распределения возможных значений денежного потока.
- На основе полученного распределения рассчитать показатель CFaR (5-й процентиль) для количественной оценки потенциальных потерь.

Развитие современных подходов к управлению финансовыми рисками характеризуется переходом от интуитивных оценок к строгим количественным методам [5]. В данном контексте методология Cash Flow at Risk (CFaR) представляет собой закономерный этап эволюции, фокусирующийся на оценке рисков операционной деятельности компании.

Основой CFaR выступает методология Value at Risk (VaR), получившая широкое распространение в 1900-е годы в качестве стандарта для оценки рыночных рисков финансируемых институтов. VaR количественно определяет максимально возможные потери стоимости портфеля активов за заданный период времени при заданном уровне доверительной вероятности. Формально VaR представляет собой квантиль распределения вероятностей изменения стоимости портфеля [6].

Однако применение VaR в нефинансовом секторе выявило ряд концептуальных ограничений. Данный показатель ориентирован на оценку риска рыночной стоимости активов, в то время как для промышленной корпорации приоритетной задачей является обеспечение стабильности операционной деятельности, ключевым индикатором которой выступает денежный поток. Это обусловило возникновение методологии CFaR, которая переняла вероятностный аппарат VaR, но сместила фокус с риска стоимости на риск денежных потоков.

CFaR определяется как вероятностная оценка потенциального отклонения будущего денежного потока компании в негативную сторону от его ожидаемого значения на определенном горизонте планирования. Иными словами, CFaR указывает величину, на которую денежный поток может оказаться ниже прогнозируемого уровня с заданной вероятностью. Например, если квартальный CFaR для операционного денежного потока составляет 500 млн руб. при доверительном уровне 95 %, это означает, что с вероятностью 95 % падение денежного потока ниже ожидаемого значения не превысит указанную сумму.

В практике риск-менеджмента сформировалось три основных подхода к количественной оценке CFaR, каждый из которых обладает специфическими преимуществами и ограничениями.

1. **Параметрический метод**, известный также как **аналитический** или **ковариационный**. Основывается на предположении о нормальном характере распределения риск-факторов. В рамках данного подхода величина CFaR вычисляется на основе стандартного отклонения денежного потока и соответствующего квантиля стандартного нормального распределения. Ключевыми достоинствами параметрического метода являются его вычислительная простота и прозрачность. Основной недостаток связан с допущением о нормальности распределения, которое часто не соответствует эмпирическим данным, характеризующимся «тяжелыми хвостами», что может приводить к существенному занижению оценки риска [6].

2. **Метод исторического моделирования**. Не требует априорных предположений о законе распределения риск-факторов. Алгоритм расчета основан на анализе исторических данных: строится эмпирическое распределение изменений денежного потока за ретроспективный период, и величина CFaR определяется как соответствующий процентиль этого распределения. Главное преимущество метода – возможность учета реальной, в том числе асимметричной, формы распределения. К ограничениям относятся невозможность моделирования рисков, не проявившихся в исторической выборке, а также зависимость результатов от репрезентативности выбранного временного интервала [1].

3. **Метод Монте-Карло**. Представляет собой наиболее гибкий и мощный инструмент. Его сущность заключается в проведении многократного стохастического моделирования сценарных значений риск-факторов на основе заданных законов их распределения. Для каждого сгенерированного сценария рассчитывается соответствующее значение денежного потока, что позволяет построить его полное распределение вероятностей и определить CFaR как требуемый квантиль. Преимуществами метода являются возможность моделирования сложных нелинейных зависимостей и учет любых предполагаемых распределений. Основными барьерами для применения выступают высокая вычислительная сложность и требование к качеству спецификации моделей риск-факторов [6].

Несмотря на общность вероятностно-статистического фундамента методологии VaR и CFaR имеют принципиальные различия в объекте управления и области применения. VaR сфокусирован на краткосрочных рыночных рисках инвестиционного или торгового портфеля, его использование наиболее релевантно для финансовых посредников [3, 6]. В отличие от этого CFaR нацелен на оценку операционных рисков, обусловленных как рыночной конъюнктурой, так и внутренними бизнес-процессами компании. Горизонт планирования для CFaR, как правило, более долгосрочный (квартал, год) и соответствует циклу операционного планирования. Таким образом, CFaR служит инструментом стратегического риск-менеджмента, обеспечивающего связь между колебаниями внешней среды и финансовой устойчивостью компании через призму ее основного финансового показателя – денежного потока.

Эволюция от VaR к CFaR свидетельствует об углублении интеграции риск-менеджмента в систему корпоративного управления, смещая акцент со спекулятивных аспектов на обеспечение непрерывности и эффективности основной деятельности [6].

Формирование денежных потоков российских компаний сырьевого сектора происходит в условиях воздействия системы взаимосвязанных факторов риска [2]. Их структуризация позволяет выделить приоритетные направления для количественного моделирования.

Доминирующим фактором нестабильности выступает зависимость от конъюнктуры мировых товарных рынков. Ценовой риск проявляется через высокую волатильность котировок ключевых экспортных товаров: нефти марки Urals, природного газа, металлургической продукции. Изменение цен определяет динамику выручки, являясь основным драйвером операционного денежного потока. Особенность российского экспорта заключается в значительных спредах между эталонными сортами и национальными марками нефти, что добавляет дополнительный компонент неопределенности.

Валютный риск приобретает специфические черты в условиях структурного дисбаланса между валютной выручкой и расходами. Ослабление национальной валюты оказывает разнонаправленное воздействие. Рублевый эквивалент экспортной выручки демонстрирует положительную динамику, одновременно возрастает нагрузка по обслуживанию валютных заимствований, увеличивается стоимость импортируемого оборудования и технологических решений [1].

Стабильность денежных потоков подвержена влиянию общеэкономической динамики. Инфляционное давление систематически увеличивает операционные расходы через рост

затрат на энергоресурсы, материалы и услуги подрядных организаций. Изменение ключевой ставки Центрального банка влияет на стоимость обслуживания кредитного портфеля, определяя величину финансовых оттоков [4].

Значимым компонентом риска является изменчивость регулярной среды. Корректировки налогового законодательства, в частности параметров налогового маневра в нефтегазовой отрасли, оказывают влияние на чистый денежный поток [2]. Трансформация режима валютного контроля и экспортных пошлин создает дополнительные сложности и финансовые издержки.

Специфика российской экономики создает комплекс уникальных и сложно прогнозируемых рисков, таких как необходимость оперативной перестройки логистических цепочек, непредсказуемые изменения валютного регулирования и вынужденный уход с ключевых рынков. Геополитическая напряженность и санкционные ограничения формируют постоянный фон хозяйственной деятельности. Эти факторы затрудняют доступ к международным финансовым рынкам и передовым технологиям, повышая стоимость капитала и ограничивая возможности для операционной оптимизации.

Растущую релевантность приобретают риски, связанные с глобальным энергетическим переходом (ESG-факторы). Ужесточение экологических стандартов и изменение потребительских предпочтений создают стратегические вызовы для традиционных сырьевых моделей бизнеса. Такие тенденции способны оказывать структурное воздействие на долгосрочную динамику денежных потоков через каналы переоценки активов и увеличения стоимости финансирования.

Таким образом, риски денежных потоков формируются под воздействием двух основных групп факторов. С одной стороны, это привычные колебания рынка – цен и спроса. С другой – непредсказуемые события: изменения в законодательстве или политическая обстановка. Чтобы надежно оценить эти риски, модель должна учитывать все эти факторы, так как они часто влияют друг на друга, и это влияние не всегда является прямолинейным [8].

Метод вычисления CFaR, основанный на регрессивном анализе рисков компании ПАО «Лукойл»

Переход от теоретического рассмотрения методологии CFaR к ее практической реализации требует разработки последовательного алгоритма оценки рисков. В рамках данного исследования предлагается поэтапный подход к расчету CFaR, адаптированный к специфике деятельности российских корпораций сырьевого сектора. В качестве объекта для апробации методологии выбрано ПАО «Лукойл», чья операционная деятельность в значительной степени подвержена влиянию макроэкономической волатильности [7]. Анализ строится на последовательной реализации 6 ключевых этапов, начиная с идентификации факторов риска и заканчивая расчетом итогового показателя CFaR. Регрессионное уравнение для определения чувствительности кэш-фло корпорации к факторам риска[1]:

$$CF_t^{\text{ДВ}} - E_{t-1}\left[CF_t^{\text{ДВ}}\right] = \beta_0 + \beta_1\left(\pi_t^{\text{ДВ}} - E_{t-1}\left[\pi_t^{\text{ДВ}}\right]\right) + \beta_2\left(\pi_t^{\text{ДВ}} - E_{t-1}\left[\pi_t^{\text{ДВ}}\right]\right) + \beta_3\left(S_t^{\text{ДВ/ИВ}} - E_{t-1}\left[S_t^{\text{ДВ/ИВ}}\right]\right) + \beta_4\left(i_t^{\text{ДВ}} - E_{t-1}\left[i_t^{\text{ДВ}}\right]\right) + \beta_5\left(i_t^{\text{ИВ}} - E_{t-1}[i_t^{\text{ИВ}}]\right) + \beta_6\left(P_t^{\text{ДВ}} - E_{t-1}\left[P_t^{\text{ДВ}}\right]\right) + \varepsilon_t ,$$

где:

$CF_t^{\text{ДВ}}$ – кеш-фло во внутренней (domestic) валюте в период t;

$\pi_t^{\text{ДВ}}$ – темпы инфляции в период t;

[1]Экономические модели анализа инновационных рисков. URL: https://infopedia.su/24x53dd.html (дата обращения: 12.10.2025).

$S_t^{\text{ДВ/ИВ}}$ – спотовый обменный курс внутренней валюты по отношению к иностранной валюте в период t;

i_t – процентные ставки в период t;

P_i – рыночная цена используемых и производимых товаров в период t;

E_{t-1} – оператор математического ожидания в период t-1;

ε_t – изменения в кеш-фло в период t, не зависящие от макроэкономических факторов и рыночных факторов риска.

Из цен на сырьевые товары для ПАО «Лукойл» больше всего важна цена на нефть.

Большое влияние на денежные потоки могут оказывать колебания валютных курсов, так как часть покупателей продукции компании находятся за пределами Российской Федерации и расчеты ведутся в долларах и евро. Пока что зависимость от этих валют сильна, но уже сейчас некоторые сделки на международном рынке осуществляются в других валютах, таких как юань.

Часть активов компании находится зарубежом, что усиливает зависимость от иностранных валют и от политических решений местных правительств. Существует большая конкуренция на мировом рынке с другими нефтедобывающими компаниями, которые стремятся, при поддержке своих правительств, захватить новые рынки и устранить влияние на конечных потребителей любыми средствами, выходящими за пределы только экономических факторов [2]. Компании ПАО «Лукойл» приходится осуществлять многочисленные торговые операции, чтобы избежать негативных последствий такого положения дел. Следовательно, важными для организации являются обменные курсы RUB/USD, RUB/EURO и RUB/CNY (рис. 1–3).

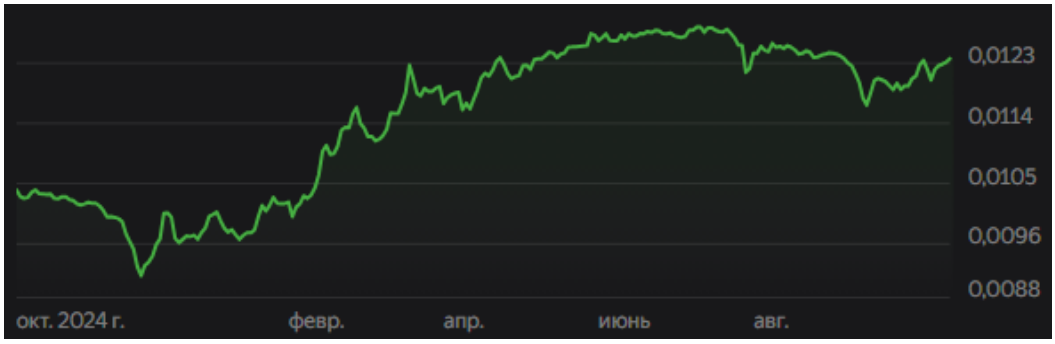


***Рис. 1**. Обменный курс RUB/USD за год (01.10.2024 – 01.10.2025)*[2]

***Fig. 1**. RUB/USD exchange rate for the year (October 1, 2024 – October 1, 2025)*

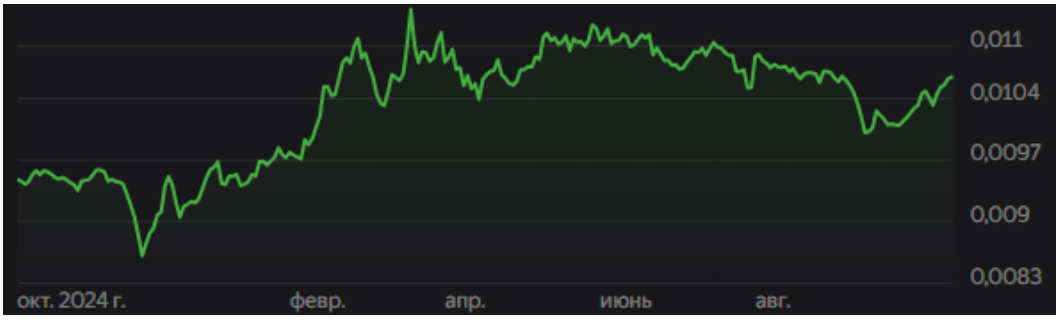


***Рис. 2**. Обменный курс RUB/EURO за год (01.10.2024 – 01.10.2025)*[3]

***Fig. 2**. RUB/EUR exchange rate for the year (October 1, 2024 – October 1, 2025)*

[2]Курс доллара ЦБ РФ за 2025 год – URL: https://mainfin.ru/currency/cb-rf/usd/date/2025 (дата обращения: 13.10.2025).

[3]Курс евро ЦБ РФ за 2025 год. URL: https://mainfin.ru/currency/cb-rf/eur/date/2025 (дата обращения: 13.10.2025).

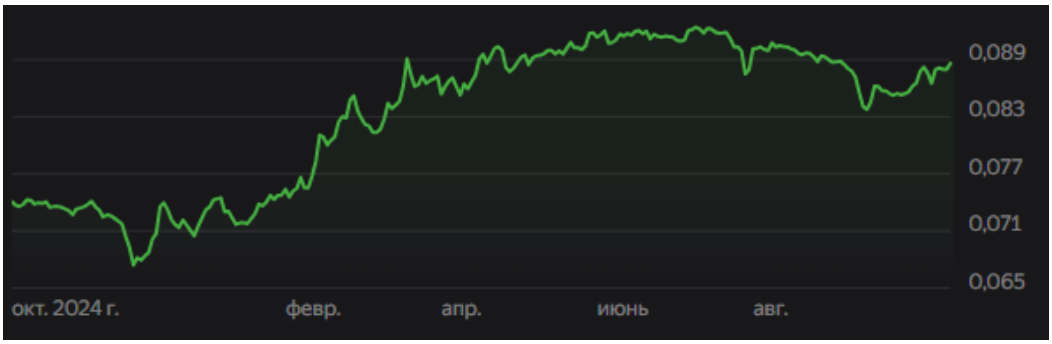


***Рис. 3**. Обменный курс RUB/ CNY за год (01.10.2024 – 01.10.2025)*[4]

***Fig. 3**. RUB/CNY exchange rate for the year (October 1, 2024 – October 1, 2025)*

На основании графиков изменения курсов валют можно увидеть высокую волатильность. Это может позволить сделать моделирование более логичным.

Финансовое положение компании ПАО «Лукойл» сильно зависит от инфляции в Российской Федерации, в Китае и США (табл. 1).

Таблица 1. Уровень инфляции в Российской Федерации, США и Китае, %

Table 1. Inflation rates in the Russian Federation, the USA and China, %

	Российская Федерация		США		Китай	
	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Январь	7,44	9,92	3,4	2,9	-0,3	0,1
Февраль	7,69	10,06	3,1	3,0	-0,8	0,5
Март	7,72	10,34	3,2	2,8	0,7	-0,7
Апрель	7,84	10,23	3,5	2,4	0,1	-0,1
Май	8,30	9,88	3,4	2,3	0,3	-0,1
Июнь	8,59	9,40	3,3	2,4	0,3	-0,1
Июль	9,13	8,79	3,0	2,7	0,2	0,1
Август	9,05	8,14	2,9	2,7	0,5	0
Сентябрь	8,63	7,98	2,5	2,9	0,6	-0,4

Источник: составлено авторами[5]

На денежные потоки операционного типа существенно влияют процентные ставки, так как компании, активно работающие на мировом рынке, в особенности нефтегазовые, зависят от изменений своего капитала.

[4]Курс рубля к китайскому юаню. URL: https://ru.investing.com/currencies/rub-cny (дата обращения: 13.10.2025).

[5]Инфляция и ключевая ставка Банка России. URL: https://cbr.ru/hd_base/infl (дата обращения: 13.10.2025).

Индекс потребительских цен (ИПЦ) в США (г/г). URL: https://ru.investing.com/ economic-calendar/cpi-733 (дата обращения: 13.10.2025).

Индекс потребительских цен (ИПЦ) в Китае (м/м). URL: https://ru.investing.com/economic-calendar/chinese-cpi-743 (дата обращения: 13.10.2025).

Нефтегазовые компании имеют высокую капиталоемкость, так как оперируют большим количеством сырья и работают с не менее крупными клиентами [2]. Также требуется учесть доходность по вкладам в Российской Федерации. Она в рассматриваемый период в среднем составляла 17 %.

Второй этап анализа состоит в том, что нужно прогнозировать риски для инвесторов, акционеров и банковских аналитиков, которые связаны с тем, что рынок непредсказуем и может привести к краху ранее влиятельные организации или к серьезным потерям. Для построения регрессионной модели использована выборка ежеквартальных данных за период с 2019 по 2024 г. Выбор горизонта планирования обусловлен тем, что нужно охватить периоды стабильности и значительных кризисов по типу COVID-19, а также геополитические перемены после событий февраля 2022 г.

Источники данных – цены на нефть из MOEX и EIA, обменные курсы валют с сайта ЦБ, индекс потребительских цен, а также процентные ставки с сайта ЦБ РФ.

Например, ПАО «Газпром» не смог выплатить дивиденды своим акционерам, так как потерял большое количество финансовых средств на потерянных контрактах. Кроме того, нефтегазовым компаниям из России пришлось искать способы выхода на новые рынки, в основном на азиатский. Европейские страны все равно закупают нефть, но делают это через иностранных партнеров.

Чтобы сделать эффективный прогноз основных факторов риска, характерных для нефтегазовых компаний, требуется создать и применить модель стохастической динамики процентных ставок. Также для актуализации данных можно воспользоваться особыми форвардными курсами – данными, полученными в результате работы компаний-аудиторов, которые продают их желающим получить собранную и уже обработанную информацию.

На третьем этапе требуется создать особую регрессионную модель, отражающую влияние на компанию макроэкономических и рыночных факторов. Важно подобрать конкретную переменную, которая отражает, как именно на модель регрессионного типа влияют риски, характерные для нефтегазовых компаний в конкретный момент времени. Одной из основных переменных, которые применяются чаще всего, является финансовый показатель EBITDA (табл. 2, рис. 4).

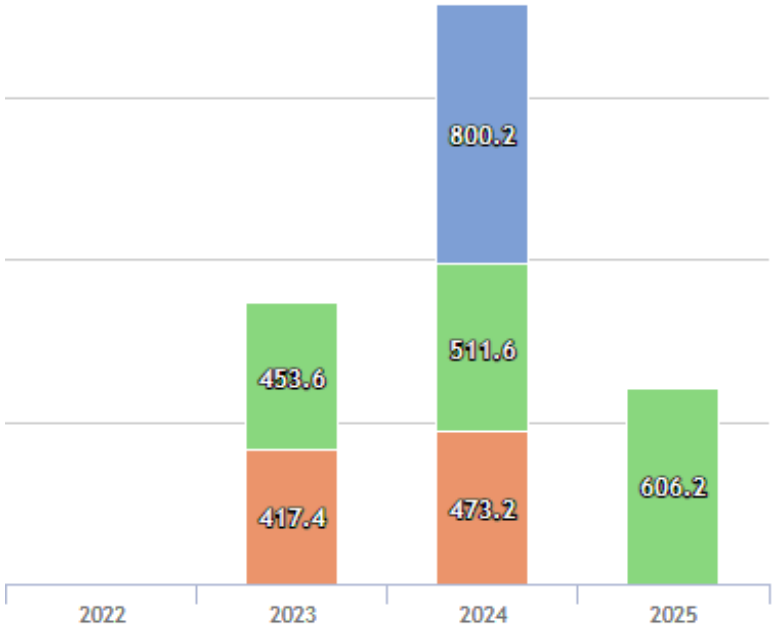


Рис. 4. *Лукойл EBITDA МСФО, сумма по кварталам, млрд руб.*[6]

Fig. 4. *Lukoil EBITDA IFRS, total by quarter, billion rubles.*

[6]Лукойл. EBITDA МСФО. URL: https://smart-lab.ru/q/LKOH/MSFO/ebitda (дата обращения: 13.10.2025).

Таблица 2. Лукойл (LKOH) EBITDA МСФО (квартальные значения)

Table 2. Lukoil (LKOH) IFRS EBITDA (quarterly values)

	2024Q2	2024Q3	2024Q4	2025Q1	2025Q2	LTM
EBITDA, млрд. руб.	511,6	–	800,2	–	606,2	1406
Изм. за год, г/г, %	+13	–	–	-100	+18	–
Изм. за квартал, к/к, %	+8	-100	–	-100	–	–

Независимые переменные в модели устанавливаются в зависимости от текущей ситуации и типа компании. Для нефтегазовой отрасли, в особенности для тех компаний, которые работают на международном рынке, важны обменные курсы, цены на сырье, процентные ставки по вкладам, рост инфляции.

Модель может учитывать множество рисков или учитывать либо только их, либо результат их взаимодействия. Но для того, чтобы обеспечить стабильность модели и учесть показатели в конкретный момент времени, используется разность 1-й степени.

В качестве цены на нефть взята цена на марку Urals (рис. 5).

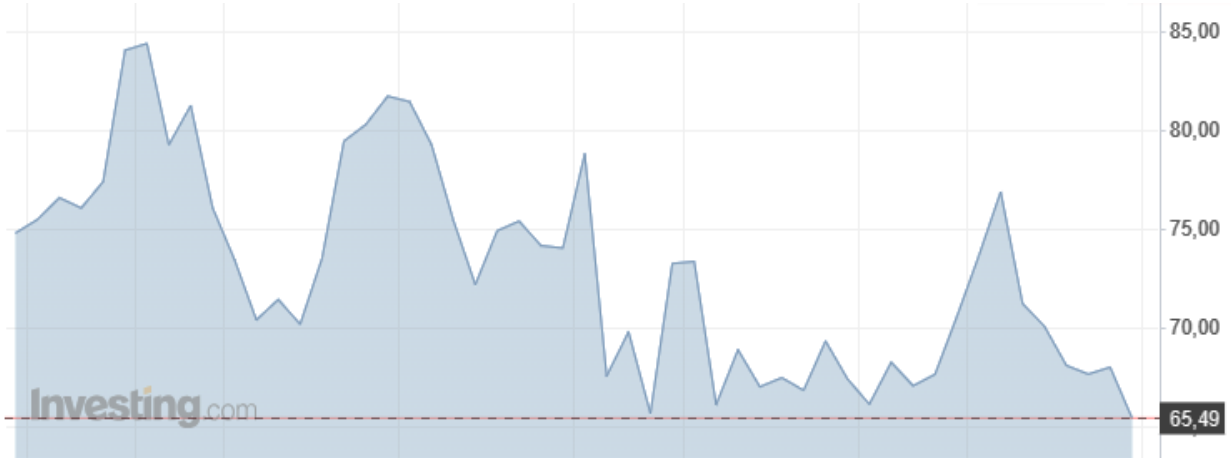


Рис. 5. *Изменение цены на нефть марки Urals, $*[7]

Fig. 5. *Change in the price of Urals crude oil, $*

Для моделирования сезонных эффектов в модель включены поквартальные бинарные переменные.

Регрессионные коэффициенты показывают маржинальную подверженность факторам риска. Если цена на нефть увеличится всего лишь на 1$, то показатель кэш-фло значительно возрастает. Для отечественных нефтегазовых компаний международного типа характерна ситуация, когда ослабление курса вызывает увеличение выручки, так как множество клиентов находится за пределами границ страны.

Если ПАО «Лукойл» активно продает свое сырье за рубеж, то ее денежные потоки растут. В особенности это справедливо для цианида натрия. Финансовая ситуация компании также улучшается, если повышается международная цена на нефть, аммиак или алюминий.

[7]Urals Crude Oil (USD/Bbl). URL: https://tradingeconomics.com/commodity/urals-oil (дата обращения: 13.10.2025)

На четвертом этапе создается компьютерная модель, которая учитывает макроэкономические и рыночные факторы. Для точного моделирования используют метод Монте-Карло. Чтобы рассчитать денежный поток, нужно использовать особую ковариационную матрицу рисков. Нужно использовать более тысячи сценариев и также учесть то, что может возникнуть ошибка регрессии случайного типа.

Пятый этап в расчетах – непосредственно исследование всех известных сценариев того, как именно на модель действуют риски. Также здесь нужно найти все перемены в показателе кэш-фло организации. Для этого применяют 10 000 сценариев из предыдущего этапа, при этом вводятся коэффициенты регрессии из разработанной модели. Это позволяет вычислить конкретные значения денежного потока.

Для формирования стохастических сценариев в методе Монте-Карло был реализован следующих алгоритм, учитывающий как характеристики отдельных риск-факторов, так и взаимосвязи между ними. На основе квартальных изменений с 2019 по 2024 г. для каждого риск-фактора были определены законы распределения. Для изменения цены на нефть и обменного курса использовались статистические тесты Харке-Бера, анализ Q-Q графиков, их изменение лучше представлять через t-распределение Стьюдента с 5–6 степенями свободы, что позволит учесть вероятность экстремальных перемен, весьма вероятных в текущих условиях.

Изменения индекса потребительских цен в РФ и ключевой ставки ЦБ РФ аппроксимируются нормальным распределением, так как динамика в исследуемый период соответствовала изменениям внешней среды. Ключевое допущение заключается в корреляции риск-факторов, для расчета применялась выборочная ковариационная матрица. Для генерации коррелированных случайных приложений следует использовать метод Холецкого. В итоге генерируется вектор коррелированных приращений риск-факторов. Эти приращения добавляются к последним наблюдениям за значениями факторов, что дает возможность получить набор их значений на конец прогнозного квартала. А уже отсюда можно рассчитать изменение денежного потока для сценария с учетом случайной ошибки, смоделированной из нормального распределения.

Далее нужно добавить случайную ошибку регрессии, что дает возможность получить вероятностное распределение EBITDA.

Шестой этап. Вычисление CFaR. Используя полученное распределение EBITDA, вычисляем среднее значение и 5-й процентиль данного распределения для каждого из подразделений компании и для всего предприятия в целом.

Согласно расчетам, EBITDA на 2025 г. составит примерно 1600 млрд руб., что соответствует общим прогнозам экспертов, утверждающих, что оно будет равно 1595,7 млрд руб. Отличие в значении может быть связано с недостаточным количеством учтенных факторов, так как экспертная модель является предметом коммерческой тайны и может учитывать неочевидные закономерности. При этом нужно учесть, что существует вероятность того, что EBITA будет ниже данного значения не более чем на 80 млрд руб., и она составляет примерно 5 %.

Пример расчета для основного российского подразделения ПАО «Лукойл»

Чем больше наблюдений, тем лучше. Чтобы прогноз был точнее, можно взять поквартальные наблюдения за больший срок, например, за 5 лет – с 2019 по 2024 г. Следовательно, 20 наблюдений. Рассмотрим EBITDA компании при торговле по основным каналам, то есть в долларах.

EBITDA(t) (млрд руб.) = 200 + 15 * Urals(t) (долл/барр) – 10 * USD/RUB – 5 * CPI(t) – 2 * BOND_Yield(t) + e(t)

Коэффициенты обозначают следующее:

Urals (+15). При росте цены на нефть данной марки на доллар EBITDA увеличивается на 15 млрд руб.

USD/RUB (-10). Если рубль укрепится на одну единицу, то EBITDA снижается на 10 млрд руб. Выручка сильно зависит от обменного курса.

CPI (-5). Рост инфляции на 1 % приводит к тому, что EBITDA уменьшается на 5 млрд руб. (операционные затраты возрастают).

BOND_Yield (-2). Снижение доходности гособлигаций на один процент может быть вызвано ухудшением экономической конъектуры, что приводит к снижению EBITDA на 2 млрд руб.

Если использовать следующие значения, можно получить:

Urals = 75$ за баррель (изменение: увеличение на 5$);
USD / RUB = 90 (изменение: 2 руб.);
CPI = 5,5 % (изменение: +0,5 %);
BOND_Yield = 8% (изменение: увеличение на 0,3 %).

Подставим в формулу:

EBITDA(t) (млрд руб.) = 200 + 15 * 75 – 10 * 90 – 5 * 5,5 – 2 * 8 = 381,5 млрд руб.

Полученное значение EBITDA является точечной оценкой, справедливой лишь для строгого заданного набора макроэкономических условий. Однако ключевая задача финансового менеджмента – управление не точечными значениями, а рисками их отклонения. Проведенный расчет демонстрирует высокую чувствительность денежного потока к колебаниям внешних факторов: например, снижение цены нефти Urals при прочих равных условиях приведет к снижению EBITDA. Именно для количественной оценки таких потенциальных отклонений и применяется методология CFaR.

Приведенное числовое уравнение с коэффициентами служит для демонстрации влияния в упрощенном виде, показатели установлены экспертно, на основе реальных данных компании.

Примененная регрессионная модель служит основой для расчета CFaR. Для этого, используя исторические данные, оцениваются волатильность, распределение каждого риск-фактора (цена нефти, курса USD и так далее) и корреляции. Для каждого сценария по уравнению вычисляется соответствующее значение EBITDA, что позволяет построить полное эмпирическое распределение вероятных денежных потоков.

Таблица 3. Анализ чувствительности CFaR к ключевым допущениям

Table 3. Sensitivity analysis of CFaR to key assumptions

Параметр	Старая величина	Новая величина	Результирующий CFaR (95 %)	Интерпретация
Волатильность цены Urals, %	25	30	95 млрд руб. (+18,75 %)	Рост волатильности сырья – ключевой драйвер риска
Корреляция Urals/USD RUB	+0,6	-0,2	105 млрд руб. (+31,25 %)	Если связь ослабляется, риск увеличивается
Распределение факторов	нормальное	*t*-распределение (df = 4)	110 млрд руб. (+37,5 %)	Учет хвостов может улучшить эффективность оценки

Источник: составлено авторами

Величина CFaR на заданном доверительном уровне определяется как разница между средним прогнозным значением денежного потока и его квантилем на выбранном уровне доверия. Таким образом, апробированный на данных ПАО «Лукойл» алгоритм позволяет интегрировать влияние ключевых макроэкономических факторов в единую вероятностную модель оценки риска.

Расчетное значение CFaR предоставляет менеджменту компаний объективную и измеримую основу для принятия решений. Зная потенциальный размер неблагоприятного отклонения денежного потока, можно обоснованно формировать резервы ликвидности, разрабатывать стратегии хеджирования, которые были бы ориентированы на конкретные риски, выявленные моделью, и оптимизировать структуру капитала, учитывая определенный запас прочности денежного потока при планировании дивидендных выплат или инвестиционных программ.

В случае с хеджированием чувствительность денежного потока может помочь определить объем валютных форвардов или опционов, чтобы нейтрализовать заданную долю риска.

Использование более глубокого распределения и выявленных корреляций позволяет дать более надежную оценку потенциальных потерь, что может оказаться критически важно в контексте управления активами в условиях экономической и политической турбулентности.

Рассмотренный алгоритм имеет высокую степень адаптивности к различным условиям и может быть применен не только к ПАО «Лукойл», но и к прочим компаниям, относящимся к сырьевому сектору, что делает его более универсальным.

Предложенный подход обладает значительным потенциалом для адаптации к специфике других компаний сырьевого сектора с учетом их индивидуальной факторной структуры рисков. Дальнейшее развитие исследования может быть связано с уточнением модельных параметров на основе более ретроспективных данных, включением в модель аддитивных риск-факторов (например, спредов кредитного риска) и построением многопериодного CFaR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власов Д. А.* Теоретико-игровое моделирование в практике принятия решений. Научные исследования и разработки // Экономика. 2018. Т. 6. № 6. С. 59–63.

2. *Выгодчикова И. Ю., Воротникова Д. В., Халиков М. А.* Оценка инвестиционной привлекательности нефтегазовых компаний России // Экономика строительства. 2025. № 4. С. 539–541.

3. *Закревская Е. А., Хайлова Е. А.* Формирование оптимальной инвестиционной стратегии предприятия // Транспортное дело России. 2017. № 6. С. 42–43.

4. *Лялькова Е. Е., Султангареев И. И.* Портфельное инвестирование на финансовом рынке России в современных условиях // Финансовые рынки и банки. 2023. №12.

5. *Макарова О. Н., Князев А. С., Макарова Ю. Н., Мартыненко О. В.* Экономические методы оценки финансового состояния экспортеров в системе бюджетного управления // Экономика и экологический менеджмент. 2022. №3.

6. *Мецгер А. А., Зеленин А. О.* Учет фактора рыночной ликвидности при расчете VaR // Вестник Гуманитарного университета. 2025. Т. 13. № 1. С. 23–39. DOI: 10.35853/vestnik.gu.2025.13-1.02

7. *Теньковская Л. И.* Волатильность доходности акций ПАО «Лукойл» в течение экономических кризисов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Экономика и менеджмент. 2023. № 3.

8. *Халиков М. А., Решульская Е. М., Выгодчикова И. Ю., Нечаев О. Н.* Моделирование производственной функции операционного сегмента предприятия по агрегированным данным о составе рабочих активов // Инновации и инвестиции. 2024. № 1. С. 267–269.

9. *Якуничева А. Е.* Финансовая грамотность и финансовая отчетность как помощники инвесторов при принятии решений // Скиф. 2023. № 4(80).

REFERENCES

1. Vlasov D.A. Game-theoretic modeling in decision-making practice. Scientific research and development. *Economics*. 2018. Vol. 6. No. 6. Pp. 59–63. (In Russian)

2. Vygodchikova I.Yu., Vorotnikova D.V., Khalikov M.A. Assessment of investment attractiveness of Russian oil and gas companies. *Economics of Construction*. 2025. No. 4. Pp. 539–541. (In Russian)

3. Zakrevskaya E.A., Khailova E.A. Formation of an optimal investment strategy for an enterprise. *Transport Business of Russia.* 2017. No. 6. Pp. 42–43. (In Russian)

4. Lyal'kova E.E., Sultangareev I.I. Portfolio investing in the Russian financial market under modern conditions. *Financial Markets and Banks*. 2023. No. 12. (In Russian)

5. Makarova O.N., Knyazev A.S., Makarova Yu.N., Martynenko O.V. Economic methods for assessing the financial condition of exporters in the budget management system. *Economics and Environmental Management*. 2022. No. 3. (In Russian)

6. Metzger A.A., Zelenin A.O. Considering market liquidity factor in VaR calculation. *Vestnik Gumanitarnogo universiteta* [Bulletin of Liberal Arts University]. 2025. No. 13(1). Pp. 23–39. DOI: 10.35853/vestnik.gu.2025.13-1.02. (In Russian)

7. Ten'kovskaya L.I. Volatility of stock returns of PJSC "NK "Lukoil" during economic crises. *Bulletin of SUSU. Series: Economics and Management*. 2023. No. 3. (In Russian)

8. Khalikov M.A., Reshul'skaya E.M., Vygodchikova I.Yu., Nechaev O.N. Modeling the production function of an enterprise's operating segment based on aggregated data on the composition of working assets. *Innovations and Investments*. 2024. No. 1. Pp. 267–269. (In Russian)

9. Yakunicheva A.E. Financial literacy and financial reporting as assistants for investors in decision-making. *Skif*. 2023. No. 4(80). (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Гарунов Нурмагомед Алиханович, аспирант базовой кафедры цифровой экономики института развития информационного общества, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;
ngarunov@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0203-9899, SPIN-код: 6489-4897

Максимов Денис Алексеевич, д-р экон. наук, профессор, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;
Maksimov.DA@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8316-8359, SPIN-код: 6104-5875

Information about the authors

Nurmagomed A. Garunov, Postgraduate Student, Basic Department of Digital Economy, Institute for the Development of the Information Society, Plekhanov Russian University of Economics;
36, Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia;
ngarunov@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0203-9899, SPIN-code: 6489-4897
Denis A. Maksimov, Doctor of Economics, Professor, Plekhanov Russian University of Economics;
36, Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia;
Maksimov.DA@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8316-8359, SPIN-code: 6104-5875

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 62-523.8 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-25-38
RBHPTE

Управление робототехническим комплексом в стохастической неопределенной динамической среде с использованием аппарата сетей Петри

Ф. В. Девяткин[1, 2], Д. И. Арабаджиев[1, 2], М. А. Шереужев✉[1, 2], А. И. Дышеков[1]

[1]Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1
[2]Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1

Аннотация. Научная новизна данной работы заключается в развитии подхода интеграции байесовской фильтрации сенсорных данных и цветных сетей Петри, впервые реализованной в виде иерархической программной архитектуры, где апостериорные вероятности отображаются в динамическую маркировку сети, определяющую разрешение переходов.

Цель исследования – формализация, программная реализация и экспериментальная проверка иерархической системы управления промышленным робототехническим комплексом в условиях стохастической неопределенности динамической среды.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта управления использован робототехнический комплекс, включающий шестизвенный манипулятор со схватом и систему технического зрения на основе видеокамеры. Задача комплекса – перемещение разноцветных объектов (кубиков красного, желтого, зеленого и синего цветов) из четырех начальных позиций в соответствующие конечные позиции согласно заданной конфигурации. Для формализации дискретно-событийной логики управления применены цветные сети Петри, описывающие параллелизм операций и ресурсные ограничения. Обработка визуальной информации реализована на основе рекурсивного байесовского фильтра с учетом матрицы зашумления размерностью 6×6 и механизма подтверждения измерений (k = 10 последовательных совпадений), что обеспечивает устойчивость к стохастическим возмущениям. Программная реализация выполнена на языке Python 3 с использованием библиотек OpenCV, NumPy и SciPy. Экспериментальная верификация проведена в 500 симуляциях в среде Gazebo и 30 натурных испытаниях при варьировании уровня шума $\sigma = 0{,}05\ldots0{,}2$ с оценкой метрик RMSE, вероятности ложных срабатываний и времени выполнения цикла манипуляции.

Результаты. В статье предложен метод управления робототехническим манипуляционным комплексом в условиях стохастической неопределенности динамической среды, обусловленной шумами сенсоров, задержками передачи данных, частичной наблюдаемостью и непредсказуемыми изменениями расположения объектов. Разработана стохастическая модель сенсорной системы, обеспечивающая устойчивое распознавание объектов при наличии шумов и динамических возмущений. Предложена архитектура системы управления, включающая модуль фильтрации данных и дискретно-событийный уровень принятия решений. Проведена экспериментальная верификация в симуляционной и натурной среде с использованием шестизвенного манипулятора.

Заключение. Полученные результаты показали снижение вероятности ложного распознавания состояний до 0,024 % и уменьшение времени выполнения манипуляционных операций на 15 % по сравнению с базовым детерминированным подходом.

© Девяткин Ф. В., Арабаджиев Д. И., Шереужев М. А., Дышеков А. И., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Ключевые слова: цветная сеть Петри, управление робототехническим комплексом, стохастическая неопределенность, адаптивное управление, байесовская фильтрация данных

Поступила 23.08.2025, одобрена после рецензирования 14.10.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Девяткин Ф. В., Арабаджиев Д. И., Шереужев М. А., Дышеков А. И. Управление робототехническим комплексом в стохастической неопределенной динамической среде с использованием аппарата сетей Петри // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 25–38. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-25-38

MSC: 68T40 Scientific article

Control of a robotic complex in a stochastic uncertain dynamic environment using Petri nets

F.V. Devyatkin[1, 2], D.I. Arabadzhiev[1, 2], M.A. Shereuzhev✉[1, 2], A.I. Dyshekov[1]

[1]Moscow State University of Technology "STANKIN"
1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia
[2]Bauman Moscow State Technical University
5, buld. 1, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia

Abstract. The scientific novelty of this work lies in the development of an approach for integrating Bayesian filtering of sensor data and colored Petri nets, implemented for the first time in the form of a hierarchical software architecture, where posterior probabilities are mapped into a dynamic marking of the network that determines the resolution of transitions.

Aim. The study is the formalization, software implementation and experimental verification of a hierarchical control system for an industrial robotic complex under conditions of stochastic uncertainty of a dynamic environment.

Research materials and methods. The control object is a robotic system comprising a six-link manipulator with a gripper and a video camera-based vision system. The system's task is to move multi-colored objects (red, yellow, green, and blue cubes) from four initial positions to corresponding final positions according to a specified configuration. Colored Petri nets, which describe the parallelism of operations and resource constraints, are used to formalize the discrete-event control logic. Visual information processing is implemented using a recursive Bayesian filter, taking into account a 6x6 noise matrix and a measurement confirmation mechanism (k = 10 consecutive matches), ensuring robustness to stochastic disturbances. The software implementation is written in Python 3 using the OpenCV, NumPy, and SciPy libraries. The experimental verification was carried out in 500 simulations in the Gazebo environment and 30 full-scale tests with varying noise levels of $\sigma = 0.05…0.2$ with an assessment of the RMSE metrics, the probability of false alarms, and the execution time of the manipulation cycle.

Results. This article proposes a method for controlling a robotic manipulation system under conditions of stochastic uncertainty in a dynamic environment caused by sensor noise, data transmission delays, partial observability, and unpredictable changes in the position of objects. A stochastic model of the sensor system has been developed, ensuring stable object recognition in the presence of noise and dynamic disturbances. A control system architecture is proposed, including a data filtering module and a discrete-event decision-making layer. Experimental verification was conducted in a simulation and real-world environment using a six-link manipulator.

Conclusion. The obtained results showed a reduction in the probability of false positives to 0.024% and a 15% reduction in the execution time of manipulation operations compared to the basic deterministic approach.

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Keywords: colored Petri net, robotic complex control, modeling, uncertainty, dynamic data filtering, adaptive control

Submitted 23.08.2025, approved after reviewing 14.10.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Devyatkin F.V., Arabadzhiev D.I., Shereuzhev M.A., Dyshekov A.I. Control of a robotic complex in a stochastic uncertain dynamic environment using Petri nets. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 25–38. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-25-38

Введение

Современные робототехнические системы, эксплуатируемые в условиях стохастических возмущений, требуют адаптивных контуров управления, способных обеспечить безопасное взаимодействие человека и робота, решение задач планирования и адаптации траектории, захвата и транспортировки объектов [1–3].

Существует широкий спектр подходов к управлению манипуляторами в условиях неопределенности: методы робастного управления, когда динамика среды или параметры модели отклоняются от номинальных значений [4, 5], что особенно критично для коллаборативных робототехнических комплексов, работающих в тесном контакте с человеком-оператором.

Перспективным направлением считается гибридный подход, сочетающий дискретно-событийное моделирование и вероятностную оценку состояния: цветные сети Петри (Coloured Petri Nets, CPN) компактно описывают параллелизм, синхронизацию и ресурсные ограничения действий робота, тогда как байесовские фильтры (Калмана, частиц, информационный фильтр) обеспечивают статистически согласованную интеграцию разнородных сенсоров [6–8].

Связывание CPN-моделей с байесовским уровнем принятия решений доказало повышение отказоустойчивости, сокращение времени восстановления после сбоев и рост вероятности успешного выполнения миссии роботами в сценариях с наличием неопределенности [9, 10].

В настоящем исследовании предлагается метод управления робототехническим комплексом, в котором цветные сети Петри [3] связываются с алгоритмами байесовской фильтрации сенсорных данных на модельно-алгоритмическом и программно-информационном уровнях. Модельно-алгоритмическая интеграция реализуется так: апостериорные распределения, сформированные байесовским фильтром, динамически преобразуются в маркировку CPN; в свою очередь, текущая маркировка сети определяет выбор управляющего перехода, то есть конкретное действие манипулятора. Программно-информационная интеграция достигается за счет создания единой программной среды, которая предоставляет общее пространство данных для обмена между программными узлами, отвечающими за фильтр и движок моделирования цветной сети Петри.

Цветные сети Петри выбраны в качестве базового формализма [4, 5] благодаря тому, что они естественно представляют параллелизм, синхронизацию событий и ограничения ресурсов, что критически важно для систем с многокомпонентной архитектурой и параллельно выполняемыми задачами [6, 7].

Байесовский фильтр применен для обработки визуальных данных, поскольку он демонстрирует робастность к стохастическим возмущениям и систематическим ошибкам сенсора, что количественно подтверждается уменьшением среднеквадратичной ошибки оценки положения объектов (RMSE) и ростом вероятности корректной классификации.

Построенная вероятностная модель учитывает как шумовые искажения изображений, так и эволюцию скрытых состояний объектов (позиция, ориентация, принадлежность классу) и тем самым обеспечивает устойчивое распознавание сцен в реальном времени. На выходе фильтра формируется апостериорное распределение над дискретным множеством ситуаций, которое через интерфейс обмена данными CPN-движка преобразуется в разрешение конкретного перехода сети Петри. Тем самым инициируется соответствующее управляющее действие манипулятора (задание траекторной подпрограммы).

Предлагаемый метод управления **робототехническими комплексами** демонстрирует универсальность при работе с неполной или зашумленной информацией, как подтвердили натурные и модельные эксперименты, опубликованные в недавних работах. В частности, он успешно применяется к:

– **манипуляционным операциям** в неструктурированных рабочих зонах, где CPN-модель управляет скоординированным движением двух манипуляторов, а байесовский фильтр – объединением данных RGB-D-камер для оценки позы объекта [11];

– **извлечению и сортировке** разнотипных деталей по визуальным признакам (цвет, форма, нанесенная маркировка) с динамической перенастройкой порогов классификации по мере изменения освещения и запыленности сенсоров [12];

– **автоматической адаптации** траекторий захвата при смещении целевых объектов – PF-оценка положения интегрируется в маркировку сети, после чего CPN-контроллер перестраивает граф переходов без перезапуска программы [13];

– **координации многоагентных систем**: CPN-граф компактно описывает распределение подзадач, а вероятностный уровень оценивает задержки связи и вероятность захвата ресурса, что позволило сократить время циклического патрулирования на 18 % по сравнению с LTL-планированием без стохастики [14].

Таким образом, совмещенное использование цветных сетей Петри и байесовской фильтрации подтвержденно повышает робастность и адаптивность управления в широком спектре инженерных сценариев, где данные о состоянии среды доступны лишь частично или с существенными помехами.

Целью работы являются формализация, программная реализация и экспериментальная проверка иерархической системы управления промышленным робототехническим комплексом в условиях стохастической неопределенности динамической среды.

Объект исследования: робототехнический комплекс, включающий манипулятор и систему технического зрения.

Предмет исследования: методы управления манипуляционными операциями в условиях стохастической неопределенности.

Задача: разработать стохастическую модель сенсорной системы с моделью управления на основе цветной сети Петри с программным обеспечением для управления манипулятором с возможностью натурной и симуляционной проверки.

Критерии эффективности:

– вероятность успешного завершения задачи;

– время выполнения цикла манипуляции;

– устойчивость распознавания объектов (RMSE);

– доверительные интервалы и дисперсия оценок.

Научная новизна

В работе:

– развита интеграция цветных сетей Петри и байесовской фильтрации сенсорных данных в единую архитектуру управления;

– введен механизм динамической корректировки маркировки сети на основе вероятностных оценок;

– обоснован выбор порога совпадений (k=10) для подавления ложных срабатываний, что позволило снизить вероятность ошибок ниже 0.03 %;

– показано, что архитектура повышает адаптивность управления манипулятором в условиях стохастической неопределенности по сравнению с классическими методами.

Объект управления

В качестве объекта управления рассматривается робототехнический комплекс, включающий манипулятор со схватом и источник информации о положении целевых объектов – видеокамеру. Сформулируем задачу управления на примере типовой задачи последовательного перемещения объектов манипулятором с учетом того, что робототехнический комплекс функционирует в условиях неопределенного положения объектов в рабочей зоне манипулятора и шумов сенсорных данных.

Рабочее пространство представляет собой ограниченную область, в которой в произвольной начальной конфигурации размещены разноцветные объекты (кубики) (рис. 1).

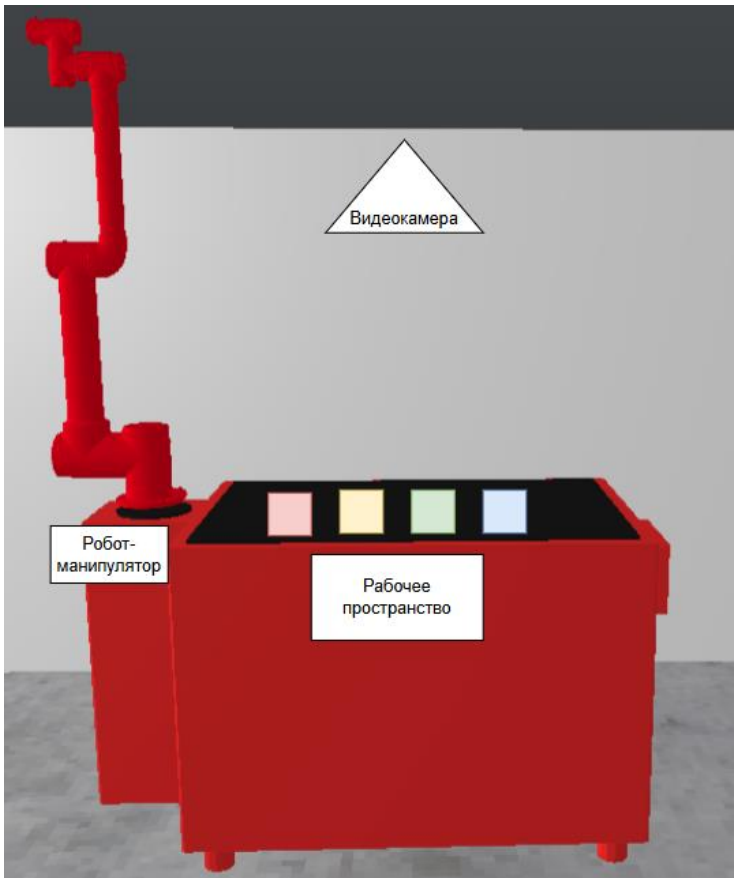


***Рис. 1**. Схема робототехнического комплекса*

***Fig. 1**. Diagram of the robotic complex*

Задача робототехнического комплекса

Задача комплекса заключается в перемещении каждого объекта из начальной позиции в соответствующую конечную позицию согласно заданной конфигурации (табл. 1).

Табл. 1. Конфигурация перемещения кубиков из начальных позиций в конечные

Table 1. Configuration of cube movement from initial to final positions

Программа перемещения кубика	Начальная позиция кубика	Конечная позиция кубика	Цвет перемещаемого кубика
t1	p1	p5	красный
t2	p1	p7	желтый
t3	p1	p8	зеленый
t4	p1	p6	синий
t5	p2	p5	красный
t6	p2	p7	желтый
t7	p2	p8	зеленый
t8	p2	p6	синий
t9	p3	p5	красный
t10	p3	p7	желтый
t11	p3	p8	зеленый
t12	p3	p6	синий
t13	p4	p5	красный
t14	p4	p7	желтый
t15	p4	p8	зеленый
t16	p4	p6	синий

Опишем математические модели элементов системы, а именно манипулятора, модель восприятия визуальной информации о положении объектов (кубиков) и модель верхнего дискретно-событийного уровня системы управления для формирования общей структуры системы управления и реализации программного обеспечения.

Модель восприятия сенсорной информации

В условиях неопределенности и зашумленности сенсорных данных ключевой задачей является корректное определение положения и цвета объектов в рабочей зоне манипулятора. Видеокамера служит основным источником информации, однако ее измерения подвержены погрешностям, связанным с изменением освещенности, частичным перекрытием объектов, оптическими искажениями.

Для повышения надежности восприятия применяется вероятностная модель обработки данных, объединяющая дискретные состояния объектов (цвет и положение), байесовскую фильтрацию для учета шумов, механизм подтверждения измерений для минимизации ошибок.

Каждый объект (кубик) характеризуется дискретным состоянием, включающим:

цвет (красный, желтый, зеленый, синий),
наличие/отсутствие в рабочей зоне (no_color, nothing).

$$x \in \{red, yellow, blue, green, no_color, nothing\}.$$

Начальное распределение вероятностей предполагается равномерным:

$$\hat{p}(x_0 = x) = \frac{1}{6}, \forall x.$$

Изображение с камеры обрабатывается для определения наиболее вероятного состояния объекта. Наблюдение z_t, связано с истинным состоянием x_t через матрицу зашумления (табл. 2):

$$p(z_t|x_t) \in [0,1]^{6\times6},$$

где каждый элемент матрицы задает вероятность ошибочного определения состояния.

Табл. 2. Условная вероятность зашумления изображения, где z_t – измерение в момент *t*, x_t – состояние в момент *t*

Table 2. Conditional probability of image noise, where *z_t* is the measurement at time *t*, *x_t* is the state at time *t*

$z_t \backslash x_t$	red	yellow	blue	green	no_color	nothing
def_red	0.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1
def_yellow	0.05	0.6	0.05	0.05	0.1	0.15
def_blue	0.05	0.05	0.7	0.05	0.05	0.1
def_green	0.05	0.05	0.05	0.6	0.1	0.15
def_no_color	0.05	0.05	0.05	0.05	0.5	0.3
def_nothing	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.9

Для учета временной динамики применяется рекурсивный байесовский фильтр:

$$\hat{p}(x_t|z_{1:t}) = \eta \cdot p(z_t|x_t) \sum_{x_{t-1}} p\,(x_t|x_{t-1}, u_{t-1})\hat{p}(x_{t-1}|z_{1:t-1}),$$

где:

$\hat{p}(x_t|z_{1:t})$ – апостериорная вероятность состояния,

$p(x_t|x_{t-1}, u_{t-1})$ – вероятность перехода в новое состояние,

η – нормализующий множитель.

Измерения цвета на изображении, полученном с камеры, интерпретируются как наблюдение z, соответствующее наиболее выраженному цветовому классу. Апостериорная вероятность состояния после наблюдения вычисляется как:

$$p(x_1) = \frac{p(z_1|x_1) \cdot \hat{p}(x_1)}{n},$$

где $p(z_1|x_1)$ – вероятность получить наблюдение z_1 при истинном состоянии x_1, а n – нормализующий множитель.

На каждом такте наблюдения производится априорная оценка состояния $\widehat{est}(x_1)$ по формуле:

$$\widehat{est}(x_1) = \sum_{x_0} P(x_1|u_1, x_0) \cdot est(x_0),$$

где $est(x_0)$ – априорное распределение вероятностей по состояниям на предыдущем шаге, $P(x_1|u_1, x_0)$ – вероятность перехода в новое состояние при действии u_1 (активация или ее отсутствие).

Динамика изменения состояний зависит от активности манипулятора. В случае действия (перемещение объекта) вероятности переходов заданы в табл. 3. При отсутствии действия (ожидание) предполагается, что состояния остаются неизменными (табл. 4). Подобное разделение позволяет учесть как влияние активных операций, так и естественную стационарность при пассивном наблюдении.

Табл. 3. Вероятности изменения состояний после действия activation, где x_t – состояние до действия, x_{t_1} – состояние после действия

Table 3. Probabilities of state changes after the activation, where x_t is the state before the action, x_(t_1) is the state after the action

$x_t \backslash x_{t_1}$	red	yellow	blue	green	no_color	nothing
red	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.9
yellow	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.9
blue	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.9
green	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.9
no_color	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.9
nothing	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05	0.15

Табл. 4. Вероятности изменения состояний после действия no_activation, где x_t – состояние до действия, x_{t_1} – состояние после действия

Table 4. Probabilities of state changes after the no_activation, where x_t is the state before the action, x_(t_1) is the state after the action

$x_t \backslash x_{t_1}$	red	yellow	blue	green	no_color	nothing
red	1	0	0	0	0	0
yellow	0	1	0	0	0	0
blue	0	0	1	0	0	0
green	0	0	0	1	0	0
no_color	0	0	0	0	1	0
nothing	0	0	0	0	0	1

Для повышения устойчивости к ошибкам изменение маркировки в сети Петри происходит только после 10 последовательных совпадений наиболее вероятного состояния. Выбор порога в 10 последовательных совпадений основан на результатах предварительных экспериментов (N=500 симуляций), показавших, что при меньших значениях (3–7 совпадений) вероятность ложного срабатывания превышает 15 %, тогда как при 10 совпадениях она снижается до 0.024 %. Формально условие записывается как:

$$\begin{cases} \max\limits_{t-k+1 \le i \le t} \hat{x}_i = \hat{x}_t \\ k = 10 \end{cases},$$

где $\hat{x}_i$ – наиболее вероятное состояние в момент i, k – порог совпадений.

Это позволяет отфильтровать случайные шумы и минимизировать ложные срабатывания.

Задача наблюдения формулируется как задача оценки скрытого состояния $x_t \in X$ на основе зашумленных измерений $z_t \in Z$.

Множество состояний:

$$X \in \{red, yellow, blue, green, no_color, nothing\}.$$

Множество измерений:

$$Z \in \{\text{def}_red, \text{def}_yellow, \text{def}_blue, \text{def}_green, \text{def}_no_color, \text{def}_nothing\}.$$

Измеряемые параметры: цвет и наличие объекта в рабочей зоне.

Вычисляемые параметры: апостериорная вероятность состояния $p(x_t|z_{1:t})$ и решение об активации перехода в сети Петри.

Неопределенность в задаче проявляется как шум при измерении:

$$z_t = h(x_t) + \epsilon_t, \qquad \epsilon_t \sim N(0, \sigma^2),$$

где h – функция наблюдения, ϵ_t – аддитивный гауссовый шум.

Преобразование вероятностной оценки в фишку происходит по условиям:

$$M_t(p_i) = \begin{cases} token(c), \text{если c} = \arg\max\limits_{x \in X} p(x_t|z_{1:t}), \max p(x_t) > \theta, \\ \emptyset, \text{иначе.} \end{cases}$$

где: θ – порог достоверности (выбран 0.85 на основании k порога последовательных совпадений); $token(c)$ – фишка цвета c.

Активация перехода t_j происходит по структуре на рис. 2 и условию $\max p(x_t) > \theta$.

Модель верхнеуровневой логики системы управления

Цветная сеть Петри описывается кортежем $\mathcal{N} = (P, T, F, M_0, C)$, где $P = \{p_1, \dots, p_9\}$ – позиции (начальные и конечные для объектов, а также свободное состояние манипулятора), $T = \{t_1, \dots, t_{16}\}$ – переходы, соответствующие перемещениям, F – множество дуг (включая цветные и ингибиторные), M_0 – начальная маркировка, C – набор цветных фишек: {red, blue, yellow, green}.

Каждый переход t_i активируется только в случае наличия соответствующей цветной фишки в начальной позиции, отсутствия фишки в целевой позиции (штрихпунктирные дуги запрещают активацию) или свободного состояния манипулятора.

Для заданной конфигурации позиции [p1 – p8] – расположение кубиков в рабочем пространстве из конфигурации, позиция p9 – манипулятор свободен (черная фишка), [t1 – t16] – переходы подпрограмм, перемещающие кубики (рис. 2). Сплошные цветные дуги перемещают фишки только соответствующего цвета, штрихпунктирные (ингибиторные) пустые дуги в случае присутствия фишек в позициях, откуда они исходят, не дают активировать переход.

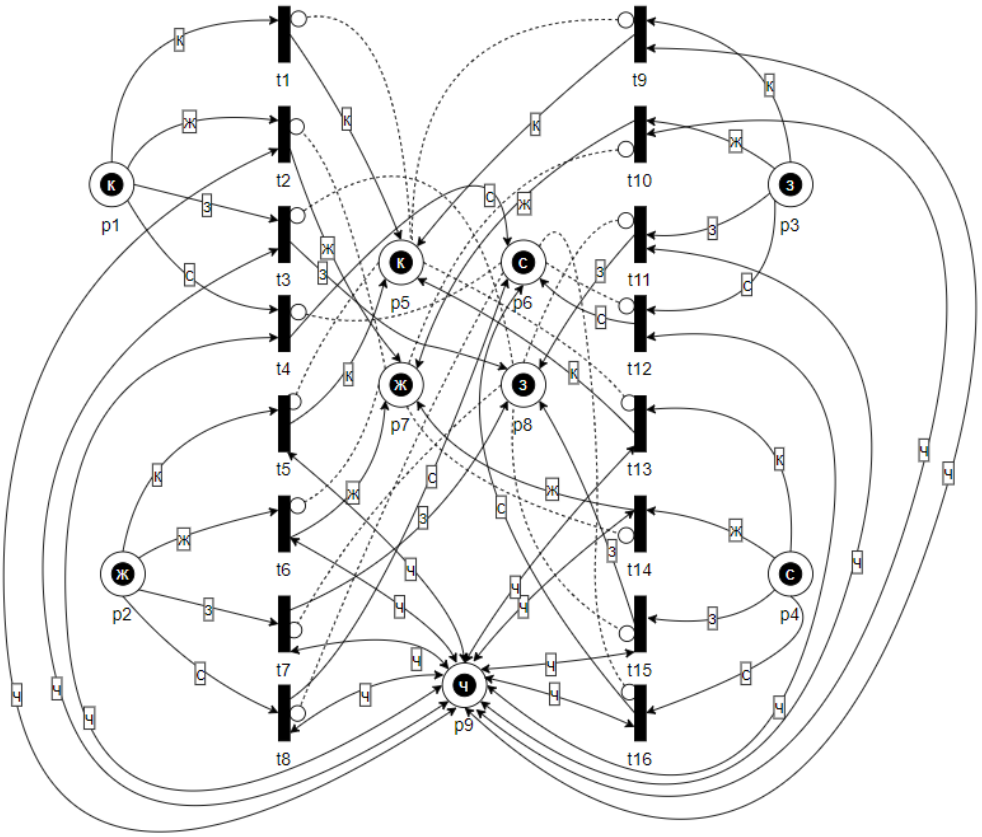


Рис. 2. *Сеть Петри для заданной конфигурации (цветные дуги подписаны первыми буквами цветов)*

Fig. 2. *Petri net for a given configuration (colored arcs are labeled with the first letters of the colors)*

В начальный момент времени начальная конфигурация (p1, p2, p3, p4) неизвестна, наблюдается косвенно через изображение с видеокамеры.

Пусть $O = \{o_1, \ldots, o_n\}$ – множество объектов; $C = \{\text{red}, \text{blue}, \text{yellow}, \text{green}\}$ – множество цветовых классов; $P = \{p_1, \ldots, p_8\}$ – множество возможных позиций объектов; $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^3$ – координаты позиции p_i в пространстве.

Для каждого объекта $o_j \in O$ задана функция цвета $c(o_i) \in C$, а также целевая позиция $g_k \in P$, определяющая, где должен находиться объект в конце выполнения задачи. Алгоритм работы системы интеграции с сетью Петри показан на рисунке 3.

1. ***Получить*** z_t от видеокамеры.
2. ***Вычислить*** $p_k(x_t|z_{1:t})$ *по формуле фильтра.*
3. Если $p_k(x_t) > \theta$ *и текущая оценка цвета совпадает с предыдущими* k *оценками,* ***изменить маркировку****:*
– удалить старую фишку из позиции p_a*,*
– добавить новую фишку $\text{token}(c)$ *в соответствующую позицию.*
4. ***Проверить условия*** *активации переходов по структуре сети Петри (рис. 2) Запустить соответствующую подпрограмму управления манипулятором.*

Рис. 3*. Алгоритм работы системы интеграции с сетью Петри*

Fig. 3*. Algorithm of the integration system with Petri net*

Входные данные: изображения с камеры, априорные вероятности состояний, управляющие воздействия. ***Выходные данные***: номер программы управления манипулятором.

Реализация и экспериментальная верификация

В целях проверки работоспособности предложенной архитектуры управления в условиях неопределенности была реализована программно-аппаратная система на базе манипуляционного комплекса (рис. 5), включающая все ключевые компоненты: цветную сеть Петри, фильтрацию и управляющий модуль. Схема архитектуры показана на рисунке 4.

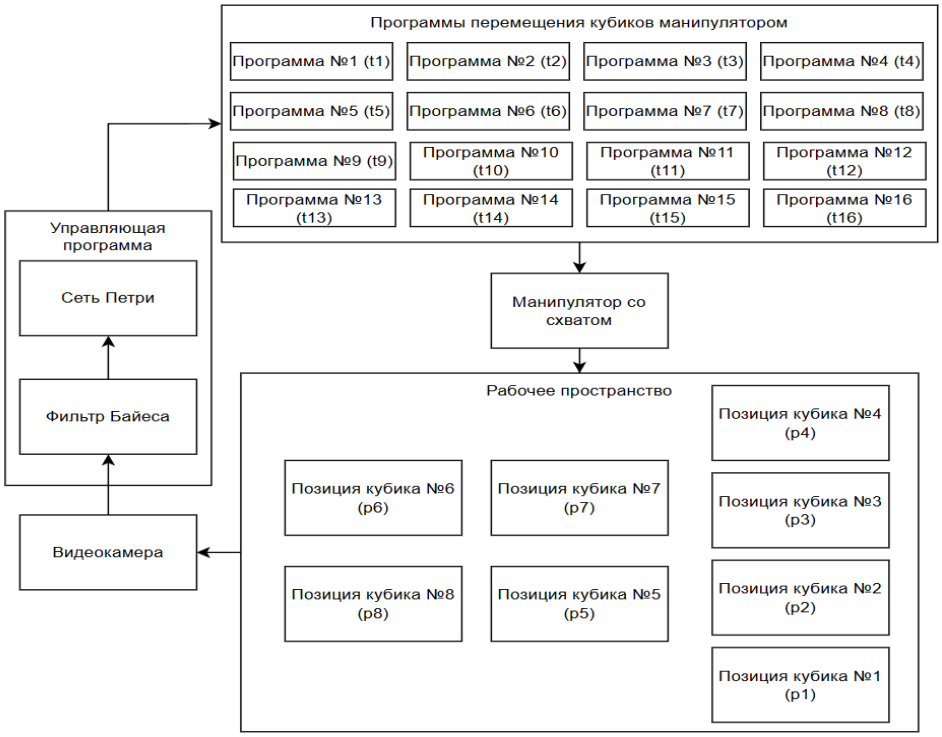


Рис. 4*. Архитектура системы управления / **Fig. 4**. Control system architecture*

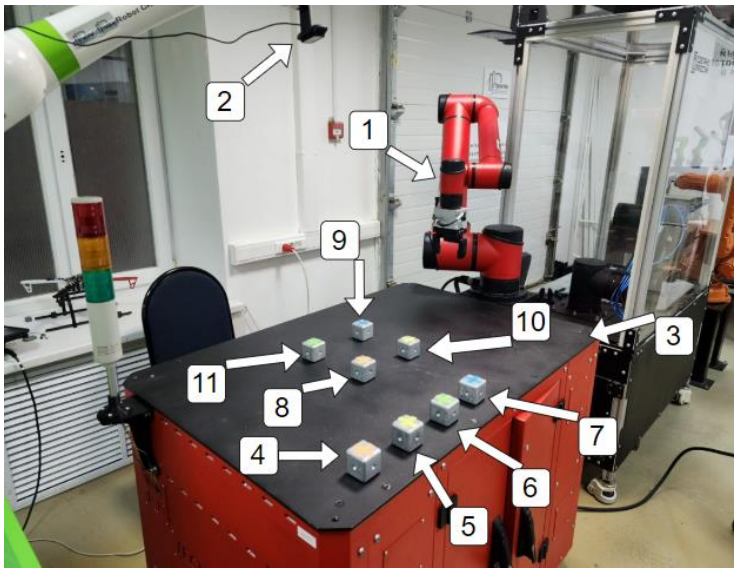


Рис. 5. *Робототехнический комплекс, где 1 – манипулятор со схватом, 2 – видеокамера, 3 – рабочее пространство, 4 – расположение кубика для позиции p1, 5 – расположение кубика для позиции p2, 6 – расположение кубика для позиции p3, 7 – расположение кубика для позиции p4, 8 – расположение кубика для позиции p5, 9 – расположение кубика для позиции p6, 10 – расположение кубика для позиции p7, 11 – расположение кубика для позиции p8 (рис. 6)*

Fig. 5. *Robotic system, where 1 is the manipulator with a gripper, 2 is the video camera, 3 is the workspace, 4 is the cube location for position p1, 5 is the cube location for position p2, 6 is the cube location for position p3, 7 is the cube location for position p4, 8 is the cube location for position p5, 9 is the cube location for position p6, 10 is the cube location for position p7, 11 is the cube location for position p8 (fig. 6)*

Программная реализация выполнена на языке Python 3. Для визуального анализа изображений использована библиотека OpenCV, для численного моделирования – NumPy, SciPy, для символьной и структурной работы с сетью Петри – собственный модуль.

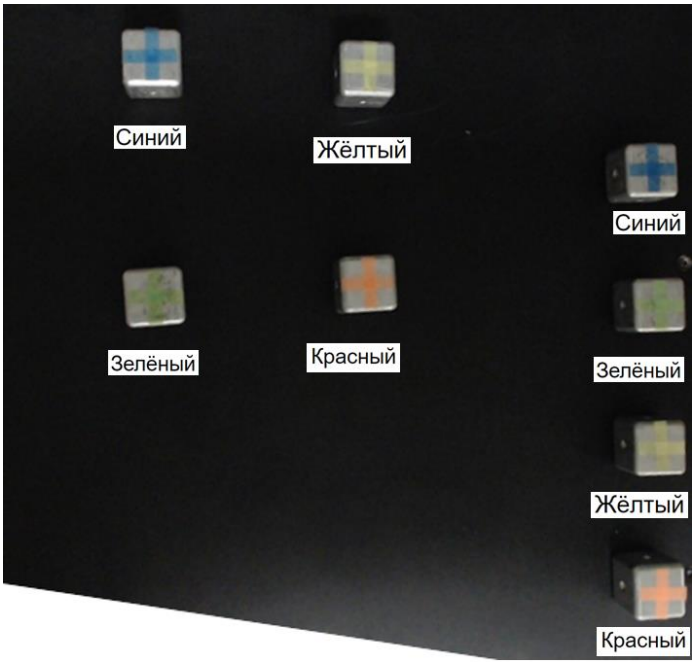


Рис. 6. *Расположение кубиков, соответствующих маркировке на рис. 2*

Fig. 6. *The arrangement of the cubes corresponding to the markings in fig. 2*

Программный комплекс реализует следующую иерархию программных модулей, представленную на рис. 7.

1. **Сенсорный уровень**: захват изображения с камеры.
2. **Восприятие**: применение байесовской фильтрации к каждому потенциальному расположению кубика с учетом матрицы зашумления.
3. **Принятие решения**: активация переходов сети Петри при достаточной достоверности наблюдения.
4. **Управление движением**: активация подпрограммы.
5. **Обратная связь**: подтверждение успешного перемещения и обновление маркировки сети.

Рис. 7. *Структура программного комплекса разработанной системы управления*

Fig. 7*. Structure of the software package of the developed control system*

Цель экспериментов: проверить эффективность предложенного метода управления при шумовых и динамических возмущениях.

Метрики: RMSE распознавания объектов, вероятность ложного срабатывания, время цикла манипуляции.

Условия экспериментов:

– N = 500 симуляций в среде Gazebo;

– 30 натурных экспериментов на шестизвенном манипуляторе;

– варьирование уровня шума σ = 0,05…0,2.

Результаты:

– вероятность ложного распознавания <0,03;

– сокращение времени цикла на 15 %;

– доверительный интервал успешности [0,92; 0,98] при доверии 95 %.

Эксперименты проведены в 100 симуляционных и 20 реальных тестах. В симуляционных тестах точность определения цвета оставила 96,8 %, среднее время реакции системы – 1,4 с, в реальных – 98,4 % и 5,7 с при $\theta = 0{,}85$ и $k = 10$.

Заключение

В данной работе предложен подход к управлению робототехническим комплексом, функционирующим в условиях неопределенности и динамически изменяющейся среды, на основе раскрашенных сетей Петри и байесовской обработки сенсорных данных. Разработанная система сочетает в себе формальную строгость описания дискретных состояний сети Петри с возможностью адаптивного принятия решений на основе вероятностных оценок, что позволяет достигать устойчивого поведения манипулятора при неизвестной начальной конфигурации объектов. Введенный механизм фильтрации наблюдений повышает надежность системы в условиях шумных входных данных, а структура сети обеспечивает гибкость при изменении целевых задач.

Результаты моделирования и экспериментальной реализации подтверждают эффективность предложенной архитектуры для решения задач адаптивного управления в реальном времени. Данный подход может быть использован в дальнейшем при построении интеллектуальных систем управления робототехническими платформами, работающими в сложных, слабо структурированных или частично наблюдаемых средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic robotics. MIT Press, 2005. 647 p. DOI: 10.1162/artl.2008.14.2.227

2. Lima P.U. A Bayesian approach to sensor fusion in autonomous sensor and robot networks. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine.* 2007. Vol. 10. No. 3. Pp. 22–27. DOI: 10.1109/MIM.2007.4284253

3. Park B.H., Kuc T.Y., Lee J.S. Adaptive learning control of uncertain robotic systems. International Journal of Control. 1996. Vol. 65. No. 5. Pp. 725–744. DOI: 10.1080/00207179608921719

4. Zhang Y.Y. et al. Adaptive control for robots to handle uncertainties, delays and state constraints. *IFAC PapersOnLine.* 2023. Vol. 56. No. 2. Pp. 1234–1240. DOI: 10.1109/TCYB.2015.2411285

5. Ziparo V.A. et al. Petri net plans: A framework for collaboration and coordination in multi-robot systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems.* 2011. Vol. 23. No. 3. Pp. 344–383. DOI: 10.1007/s10458-010-9146-1

6. Westergaard M. Verifying parallel algorithms and programs using coloured petri nets. Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency VI - Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. Pp. 146–168. DOI: 10.1007/978-3-642-35179-2_7

7. Westergaard M., Maggi F.M. Modeling and verification of a protocol for operational support using coloured Petri nets. *International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. Pp. 169–188. DOI: 10.1007/978-3-642-21834-7_10

8. Wang R., Kristensen L.M., Stolz V. MBT/CPN: a tool for model-based software testing of distributed systems protocols using coloured Petri nets. *International Conference on Verification and Evaluation of Computer and Communication Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2018. Pp. 97–113. DOI: 10.1007/978-3-030-00359-3_7

9. Liu Q. et al. A Logic Petri net model for dynamic multi agent game decision making. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2024. Vol. 127. Pp. 107–120. DOI: 10.1016/j.dajour.2023.100320

10. Pająk M. Assessment of using bayesian nets and Petri nets in additive manufacturing technology selection. *Procedia CIRP.* 2021. Vol. 99. Pp. 123–130. DOI: 10.35784/acs-2021-01

11. Hu F., Wang W., Zhou J. et al. Petri nets based digital twin drives dual arm cooperative manipulation. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 147. Art. 103880. DOI: 10.1016/j.compind.2023.103880

12. Castellano-Quero M., Castillo-López M., Fernández-Madrigal J.A. et al. A multidimensional Bayesian architecture for real time anomaly detection and recovery in mobile robot sensory systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 125. Art. 106673. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106673

13. Zhong X., Zhong X., Hu H., Peng X. A nonparametric learning visual servoing framework for robot manipulator in unstructured environments. *Neurocomputing.* 2021. Vol. 452. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.neucom.2021.01.02

14. Lv P., Luo G., Ma Z., Li S., Yin X. Optimal multi robot path planning for cyclic tasks using Petri nets. *Control Engineering Practice.* 2023. Vol. 138. Art. 105600. DOI: 10.1016/j.conengprac.2023.105600

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:
Девяткин Ф. В. – моделирование, написание ПО;
Арабаджиев Д. И. – проведение эксперимента, обработка результатов;
Шереужев М. А. – разработка математического аппарата;
Дышеков А. И. – разработка модуля API управления роботом-манипулятором.

Author's contribution:
Devyatkin F. V. – modeling, software development;
Arabadzhiev D. I. – experiment execution, results processing;
Shereuzhev M. A. – mathematical apparatus development;
Dyshekov A. I. – robotic arm control API module development.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSFS-2024-0012).

Funding. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSFS-2024-0012).

Информация об авторах

Девяткин Фёдор Владимирович, аспирант СМ7, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1;
инженер (НТР), Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1;
feodor-dev@ya.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2639-9521, SPIN-код: 7738-5724
Арабаджиев Денис Игоревич, аспирант СМ7, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1;
инженер (НТР), Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1;
denisarabadzhiev13@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5023-4073
Шереужев Мадин Артурович, канд. тех. наук, доцент, заведующий лабораторией, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1;
доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1;
shereuzhev@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2352-992X, SPIN-код: 1734-9056
Дышеков Артур Изнаурович, канд. тех. наук, ведущий инженер, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1;
a.I.dyshekov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4865-5041, SPIN-код: 1159-0974

Information about the authors

Fedor V. Devyatkin, Postgraduate Student ME7, Bauman Moscow State Technical University;
5, buld. 1, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia;
Engineer (NTR), Moscow State University of Technology “STANKIN”;
1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia;
feodor-dev@ya.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2639-9521, SPIN-code: 7738-5724
Denis I. Arabadzhiev, Postgraduate Student ME7, Bauman Moscow State Technical University;
5, buld. 1, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia;
Engineer (NTR), Moscow State University of Technology “STANKIN”;
1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia;
denisarabadzhiev13@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5023-4073
Madin A. Shereuzhev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Laboratory, Moscow State University of Technology “STANKIN”;
1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia;
Associate Professor, Department of Robotic systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University;
5, build. 1, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia;
shereuzhev@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2352-992X, SPIN-code: 1734-9056
Artur I. Dyshekov, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Moscow State University of Technology “STANKIN”;
1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia;
a.I.dyshekov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4865-5041, SPIN-code: 1159-0974

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 303.732.4+519.2 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-39-56
RHAWWM

Сравнительное статистическое моделирование динамических рядов при прогнозировании суточного электропотребления на языках Python, R, C#, C++, Go, Java

А. Э. Дзгоев✉[1], Сян Хуа[2], А. Д. Лагунова[1], Я. А. Копылова[1], Д. В. Морозов[1], Я. В. Мажей[1], А. В. Брайловский[1], Д. А. Юдин[1], Р. Аллабергенов[1]

[1]МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78
[2]Пекинский политехнический институт
100811, Китайская народная республика, г. Пекин, ул. Чжунгуаньцунь, 5, Вэйгунцунь, Бэй Цзин Ши, район Хайдянь

Аннотация. Прогнозирование электропотребления является для энергокомпаний важным инструментом обеспечения стабильности и экономической эффективности работы энергосистемы государства. Для крупных промышленных предприятий корректный прогноз позволяет оптимизировать производственные затраты и избежать финансовых потерь из-за небалансов и высоких тарифов на электроэнергию.

Цель исследования – построить подробный пошаговый алгоритм по разработке адекватной математической модели для почасового прогнозирования электропотребления на предприятии, используя способ статистического анализа динамических рядов на различных языках программирования.

Материалы и методы. Алгоритм моделирования и прогнозирования основан на классическом методе наименьших квадратов (МНК) для малой выборки данных, а также на методе скользящей матрицы. Математический аппарат метода обработки данных был реализован с применением инженерного программного продукта Mathcad Express. Показаны особенности реализации метода обработки данных с помощью современных языков программирования: Python, R, C#, C++, Go и Java.

Результаты. Авторами был реализован алгоритм расчета суточного прогнозирования электропотребления по классическому методу скользящей матрицы на языках программирования Python, R, C#, C++, Go и Java для последующего сравнения программного кода. Показаны результаты сравнения программных реализаций алгоритма прогнозирования по следующим критериям: количество строк и время выполнения кода, использование внешних ресурсов, поддержка параллелизма, объем кода (в символах). На конкретных примерах было показано, что выбор языка программирования зависит от решаемой исследователями и разработчиками задачи. Статистически доказана адекватность разработанной регрессионной модели и проведена проверка качества уравнения. Рассчитаны доверительные интервалы коридора ошибок прогнозной модели.

Выводы. Проведенное исследование показало, что задача системного анализа данных и прогнозирования электропотребления эффективно решена на языке программирования Python. Программный код реализации классического метода скользящей матрицы представлен в открытом репозитории на GitHub по ссылке: https://github.com/CollaborativeProgrammingTeam/Method-of-Classical-sliding-matrix.

© Дзгоев А. Э., Сян Хуа, Лагунова А. Д., Копылова Я. А., Морозов Д. В., Мажей Я. В., Брайловский А. В., Юдин Д. А., Аллабергенов Р., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Ключевые слова: классический метод скользящей матрицы, математическая статистика, адекватная регрессионная модель, оценка качества, прогнозирование электропотребления, сравнение языков программирования, задача регрессии, сравнительная программная реализация

Поступила 11.10.2025, одобрена после рецензирования 18.11.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Дзгоев А. Э., Сян Хуа, Лагунова А. Д., Копылова Я. А., Морозов Д. В., Мажей Я. В., Брайловский А. В., Юдин Д. А., Аллабергенов Р. Сравнительное статистическое моделирование динамических рядов при прогнозировании суточного электропотребления на языках Python, R, C#, C++, Go, Java // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 39–56. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-39-56

MSC: 65Y04, 62M07, 62M20 Original article

Comparative statistical modeling of dynamic series for forecasting daily electricity consumption in Python, R, C#, C++, Go, and Java

A.E. Dzgoev[✉1], Xiang Hua[2], A.D. Lagunova[1], Ya.A. Kopylova[1], D.V. Morozov[1], Ya.V. Mazhey[1], A.V. Brailovsky[1], D.A. Yudin[1], R. Allabergenov[1]

[1]MIREA – Russian Technological University
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia
[2]Beijing Institute of Technology
5, Zhongguancun street, Weigongcun, Bei Jing Shi, Haidian District, Beijing, 100811, China

Abstract. Forecasting electricity consumption is an important tool for energy companies to ensure the stability and economic efficiency of the national energy system. For large industrial enterprises, accurate forecasting allows them to optimize production costs and avoid financial losses due to imbalances and high electricity tariffs.

Aim. The study is to construct a detailed step-by-step algorithm for developing an adequate mathematical model for hourly forecasting of electricity consumption at an enterprise, using the method of statistical analysis of dynamic series in various programming languages.

Materials and methods. The modeling and forecasting algorithm is based on the classical ordinary least squares (OLS) method for small data samples, as well as the moving matrix method. The mathematical apparatus of the data processing method was implemented using the Mathcad Express engineering software. The implementation of the data processing method using modern programming languages is demonstrated: Python, R, C#, C++, Go, and Java.

Results. The authors implemente an algorithm for calculating daily electricity consumption forecasts using the classical sliding matrix method in Python, R, C#, C++, Go, and Java for subsequent code comparison. The authors present the results of a comparison of the forecasting algorithm implementations based on the following criteria: number of lines of code and execution time, use of external resources, parallelism support, and code size (in characters). Specific examples demonstrate that the choice of programming language depends on the problem being solved by researchers and developers. The adequacy of the developed regression model is statistically proven, and the equation quality is verified. Confidence intervals for the error corridor of the forecast model have been calculated.

Conclusions. The study demonstrate that the task of system data analysis and energy consumption forecasting is effectively solved using the Python programming language. The code for implementing the classical sliding matrix method is available in an open repository on GitHub at the following link: https://github.com/CollaborativeProgrammingTeam/Method-of-Classical-sliding-matrix.

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

***Keywords**:* classical sliding matrix method, mathematical statistics, adequate regression model, quality assessment, forecasting of power consumption, comparison of programming languages, regression problem, comparative software implementation

Submitted 11.10.2025, approved after reviewing 18.11.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Dzgoev A.E., Xiang Hua, Lagunova A.D., Kopylova Ya.A., Morozov D.V., Mazhey Ya.V., Brailovsky A.V., Yudin D.A., Allabergenov R. Comparative statistical modeling of dynamic series in forecasting daily electricity consumption in Python, R, C#, C++, Go, Java // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 39–56. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-39-56

Введение

Данные являются важнейшим элементом при моделировании и прогнозировании электропотребления в регионе, так как содержат в себе ценную и полезную информацию. В настоящее время наблюдается тренд на использование больших объемов данных при выполнении исследований в различных областях, в том числе в электроэнергетике. Объясняется это тем, что в больших объемах данных можно обнаружить такие зависимости, которые сложно было бы идентифицировать в малой выборке данных. Применяя различные методы машинного обучения и искусственного интеллекта, исследователи получают качественные модели с ошибкой прогнозирования менее 5 % [1–3]. Достигается это благодаря нахождению таких факторов, которые действительно влияют на потребление электроэнергии на конкретном объекте исследования, а также научно обоснованному разведочному анализу данных: включая определение плотности распределения вероятностей, проверки ряда на стационарность, интеркорреляцию и автокорреляцию. Это играет важную роль при выборе метода машинного обучения, так же, как и подбор гиперпараметров на этапе обучения моделей. Исследователи разрабатывают модели, полезные для прогнозирования электропотребления, но некоторые из таких моделей сложно интерпретировать, что вызывает трудности в понимании того, как именно работает модель, без использования дополнительных источников литературы и специальных знаний в том или ином методе машинного обучения.

В то же время необоснованно отходят на второй план исследования, проводимые на малой выборке данных, по которой можно создать адекватные аппроксимирующие функции и получить прогноз на будущий период [4, 5]. Иногда слишком большой объем данных не так актуален для оперативного прогнозирования электропотребления, например, на 1 час или на 30 минут. В условиях продолжающейся ограниченности имеющихся производственных данных у исследователей, необходимых для проведения моделирования, полезными являются малые выборки данных, основанные на динамических рядах [4]. Так как потребление электроэнергии изменяется во времени, можно сказать, что различные значения электропотребления, изменяющиеся во времени, являются динамическими рядами.

В современных научных исследованиях большое внимание уделяется проблеме системного анализа и статистического моделирования [6] динамических рядов для прогнозирования электроэнергетических процессов, таких как потребление электроэнергии, с целью управления энергосистемами [7].

Одним из эффективных способов для решения подобных задач является нахождение аппроксимирующей функции, адекватно описывающей экспериментальные данные [8]. В области прикладного оперативного прогнозирования потребления электроэнергии возможности выбора метода аппроксимации экспериментальных данных достаточно широки: от планирования эксперимента и классического метода наименьших квадратов (МНК) до машинного обучения и использования нейронных сетей [9, 10].

Классический МНК целесообразно использовать для прогнозирования суточного электропотребления в стабильных, линейных системах, когда известно, что сильное влияние на целевую переменную (*Y*) оказывают хорошо измеримые признаки, например, время (*X1, сутки*) и температура воздуха (*X2,* ^0C). МНК предполагает, что связь между целевой зависимой переменной *Y* (потребление энергии, *кВт·ч., МВт·ч.*) и независимыми переменными (факторами) является линейной (может быть добавлен квадрат значения хотя бы одной независимой переменной). МНК полезен, когда исследователей интересует не только прогнозное значение электропотребления, но и объяснение влияния факторов, т.е. как именно различные факторы влияют на прогноз. Модели, разработанные по МНК, стабильно работают на малых выборках данных, где другие модели переобучаются [11].

Методы машинного обучения для моделирования и прогнозирования электропотребления применяются, когда у исследователей есть большой объем данных (при малой выборке возможно переобучение моделей) со множеством значений факторов, влияющих на зависимую переменную. Методы машинного обучения позволяют моделировать потребление электроэнергии с учетом сложных нелинейных зависимостей от года, типа дня (рабочий/выходной), а также их взаимодействия [12, 13].

Математические модели, разработанные с применением нейронных сетей и программного продукта Matlab [10], способны моделировать сложные временные зависимости и обучаться на сотнях тысяч наблюдений. Когда у исследователей есть множество временных рядов одновременно (потребление электроэнергии, скорость ветра, влажность, температура воздуха), используют нейронные сети для многомодельного прогнозирования [14].

В данном исследовании показан алгоритм работы разработанного способа статистического анализа динамических рядов (метода скользящего окна) [15], который позволяет обновлять коэффициенты в уравнении при каждом последующем шаге прогноза. Метод скользящего окна позволяет адаптировать регрессионную модель к новым фактическим данным факторов (*X1, X2, ... Xn*) и целевой переменной (*Y*). Также необходимо отметить, что несмотря на то, что в энергетических и производственных компаниях предусматривается использование мощных вычислительных средств для решения задач оперативного прогнозирования потребления электроэнергии и управления энергосистемами, алгоритм функционирования метода скользящей матрицы является экономичным в отношении использования как машинного времени, так и оперативной памяти ЭВМ.

В настоящей работе представлена сравнительная программная реализация процесса разработки адекватной и качественной математической модели для прогнозирования потребления электроэнергии с применением метода статистического анализа динамических рядов (скользящая матрица) [15] на современных языках программирования: Python, Java, C++, C#, R, Go. С научно-исследовательской и практической точки зрения важно найти оптимальное соотношение скорости разработки, производительности и поддерживаемости для конкретной модели с целью выбора оптимального языка программирования при написании кода программного продукта для прогнозирования электропотребления для энергетических и производственных предприятий [16–18].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ РЯДОВ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Авторами было проведено исследование на реальных фактических данных суточного электропотребления, которые были предоставлены энергетической компанией ПАО «Россети Северный Кавказ». Имеющиеся фактические значения суточного электропотребления представлены в таблице 1, где Y – целевая переменная (*кВт·ч*), τ – время (сутки).

Таблица 1. Суточное электропотребление Y (кВт·ч) и время τ (сутки)

Table 1. Daily electricity consumption Y (kWh) and time (day)

τ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y	2357,85	2669,7	2669,7	2998,05	3512,85	3542,55	3248,85	3341,25	3453,45	3598,65
τ	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Y	3413,85	4271,85	4393,95	3686,1	3682,8	3550,8	4719	3979,35	4131,6	4141,5

Коэффициент корреляции между суточным электропотреблением и признаком времени $corr(\tau, Y) = 0{,}832$ оказался статистически значимым на уровне значимости $\lambda = 0{,}05$ с доверительной вероятностью 95 %, расчет которой представлен по формуле:

$$p = (1-\lambda)\cdot 100\% = 95{,}0\%.$$

Исследование влияния факторов позволило сделать вывод, что температура воздуха (^0C) влияет на электропотребление, что связано со следующими факторами:

1. Чем выше температура воздуха, тем больше сопротивление проводника прохождению электрического тока. Расчет показал, что увеличение температуры на 10 % вызывает увеличение удельного сопротивления проводника в среднем на 4 % [19, 20].

2. Использование воздушных сплит-систем (кондиционеров).

Далее представлены этапы разработки модели и метода скользящей матрицы.

Шаг 1. *Подготовка исходных матриц и расчет коэффициентов уравнения*

Для разработки регрессионной модели прогнозирования проведен экспериментальный расчет, в котором была создана матрица признаков X и матрица-столбец целевой переменной Y, где количество строк $N = 20$, количество коэффициентов в уравнении $k = 5$, которые представлены на рисунке 1.

Матрица признаков

X0	X1	X1²	X2	X1·X2
1	1	1	21.5	21.5
1	2	4	21.2	42.4
1	3	9	22.1	66.3
1	4	16	25.1	100.4
1	5	25	26.4	132
1	6	36	22.6	135.6
1	7	49	17.7	123.9
1	8	64	18.5	148
1	9	81	21.2	190.8
1	10	100	20.3	203
1	11	121	17	187
1	12	144	19.2	230.4
1	13	169	19.4	252.2
1	14	196	21.9	306.6
1	15	225	25.5	382.5
1	16	256	26.3	420.8
1	17	289	26.3	447.1
1	18	324	24.7	444.6
1	19	361	21.4	406.6
1	20	400	21.04	420.8

Матрица-столбец значений целевой переменной

Y, кВт·ч.
2357.85
2669.7
2669.7
2998.05
3512.85
3542.55
3248.85
3341.25
3453.45
3598.65
3413.85
4271.85
4393.95
3686.1
3682.8
3550.8
4719
3979.35
4131.6
4141.5

Рис. 1. *Исходные матрицы* / ***Fig. 1***. *Initial matrices*

На рисунке 1 столбцы матрицы признаков *X* означают: *X0* – фиктивная переменная (для формирования свободного члена уравнения B_0); *X1* – независимая переменная (сутки); $X1^2$ – независимая переменная (сутки^2); *X2* – температура воздуха (^0C), средняя за каждые сутки, а также векторное произведение двух факторов *X1·X2*.

Коэффициенты регрессионного уравнения были рассчитаны по формуле:

$$B := (X^T X)^{-1} X^T Y, \tag{1}$$

где *B* – коэффициенты регрессионного уравнения.

В результате вычисления формулы (1) получены следующие коэффициенты регрессии и модель:

$$B = \begin{pmatrix} 275,504 \\ 353,048 \\ -5,165 \\ 89,955 \\ -7,074 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix}$$ Коэффициенты модели.

Разработанная модель с рассчитанными коэффициентами представлена уравнением (двухфакторный неполный полином второй степени):

$$Y = \underset{B_0}{275,504} + \underset{B_1}{353,048} \cdot X1 - \underset{B_2}{5,165} \cdot X1^2 + \underset{B_3}{89,955} \cdot X2 - \underset{B_4}{7,074} \cdot X1 \cdot X2. \tag{2}$$

Из уравнения регрессии следует, что суммарное влияние двух последних членов при любом сочетании времени и температуры ведет к увеличению потребления электроэнергии.

Шаг 2. *Оценка адекватности и качества разработанной математической модели*

Для вычисления расчетного значения зависимой переменной (*YR*) (потребление электроэнергии) необходимо умножить исходную матрицу независимых переменных с фактическими значениями *X* на рассчитанные коэффициенты математической модели *B*:

$$YR := X \cdot B.$$

Расчет дисперсии адекватности (*Dad*) был выполнен по следующей формуле:

$$Dad := \frac{\sum (Y - YR)^2}{N - k}, \; Dad = 1,054 \cdot 10^5.$$

Для расчета дисперсии зависимой переменной (*DY*) необходимо вычислить среднюю арифметическую целевой переменной (*YSR*):

$$YSR := \frac{\sum Y}{N}, \; YSR = 3,568 \cdot 10^3.$$

Из следующей формулы вычислено значение *DY*:

$$DY := \frac{\sum (Y - YSR)^2}{N - 1}, \; DY = 3,655 \cdot 10^5.$$

Далее проведена проверка модели на адекватность исходным фактическим данным, для этого вычислено расчетное значение *F-статистики* (*FR*) и сопоставлено с табличным значением *F-критерия Фишера* (*F*):

$$FR := \frac{DY}{Dad}, \; FR = 3,467,$$

$$F := qF(0{,}95, N-1, N-k),\ F = 2{,}34.$$

По результатам оценки адекватности модели авторами был сделан следующий вывод: в связи с тем, что *расчетное значение F-критерия Фишера–Снедекора > табличного значения F-критерия Фишера–Снедекора,* разработанная математическая модель признана адекватной экспериментальным данным по суточному электропотреблению на уровне значимости α = 0,05, что соответствует доверительной вероятности

$$p = (1–0{,}05)\cdot 100 = 95{,}0\ \%.$$

Для определения тесноты связи между фактическими значениями целевой переменной *Y* и расчетными значениями целевой переменной (*YR*) авторами рассчитан коэффициент корреляции $corr(Y, YR) = 0{,}879$, который говорит о качественном уравнении регрессии.

Шаг 3*. Прогнозирование суточного электропотребления*

Проведена оценка значимости коэффициентов модели.

Для проверки значимости коэффициентов регрессии построим матрицу, обратную матрице нормальных уравнений (1), по формуле:

$$G := (X^T X)^{-1}.$$

$$G = \begin{pmatrix} 24.733 & -2.083 & 0.011 & -1.066 & 0.082 \\ -2.083 & 0.204 & -1.44\times10^{-3} & 0.087 & -7.597\times10^{-3} \\ 0.011 & -1.44\times10^{-3} & 6.279\times10^{-5} & -2.657\times10^{-4} & 6\times10^{-6} \\ -1.066 & 0.087 & -2.657\times10^{-4} & 0.047 & -3.632\times10^{-3} \\ 0.082 & -7.597\times10^{-3} & 6\times10^{-6} & -3.632\times10^{-3} & 3.293\times10^{-4} \end{pmatrix}$$

Рис. 2*. Матрица, обратная матрице нормальных уравнений*

Fig. 2*. The inverse matrix of the normal equation matrix*

Затем определим доверительные интервалы для всех коэффициентов регрессии:

$$t := qt(0{,}975, N-k) = 2{,}131,$$

где *t* – табличное значение критерия Стьюдента:

$$\Delta i := t\sqrt{Dad \cdot G_{i,j}}\ .$$

В результате проведенных расчетов было определено, что отдельные коэффициенты регрессии оказались незначимыми при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$, но так как модель в целом оказалась адекватной экспериментальным данным ($FR>F$), все коэффициенты решено было оставить в уравнении. Исследователь имеет право оставить в уравнении все коэффициенты. Исключение отдельных коэффициентов уравнения позволяет увеличить расчетное значение *F-критерия*, вследствие чего уравнение как бы становится более адекватным, но в действительности прогнозирующее свойство уравнения ухудшается.

Рассчитаем ошибку прогноза:

$$D := X \cdot (X^T X)^{-1} X^T,$$

далее находим доверительный интервал коридора ошибок:

$$S_{i,i} := t \cdot \sqrt{Dad \cdot (1 + D_{i,i})}.$$

Запишем значения независимых переменных в прогнозной точке (прогнозирование на следующий 21-й день):

$X_1 := 21$ – следующий прогнозный день $(X_1 = X_1 + 1)$;

$X_2 := 21{,}3$ – прогнозная температура на 21-й день.

Создадим вектор независимых переменных в прогнозной точке и выполним транспонирование:

$$XP:=(X_0, X_1, X_1^2, X_2, X_1 \cdot X_2);$$

$$XP^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 21 \\ 441 \\ 21.3 \\ 447.3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 275.504 \\ 353.048 \\ -5.165 \\ 89.955 \\ -7.074 \end{pmatrix}.$$

По разработанному уравнению регрессии (2) находим прогнозное значение электропотребления на 21-й день:

$$Y_Прогноз = 275{,}504 + 353{,}048 \cdot X_1 - 5{,}165 \cdot X_1^2 + 89{,}955 \cdot X_2 - 7.074 \cdot X_1 \cdot X_2 = 4163\ кВт{\cdot}ч.$$

Проведем расчет верхнего и нижнего предела прогнозных значений потребления электроэнергии: $S_{20,20} = 857{,}501$,

$$Y\max := YP + S_{20,20},$$

$$Y\max = 5{,}021 \cdot 10^3\ кВт{\cdot}ч.,$$

$$YP = 4.163 \cdot 10^3,$$

$$Y\min := YP - S_{20,20},$$

$$Y\min = 3{,}306 \cdot 10^3\ кВт{\cdot}ч.$$

Шаг 4. *Математическое описание метода скольжения матриц*

Метод скользящей матрицы заключается в добавлении в матрицу новых фактических данных и удалении самой старой строки данных, что позволяет непрерывно обновлять коэффициенты регрессионного уравнения на каждом следующем шаге прогнозирования [15]. Метод позволяет матрицам данных избавляться от неактуальной и зашумленной информации, что чувствительно на малых выборках данных при проведении аппроксимации.

Далее рассмотрим математический аппарат работы метода скользящей матрицы [8].

Пусть мы имеем матрицу признаков *X* и матрицу-столбец целевой переменной *Y, X1* – вектор независимых переменных, включенный в *X:*

$$X1 := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}, \quad X := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 3 \\ 1 & 4 & 2 \\ 1 & 5 & 4 \end{pmatrix}, \quad Y := \begin{pmatrix} 1.2 \\ 2.3 \\ 2.8 \\ 3.9 \\ 5.1 \end{pmatrix}.$$

Рассчитаем коэффициент корреляции: $corr(X1, Y) = 0.992$. Рассчитаем коэффициенты математической модели:

$$B := \left(X^T \cdot X\right)^{-1} \cdot X^T \cdot Y, \qquad B = \begin{pmatrix} 0,26 \\ 0,939 \\ -6,061 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}.$$

Рассчитаем расчетное значение зависимой переменной *Y:*

$$YR := X \cdot B, \qquad YR = \begin{pmatrix} 1,169 \\ 2,133 \\ 3,06 \\ 4,005 \\ 4,933 \end{pmatrix}, \qquad corr(Y, YR) = 0,992.$$

Рассчитаем дисперсию адекватности:

$$Dad := \frac{\sum (Y - YR)^2}{N - k}, \qquad Dad = 0,068.$$

Пусть Z – вектор независимых переменных в прогнозной точке (новые фактические значения признаков):

$Z := (1 \quad 6 \quad 6)$. Значения признаков *в прогнозной точке (т.е. следующая строка в матрице – фактические значения независимых переменных X в прогнозной точке).*

Тогда XP := Z·B, XP = 5.86 , Z1 := XP.

Пусть *Z1* – значение целевой переменной, полученной подстановкой Z в уравнение регрессии.

Тогда удаляем самую старую строку (самую первую строку) в матрицах и добавляем в конец матриц значения признаков и значение целевой переменной в прогнозной точке, т.е. Z и *Z1*:

$Z := (1 \quad 6 \quad 6)$ $\qquad$ $Z1 := (5,86)$

$N := rows(X)$ $\quad N = 5$ $\qquad$ $N1 := rows(Y)$ $\quad N1 = 5$

$k := cols(Z)$ $\quad k = 3$ $\qquad$ $k1 := cols(Z1)$ $\quad k1 = 1$

$i := 1..N - 1$ $\quad j := 0..k - 1$ $\qquad$ $i1 := 1..N1 - 1$ $\quad j1 := 0..k1 - 1$

$X_{i-1,j} := X_{i,j}$ $\qquad$ $Y_{i1-1,j1} := Y_{i1,j1}$

$X_{N-1,j} := (Z^T)_j$ $\qquad$ $Y_{N1-1,j1} := (Z1^T)_{j1}$.

В матрицах после преобразований (произошло удаление самой первой строки и добавление новой строки [21] в конец матриц) отсутствует первая строка и добавлена последняя строка:

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 3 \\ 1 & 4 & 2 \\ 1 & 5 & 4 \\ 1 & 6 & 6 \end{pmatrix} \qquad Y := \begin{pmatrix} 2,3 \\ 2,8 \\ 3,9 \\ 5,1 \\ 5,86 \end{pmatrix}.$$

Преимущество метода скользящей матрицы заключается в том, что разработанная математическая модель постоянно переобучается на новых, добавляемых фактических данных, обновляя коэффициенты в регрессионном уравнении.

Для выбора наилучшего языка программирования для решения данной задачи анализа данных, моделирования и прогнозирования электропотребления авторами проведен сравнительный анализ программной реализации алгоритма работы метода обработки информации динамических рядов. Код программной реализации метода обработки данных при прогнозировании электропотребления представлен в открытом репозитории «Method-of-Classical-sliding-matrix» на платформе Git Hub по ссылке:

https://github.com/CollaborativeProgrammingTeam/Method-of-Classical-sliding-matrix .

Графики этапов моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии с доверительными интервалами ошибок представлены на рисунке 3.

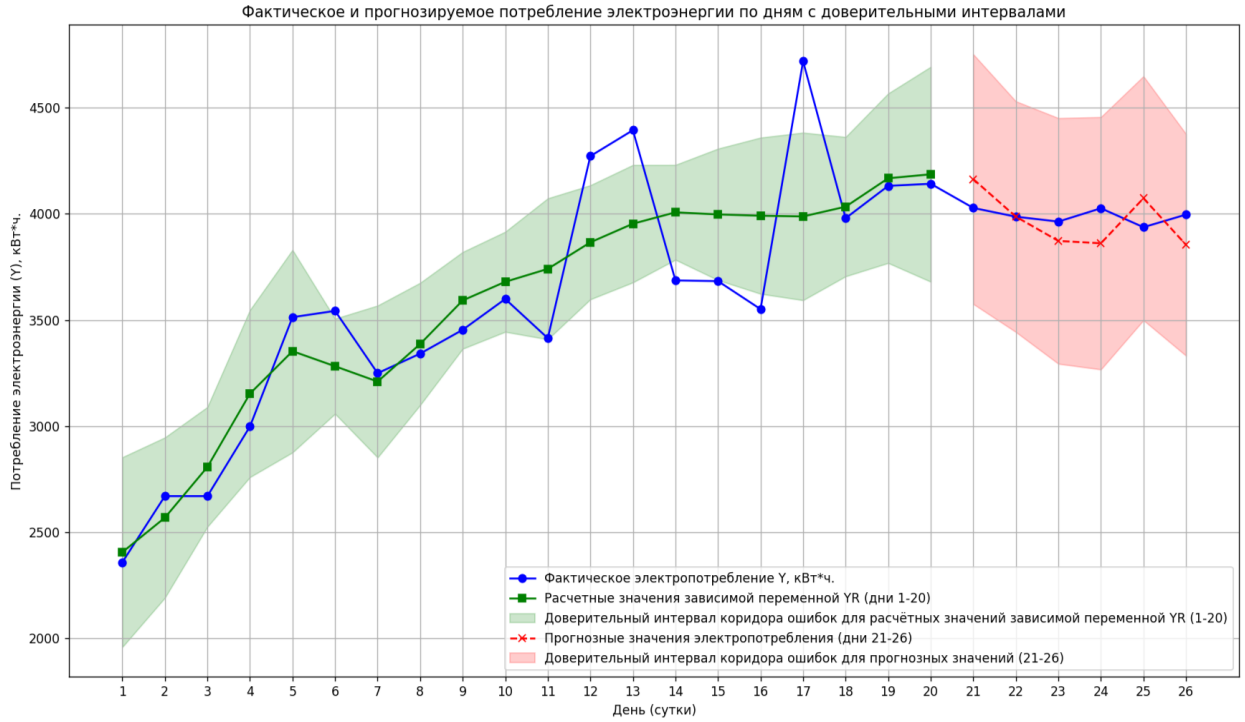


***Рис. 3**. Фактическое и прогнозируемое потребление электроэнергии по дням с доверительными интервалами*

***Fig. 3**. Actual and predicted electricity consumption by day with confidence intervals*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ОБЩИЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ РЯДОВ

Выбор языка программирования для задач системного анализа данных, моделирования и прогнозирования методом скользящей матрицы (анализ временных рядов, разработка регрессионных моделей) основан на проведенном авторами сравнении. Анализ различных программных реализаций метода статистического анализа динамических рядов (скользящей матрицы) на разных языках программирования и результаты позволяют выявить их сильные и слабые стороны для задач прогнозирования, которые будут полезны как начинающим исследователям, так и опытным разработчикам.

Рассмотрим преимущества и недостатки каждого рассматриваемого языка программирования, а также рекомендации, полученные в результате решения задачи моделирования и прогнозирования электропотребления.

Языки программирования сравнивались по количеству строк кода, времени выполнения кода, использованию внешних ресурсов, поддержке параллелизма, объему кода. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Рассмотрим преимущества и недостатки рассматриваемых языков программирования для решения задачи моделирования и прогнозирования электропотребления.

Преимущества языков программирования: *Python* – занимает третье место по количеству строк и символов, однако имеет высокую функциональность. Наличие внешних модулей (например, NumPy, Pandas, Scikit-learn) упрощает реализацию сложных математических вычислений; C# – по времени выполнения (20–200 мс) является одним их лучших, уступая только C++. Наличие внутренней библиотеки для многопоточности упрощает написание эффективного кода (встроенная поддержка параллелизма). Параллелизм осуществляется через библиотеки и методы Task Parallel Library (TPL), async/await, Parallel LINQ (PLINQ), System.Threading.Tasks[1]; *R* – имеет наименьшее количество строк кода (92) и наименьший объем в символах (4103). Время выполнения сопоставимо с C#. *Java* – имеет возможность подключения внешних модулей для любых задач, включая машинное обучение и анализ данных (например, Weka). C++ по результатам эксперимента показал самое низкое время выполнения кода (5–30 мс), что делает его незаменимым для задач, требующих максимальной скорости. Имеет нативный параллелизм – прямая работа с потоками на уровне ОС без необходимости в дополнительных зависимостях, что дает максимальный контроль. Go – имеет встроенные потоки (так называемые горутины, «goroutines»), которые обеспечивают параллелизм программам[2].

Таблица 2. Результат сравнения языков по задаче моделирования и прогнозирования электропотребления

Table 2. Result of comparison of languages for the task of modeling and forecasting electricity consumption

Язык	Количество строк кода	Время выполнения кода (мс)	Использование внешних ресурсов	Поддержка параллелизма	Объем кода (в символах)	Оценка авторов
Python	112	710	+	Внешние модули	5126	5
C#	130	20–200	+	Внутренняя библиотека	6303	5
R	92	20–200	+	Дополнительные пакеты	4103	4
Java	193	100–500	+	Внешние модули	11012	3
C++	165	5–30	+	Нативно	11820	4
Go	230	100–200	–	Встроенные потоки	12007	3

[1]Информационные ресурсы: «Learn.microsoft». Url-адрес: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/parallel-programming/task-parallel-library-tpl; «Learn.microsoft». URL: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/parallel-programming/plinq (дата посещения: 22.11.2025).

[2]Информационный ресурс «Go.dev». URL: https://golang.org/doc/effective_go#goroutines (дата посещения: 22.11.2025).

Были определены минусы языков программирования при решении задачи анализа данных и прогнозирования электропотребления: Python – имеет ограниченную производительность; C# – недостаточное число специализированных библиотек, требуемых для анализа данных, малое количество готовых решений для статистического анализа; R – имеет специализированный синтаксис; Go – имеет недостаток специализированных библиотек для моделирования и прогнозирования, отсутствие готовых реализаций сложных статистических тестов; C++ – нет встроенных функций для F-распределения, t-тестов, которые необходимы для проведения регрессионного анализа при использовании метода скользящей матрицы (требуется реализовывать статистические тесты вручную); Java – необходимость написания большого количества кода для выполнения простых операций, отсутствует встроенная матричная алгебра, что усложняет написание формул, высокий порог входа для научных исследований. Недостатки языков при проведении статистического анализа и моделирования: Java и Go – неподходящий синтаксис и отсутствие библиотек; C++ – сложность разработки и риск ошибок; C# – ограниченная экосистема в области науки о данных (Data Science).

Python позволяет реализовать алгоритм достаточно лаконично (3-е место по объему кода), при этом получив высшую оценку удобства от разработчиков. Это означает, что скорость написания, читаемость и сопровождение кода на Python максимальны. В научно-исследовательской деятельности, где часто требуется быстро протестировать гипотезу и модифицировать разработанную модель, это является важным преимуществом. Python не такой краткий, как R, но его код значительно читабельнее и структурнее для большинства программистов. При этом он не такой объемный, как Java, C++ или Go, где приходится писать много служебных кодов.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что язык программирования Python является оптимальным выбором благодаря библиотекам для анализа данных и моделирования, математическому синтаксису, балансу между скоростью разработки и производительностью.

Заключение

Системный анализ данных, моделирование и прогнозирование электропотребления является на сегодняшний день актуальной задачей в области электроэнергетики. Поэтому для уменьшения ошибки прогнозирования требуется разрабатывать новые методы и математические модели, которые адекватно описывают имеющиеся данные у исследователей.

В работе математически описан метод статистического анализа динамических рядов, с помощью которого разработана структура модели и рассчитаны коэффициенты модели. Математический аппарат метода статистического анализа динамических рядов при прогнозировании суточного электропотребления был реализован с применением инженерного программного продукта Mathcad Express.

Результативность метода прогнозирования определяет хорошие перспективы его использования исследователями и производственными компаниями. Для реализации метода требовалось выявить оптимальный язык программирования, отвечающий современным требованиям в области системного анализа данных и математической статистики.

В работе с помощью различных современных языков программирования показана сравнительная реализация метода прогнозирования.

В результате проведенного исследования можно сделать следующий вывод: для анализа данных, моделирования и прогнозирования на основе метода классической скользящей матрицы рекомендуется использовать Python, так как: Python позволяет быстро прототипировать и тестировать различные подходы и методы к анализу данных; библиотеки NumPy, SciPy, Pandas предоставляют оптимизированные реализации матричных операций, которые являются основными в методе скользящей матрицы; библиотека Matplotlib и другие библиотеки позволяют легко анализировать и визуализировать результаты; имеется интеграция с различными библиотеками машинного обучения (scikit-learn, TensorFlow) для расширения функциональности.

Для решаемой нами задачи прогнозирования электропотребления, где итеративность исследования, скорость разработки и ясность кода приоритетнее наносекундной оптимизации времени выполнения, Python является оптимальным выбором. Он позволяет нам сосредоточиться на сути задачи – разработке математической модели (разработанной с помощью классического метода скользящей матрицы) и качестве прогнозных оценок электропотребления, а не на низкоуровневой реализации алгоритмов.

Однако для альтернативных сценариев и задач можно использовать следующие языки:

- высокопроизводительные задачи: C++;
- работа в экосистеме Microsoft: C#;
- кроссплатформенные приложения с умеренной производительностью: Java.

В дальнейшем планируется добавление в классическую скользящую матрицу других факторов, влияющих на потребление электроэнергии: продолжительность светового дня, день недели (рабочий/выходной), скорость ветра, влажность, лаговые переменные. Продолжение исследования заключается в развитии и усовершенствовании метода обработки данных, в адаптации классического метода скользящей матрицы к математическим моделям машинного обучения и искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hota H. S., Handa R., Shrivas A. K.* Time series data prediction using sliding window based rbf neural network // International Journal of Computational Intelligence Research. 2017. Vol. 13. No. 5. Pp. 1145–1156.

2. *Zhan Z., Kim S.K.* Versatile time-window sliding machine learning techniques for stock market forecasting // Artificial Intelligence Review. 2024. Vol. 57. ID. 209. DOI: 10.1007/s10462-024-10851-x

3. *Dalal S., Lilhore U.K., Seth B. et al.* A hybrid model for short-term energy load prediction based on transfer learning with lightgbm for smart grids in smart energy systems // Journal of Urban Technology. DOI: 10.1080/10630732.2024.2380639

4. *Кольвах В. Ф.* Прогнозирование сложных процессов с помощью комбинированных рядов: учебное пособие. Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2006. 214 с.

5. *Лапушкин М. К.* Прогнозирование потребления электроэнергии на базе данных о регистрации электромобилей // Исследования молодых ученых: материалы LXXXII Международной научной конференции (г. Казань, май 2024 г.). Казань: Молодой ученый, 2024. С. 65–75. EDN: UIPBFW

6. *Chen A., Pan Z., Liu J. et al.* Study on forecasting electricity consumption based on statistical modeling // Journal of Physics Conference Series. 2025. Vol. 3012. No. 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/3012/1/012067

7. *Грамович Я. В., Мусатов Д. Ю., Петрусевич Д. А.* Применение беггинга в прогнозировании временных рядов // Russian Technological Journal. 2024. Vol. 12. No. 1. Pp. 101−110. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-101-110

8. *Дзгоев А. Э.* Методы обработки и анализа данных для разработки предиктивных моделей: учебное пособие. М.: РТУ МИРЭА, 2024. 147 с.

9. *Zhang W., Liu J., Deng W. et al.* AMTCN: An attention-based multivariate temporal convolutional network for electricity consumption prediction // Electronics. 2024. Vol. 13. P. 4080. DOI: 10.3390/ electronics13204080

10. *Кассем С. А., Ибрагим А. Х. А., Хасан А. М., Логачева А. Г.* Прогнозирование электропотребления предприятия с применением искусственных нейронных сетей // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7. № 1(25). С. 177–193. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-177-193

11. *Глазырин А. С., Боловин Е. В., Архипова О. В. и др.* Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов ретроспективного регрессионного анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 4. С. 231–248. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/4213

12. *Yu K., Cao J., Chen X. et al.* Residential load forecasting based on electricity consumption pattern clustering // Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 10. P. 1113733. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1113733

13. *Yuan B., He B., Yan J. et al.* Short-term electricity consumption forecasting method based on empirical mode decomposition of long-short term memory network // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 983. P. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/983/1/012004

14. *Бортник Д. В., Орлов А. И.* Сравнение архитектур нейронных сетей в задаче прогнозирования потребления электроэнергии предприятием // Вестник Чувашского университета. 2023. № 4. С. 57–65. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-57-65

15. *Алкацев М. И., Дзгоев А. Э., Бетрозов М. С.* Исследование и разработка метода прогнозирования потребления электроэнергии в системе управления электроснабжением региона // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 5-6. С. 30–37. EDN: PCYGBL

16. *Колтыгин Д. С., Зеленков И. А.* Анализ производительности сортировки массивов данных при использовании языков программирования разных уровней // Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки. 2024. Т. 1. С. 17–21. EDN: BLFPMT

17. *Мирзоева К. А.* Методика обучения языков программирования Phyton, C++ и их сравнение // Society and innovations. 2022. Т. 3. № 3. С. 126–133. DOI: 10.47689/2181-1415-vol3-iss3-pp126-133

18. *Dzizinskaya D.V., Ledneva O.V., Tindova M.G., Yazykova S.V.* Forecasting electricity consumption time series in the R programming environment // Journal of Applied Informatics. 2025. Vol. 20. No. 2. Pp. 126–143. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-2-126-143

19. *Иванов А. А.* Справочник по электротехнике. Киев: Вища школа, 1972.

20. *Кухлинг Х.* Справочник по физике: пер. с нем. М.: Мир, 1982. 520 с.

21. *Войтенкова Е. Д., Дзгоев А. Э.* Среднесрочное прогнозирование электропотребления бюджетной образовательной организации с помощью метода скользящей матрицы // В сборнике: Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (памяти проф. Н. И. Юсуповой). ITIDS'2024. 2024. С. 242–248.

REFERENCES

1. Hota H.S., Handa R., Shrivas A.K. Time series data prediction using sliding window based rbf neural network. *International Journal of Computational Intelligence Research*. 2017. Vol. 13. No. 5. Pp. 1145–1156.

2. Zhan Z., Kim S.K. Versatile time-window sliding machine learning techniques for stock market forecasting. *Artificial Intelligence Review.* 2024. Vol. 57. ID. 209. DOI: 10.1007/s10462-024-10851-x

3. Dalal S., Lilhore U.K., Seth B. et al. A hybrid model for short-term energy load prediction based on transfer learning with lightGBM for smart grids in smart energy systems. *Journal of Urban Technology.* 2024. DOI: 10.1080/10630732.2024.2380639

4. Kolvakh V.F. *Prognozirovanie slozhnykh protsessov s pomoshchyu kombinirovannykh ryadov* [Forecasting Complex Processes Using Combined Series]: tutorial. Vladikavkaz: SKGMI (GTU), 2006. 214 p. (In Russian)

5. Lapushkin M.K. Forecasting electricity consumption based on electric vehicle registration data. *Issledovaniya molodykh uchenykh: materialy LXXXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. [Research by Young Scientists: Proceedings of the LXXXII International Scientific Conference] (Kazan, May 2024). Kazan: Molodoy uchenyy, 2024. Pp. 65–75. EDN: UIPBFW. (In Russian)

6. Chen A., Pan Z., Liu J. et al. Study on forecasting electricity consumption based on statistical modeling. *Journal of Physics Conference Series. 2025.* Vol. 3012. No. 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/3012/1/012067

7. Gramovich Ya.V., Musatov D.Yu., Petrusevich D.A. Application of begging in time series forecasting. *Russian Technological Journal.* 2024. Vol. 12. No. 1. Pp. 101−110. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-101-110. (In Russian)

8. Dzgoev A.E. *Metody obrabotki i analiza dannykh dlya razrabotki prediktivnykh modeley* [Data Processing and Analysis Methods for Developing Predictive Models.]: a tutorial. Moscow: RTU MIREA, 2024. 147 p. (In Russian)

9. Zhang W., Liu J., Deng W. et al. AMTCN: An attention-based multivariate temporal convolutional network for electricity consumption prediction. *Electronics.* 2024. Vol. 13. P. 4080. DOI: 10.3390/ electronics13204080

10. Kassem S.A., Ibragim A.Kh.A., Khasan A.M., Logacheva A.G. Forecasting electric consumption of enterprise using artificial neural networks. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2021. Vol. 7. No. 1(25). Pp. 177–193. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-177-193. (In Russian)

11. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Arkhipova O.V. et al. Adaptive short-term forecasting of electricity consumption by autonomous power systems of small northern settlements based on retrospective regression analysis methods. *Bulletin of The Tomsk Polytechnic University. GeoAssets Engineering*. 2023. Vol. 334. No. 4. Pp. 231–248. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/4213. (In Russian)

12. Yu K., Cao J., Chen X. et al. Residential load forecasting based on electricity consumption pattern clustering. *Frontiers in Energy Research.* 2023. Vol. 10. P. 1113733. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1113733

13. Yuan B., He B., Yan J. et al. Short-term electricity consumption forecasting method based on empirical mode decomposition of long-short term memory network. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2022. Vol. 983. P. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/983/1/012004

14. Bortnik D.V., Orlov A.I. Comparison of neural network architectures to predicting electricity consumption by enterprise. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*. 2023. No. 4. Pp. 57–65. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-57-65. (In Russian)

15. Alkatsev M.I., Dzgoev A.E., Betrozov M.S. *Issledovanie i razrabotka metoda prognozirovaniya potrebleniya elektroenergii v sisteme upravleniya elektrosnabzheniem regiona*. [Research and development of a method for forecasting electricity consumption in a regional power supply management system] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems]. 2012. No. 5-6. Pp. 30–37. EDN: PCYGBL. (In Russian)

16. Koltygin D.S., Zelenkov I.A. *Analiz proizvoditelnosti sortirovki massivov dannykh pri ispolzovanii yazykov programmirovaniya raznykh urovney* [Performance analysis of sorting data arrays using programming languages of different levels.] *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural Sciences and Engineering]. 2024. Vol. 1. Pp. 17–21. EDN: BLFPMT. (In Russian)

17. Mirzoeva K.A. *Metodika obucheniya yazykov programmirovaniya Phyton, C++ i ikh sravnenie* [Methods for teaching Python and C++ programming languages and their comparison]. *Society and innovations*. 2022. Vol. 3. No. 3. Pp. 126–133. DOI: 10.47689/2181-1415-vol3-iss3-pp126-133. (In Russian)

18. Dzizinskaya D.V., Ledneva O.V., Tindova M.G., Yazykova S.V. Forecasting electricity consumption time series in the R programming environment. *Journal of Applied Informatics.* 2025. Vol. 20. No. 2. Pp. 126–143. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-2-126-143

19. Ivanov A.A. *Spravochnik po elektrotekhnike* [Handbook of Electrical Engineering]. Kiev: Vishcha shkola, 1972. (In Russian)

20. Kukhling Kh. *Spravochnik po fizike* [Handbook of Physics]: transl. Germany. Moscow: Mir, 1982. 520 p. (In Russian)

21. Voytenkova E.D., Dzgoev A.E. *Srednesrochnoye prognozirovaniye elektropotrebleniya byudzhetnoy obrazovatelnoy organizatsii s pomoshchyu metoda skolzyashchey matritsy.* [Medium-term forecasting of electricity consumption of a budgetary educational organization using the sliding matrix method]. *V sbornike: Informatsionnyye tekhnologii intellektualnoy podderzhki prinyatiya resheniy (pamyati prof. N.I. Yusupovoy)* [Information Technologies for Intelligent Decision Support (in memory of Prof. N.I. Yusupova)]. *ITIDS'2024*. 2024. Pp. 242–248. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Дзгоев А. Э. – постановка задачи, математические расчеты, разработка регрессионной модели, разработка метода статистического анализа динамических рядов (разработка классического метода скользящей матрицы), прогнозирование потребления электроэнергии, интерпретация результатов;

Сян Хуа – оценка адекватности регрессионной модели;

Лагунова А. Д. – анализ качества математической модели, расчет ошибок прогнозирования электропотребления;

Морозов Д. В. – написание программного кода на языке Python (модуль статистического анализа динамических рядов и прогнозирование);

Мажей Я. В. – написание программного кода на языке Python (модуль оценки адекватности);

Брайловский А. В. – написание программного кода на языках R и Go;

Копылова Я. А. – написание программного кода на языке C#;

Юдин Д. А. – написание программного кода на языке Java;

Аллабергенов Р. – написание программного кода на языке C++.

Authors' contributions:

Dzgoev A.E. – problem statement, mathematical calculations, regression model development, development of a method for statistical analysis of time series (development of the classical sliding matrix method), electricity consumption forecasting, and results interpretation;

Hua Xiang – regression model adequacy assessment;

Lagunova A.D. – mathematical model quality analysis, electricity consumption forecasting error calculation;

Morozov D.V. – Python coding (time series statistical analysis and forecasting module);

Mazhey Ya.V. – Python coding (adequacy assessment module);

Brailovsky A.V. – R and Go coding;

Kopylova Ya.A. – C# coding;

Yudin D.A. – Java coding;

Allabergenov R. – C++ coding.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Дзгоев Алан Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
dzgoev@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1314-6151, SPIN-код: 8092-8784

Сян Хуа, канд. техн. наук, помощник директора Управления международного сотрудничества Пекинского политехнического института, стар. науч. сотр. Института машиностроения Пекинского политехнического института;
100081, Китайская народная республика, Пекин, ул. Чжунгуаньцунь, 5, Вэйгунцунь, Бэй Цзин Ши, район Хайдянь;
huaxiang@bit.edu.cn, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4429-1893

Лагунова Анна Дмитриевна, канд. экон. наук, доцент, заведующий кафедрой «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
lagunova@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3572-8192, SPIN-код: 4067-3038

Копылова Яна Антоновна, ассистент кафедры «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
kopylova_y@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0060-6753, SPIN-код: 4909-1501

Морозов Даниил Владимирович, ассистент кафедры «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
morozov_dav@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5187-4124, SPIN-код: 6133-0974

Мажей Ярослав Владимирович, ассистент кафедры «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
mazhej@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9115-2295, SPIN-код: 5038-3572

Брайловский Андрей Валерьевич, ассистент кафедры «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
brajlovskij@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1794-7825, SPIN-код: 5900-1835

Юдин Дмитрий Александрович, студент по направлению подготовки «Программная инженерия», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
yudin.d.a@edu.mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9587-2016

Аллабергенов Руслан, студент по направлению подготовки «Программная инженерия», Институт информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет;
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;
ruslan_tm2003@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5525-6524

Information about the authors

Alan E. Dzgoev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Digital Transformation Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
dzgoev@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1314-6151, SPIN-code: 8092-8784

Xiang Hua, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology;
5, Zhongguancun street, Weigongcun, Bei Jing Shi, Haidian District, Beijing, 100811, China;
huaxiang@bit.edu.cn, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4429-1893

Anna D. Lagunova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Digital Transformation Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
lagunova@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3572-8192, SPIN-code: 4067-3038

Yana A. Kopylova, Assistant, Digital Transformation Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
kopylova_y@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0060-6753, SPIN-code: 4909-1501

Daniil V. Morozov, Assistant, Digital Transformation Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
morozov_dav@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5187-4124, SPIN-code: 6133-0974

Yaroslav V. Mazhey, Assistant Professor, Department of Digital Transformation, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
mazhej@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9115-2295, SPIN-code: 5038-3572

Andrey V. Brailovsky, Assistant Professor, Department of Digital Transformation, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
brajlovskij@mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1794-7825, SPIN-code: 5900-1835

Dmitry A. Yudin, Student majoring in Software Engineering, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
yudin.d.a@edu.mirea.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9587-2016

Ruslan Allabergenov, Student majoring in Software Engineering, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University;
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;
ruslan_tm2003@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5525-6524

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 631.34 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-57-74
CRINWT

Разработка и моделирование роботизированной системы контроля микроклимата для биотехнологических применений

У. Р. Тахаев, М. Р. Исаева✉, А. А-В. Садулаев, А. И. Насуханов

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова
364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100

Аннотация. Актуальность работы связана с развитием агроробототехники и автономных систем для биотехнологий, где точное управление параметрами среды является критически важной задачей. Важным условием эффективного функционирования тепличного комплекса в зимнее время года и получения хорошего урожая, даже в условиях идеальной герметизации, является создание оптимального климата.

Цель исследования – разработка автономной робототехнической системы управления микроклиматом с функциями этапного адаптивного управления, диагностики и удаленного взаимодействия на базе доступной микроконтроллерной платформы.

Методы исследования включали аппаратные испытания на физическом прототипе (контроллер ESP8266, датчик SCD40, исполнительные устройства), программный мониторинг данных через REST API с интервалом 6 секунд и протокол испытаний контуров влажности, CO_2 (релейное управление) и температуры (ПИД-регулятор). Обработка данных выполнялась на JavaScript с возможностью визуализации в MATLAB, Python или Excel.

Результаты. Разработана и апробирована автономная система управления микроклиматом на базе микроконтроллера ESP8266, реализующая этапное адаптивное управление и удаленный мониторинг. Экспериментально подтверждена эффективность ключевых алгоритмов: релейное управление обеспечивает надежное снижение избыточной влажности и концентрации CO_2, а реализация ПИД-регулятора позволяет достигать плавного и точного температурного контроля без перерегулирования. Полученные данные выявили области для оптимизации, такие как учет тепловой инерции для совершенствования алгоритмов и доработка конструкции для повышения энергоэффективности, что подтверждает практическую значимость системы как готового, экономичного и масштабируемого решения для задач точного земледелия и биотехнологий.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, управление микроклиматом, биотехнологии, автономная система, ESP8266, прецизионное сельское хозяйство, интеллектуальное управление

Поступила 13.12.2025, одобрена после рецензирования 26.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Тахаев У. Р., Исаева М. Р., Садулаев А. А-В., Насуханов А. И. Разработка и моделирование роботизированной системы контроля микроклимата для биотехнологических применений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 57–74. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-57-74

© Тахаев У. Р., Исаева М. Р., Садулаев А. А-В., Насуханов А. И., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

MSC: 93C95 Scientific article

Development and modeling of a robotic microclimate control system for biotechnological applications

U.R. Takhaev, M.R. Isaeva✉, A.A-V. Sadulaev, A.I. Nasukhanov

Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov
100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia

Abstract. The relevance of this study is related to the development of agricultural robotics and autonomous systems for biotechnology, where precise control of environmental parameters is critical. Creating an optimal climate is essential for the efficient operation of a greenhouse complex during the winter and the production of a good harvest, even under ideal sealed conditions.

Aim. The study is to develop an autonomous robotic microclimate control system with stage-by-stage adaptive control, diagnostics, and remote interaction functions based on an affordable microcontroller platform.

The research methods include hardware testing on a physical prototype (ESP8266 controller, SCD40 sensor, actuators), software data monitoring via a REST API at 6-second intervals, and a test protocol for the humidity, CO_2 (relay control), and temperature (PID controller) circuits. Data processing was performed in JavaScript with the ability to visualize in MATLAB, Python, or Excel.

Results. An autonomous microclimate control system based on the ESP8266 microcontroller, implementing stage-by-stage adaptive control and remote monitoring, have been developed and tested. The effectiveness of the key algorithms have been experimentally confirmed: relay control ensures reliable reduction of excess humidity and CO_2 concentration, while the implementation of a PID controller enables smooth and precise temperature control without overshoot. The obtained data identified areas for optimization, such as taking into account thermal inertia to improve the algorithms and refining the design to increase energy efficiency, confirming the practical value of the system as a ready-made, cost-effective, and scalable solution for precision agriculture and biotechnology.

Keywords: robotic complex, microclimate control, biotechnology, autonomous system, ESP8266, precision agriculture, and intelligent control

Submitted 13.12.2025, approved after reviewing 26.01.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Takhaev U.R., Isaeva M.R., Sadulaev A.A-V., Nasukhanov A.I. Development and modeling of a robotic microclimate control system for biotechnological applications. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 57–74. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-57-74

Введение

Актуальность работы связана с развитием агроробототехники и автономных систем для биотехнологий, где точное управление параметрами среды является критически важной задачей. Важным условием эффективного функционирования тепличного комплекса в зимнее время года и получения хорошего урожая, даже в условиях идеальной герметизации, является создание оптимального климата [9, 10].

Проблематика: сложность одновременного контроля нескольких взаимосвязанных параметров (T, H, CO_2, свет), необходимость длительной автономной работы, обеспечение отказоустойчивости.

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Постановка задачи: разработка автономной робототехнической системы управления микроклиматом с функциями этапного адаптивного управления, диагностики и удаленного взаимодействия на базе доступной микроконтроллерной платформы.

Методы исследования

Для верификации работоспособности и оценки эффективности разработанной системы управления микроклиматом был проведен комплекс испытаний на физическом прототипе. Методология включала следующие этапы:

Аппаратная конфигурация. Испытания проводились на изолированной тестовой камере (боксе) с внутренними размерами 42×28×22 см. В качестве управляющего контроллера использовался модуль ESP8266, сенсорного модуля – датчик SCD40 (I2C, адрес 0x62). Исполнительными устройствами выступали: нагревательная пластина (управление через ШИМ на GPIO5), вентилятор (цифровое управление, GPIO4) и пароувлажнитель (цифровое управление, GPIO15). Параметры окружающей среды в лаборатории составляли: температура 15.5 °C, влажность 78 %, концентрация CO_2 – ~620 ppm.

Программное обеспечение для сбора данных. Для объективной фиксации динамики процессов был разработан и запущен в браузере скрипт на JavaScript. Скрипт с интервалом в 6 секунд опрашивал REST API системы (GET /api/status), получая JSON-объект с текущими показаниями датчиков и состояниями исполнительных устройств. Все данные с привязкой ко времени записывались в массив для последующего анализа.

Протокол испытаний

Испытание контуров влажности и CO_2. В камере искусственно создавались начальные условия, значительно превышающие заданные уставки: влажность ~99 %, концентрация CO_2 – ~3700 ppm. После этого система переводилась в автоматический режим, где контур управления по релейному закону должен был снизить параметры до целевых значений (уставки устанавливались программно). Вентилятор оставался включенным на протяжении всего эксперимента, что имитировало режим активного проветривания.

Испытание температурного контура. Начальная температура в камере соответствовала температуре окружающей среды (15.5 °C). Задачей системы было обеспечить нагрев и поддержание температуры на уровне 23 °C с использованием ПИД-регулятора, управляющего нагревателем через ШИМ. После достижения уставки и выключения нагревателя фиксировался процесс естественного остывания камеры.

Обработка и визуализация данных. Первичная обработка сырых данных (логов) проводилась средствами JavaScript с выводом в консоль. Для анализа динамики и построения графиков переходных процессов данные могут быть импортированы в специализированное ПО, такое как MATLAB, Python (библиотеки Matplotlib, Pandas) или даже в табличный процессор Excel.

Краткое описание

Система автоматизации на базе esp8266 для контроля выращивания грибов. Система позволяет задавать разные этапы с контролем разных параметров, а именно: температуры, влажности, CO_2, света. Для управления устройствами использовался мосфет IRLB3034, так как esp8266 выдает сигнал 3.0 вольт и не более 200 мА, а для работы устройств нужно использовать до 12 вольт и до 4 ампер.

Также система подключается к внешней сети через WIFI, это нужно для отправки уведомлений через сервис ntfy.sh. Сам сервис ntfy.sh предоставляет большое количество разных вариантов получения уведомлений. Самые распространенные – через их мобильное приложение и через чат-боты в мессенджерах. Также используется светодиод с самого микроконтроллера для индикации корректности работы. Для удобной отладки во время разработки основные данные с датчиков и устройств выводятся в serial. Для предотвращения

перегрева нагревательной пластины используется широтно-имульсная модуляция, которая при работе с высокоскоростным транзистором снижает мощность.

Для выявления проблем с внешними устройствами используется алгоритм, который проверяет работу устройств больше определенного времени. К примеру, для вентилятора, нагревательной пластины, увлажнителя (парообразователя) если устройство включено более 5 минут и контролируемые значения не вернулись в норму, отправляется уведомление. Для светодиодной ленты время увеличено до 12 часов, это приблизительное максимальное время, нужное для освещения вешенок.

В коде заложена возможность конфигурировать систему с помощью веб-запросов. Есть запросы для получения актуальных значений с датчика и актуального состояния работы устройств. Также есть возможность получения списка этапов, установки списка этапов, сброс временного счетчика (рис. 1).

Устройство периодически сохраняет значения в постоянной памяти – нужно для контроля в случае проблем с питанием, чтобы при отключении питания устройство не начинало прогресс заново.

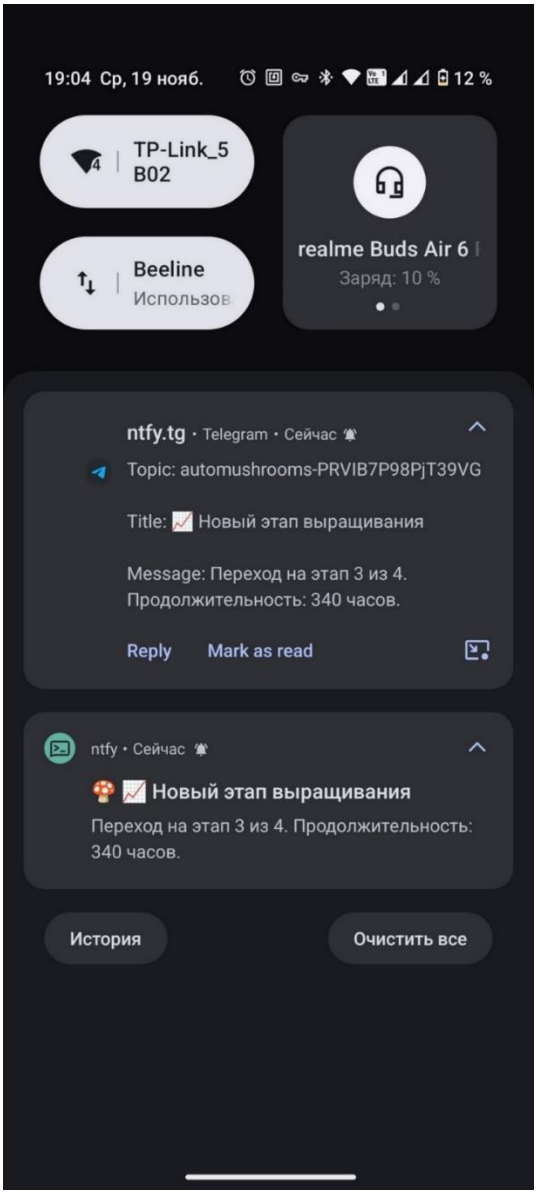


Рис. 1. *Скриншот уведомлений* / ***Fig. 1***. *Screenshot of notifications*

Подробное описание функционала контроллера для выращивания грибов

Общее описание

Система автоматизации на базе ESP8266 для управления микроклиматом при выращивании грибов. Контролирует температуру, влажность, уровень CO_2 и освещение по заданным этапам выращивания.

Аппаратная часть

Датчик SCD40 (I2C, адрес 0x62) измеряет температуру, влажность и CO_2. Использует I2C на пинах GPIO12 (D6) для SDA и GPIO13 (D7) для SCL. Частота I2C 50 кГц. Автоматически перезапускается при ошибках чтения.

Управляемые устройства

Нагреватель подключен к GPIO5 (D1), управляется через ШИМ с напряжением около 7 В для снижения мощности. Вентилятор на GPIO4 (D2), цифровое управление. Увлажнитель на GPIO15 (D8), цифровое управление. Лампа освещения на GPIO14 (D5), цифровое управление. Встроенный светодиод (LED_BUILTIN) в самой ESP8266 для индикации состояния системы.

Основной функционал

Система этапов выращивания

Поддержка до 10 этапов. Для каждого этапа: название (до 31 символа), продолжительность в часах, для температуры, влажности, CO_2 есть возможность включения/выключения контроля на каждом этапе, минимальные и максимальные значения, а также уведомления в случае, если эти устройства работают более 5 минут. Настройки освещения (часы включения и выключения) с возможностью включения/выключения контроля, а также уведомлениями при работе более 12 часов. Автоматический переход между этапами по истечении времени. При завершении всех этапов отправляется уведомление и выключаются все устройства.

Контроль параметров среды

Температура: включение нагревателя при температуре ниже минимума, выключение при превышении максимума, использование ШИМ для снижения напряжения.

Влажность: включение увлажнителя при влажности ниже минимума, выключение при превышении максимума.

CO_2: включение вентилятора при превышении максимума, выключение при достижении минимума, поддержка минимального уровня (заготовка для подачи CO_2).

Освещение: циклическое управление на основе времени от начала этапа, цикл включает свет на заданное количество часов и выключает на заданное количество часов, автоматический пересчет при переходе между этапами.

Система сохранения состояния

Используется EEPROM для хранения конфигурации этапов и времени работы. Автоматическое сохранение времени каждые 30 минут в постоянной памяти в случае проблем с электропитанием для сохранения прогресса. Восстановление состояния после перезагрузки: текущий этап, прошедшее время этапа в минутах, все настройки этапов.

Веб-интерфейс

Эндпоинты APIGET / – главная страница, отдает файл interface.html из LittleFS, использует стриминг для экономии памяти.

GET /api/status – получение текущего состояния системы. Возвращает JSON с показаниями датчиков (температура, влажность, CO_2), состоянием устройств (нагреватель, вентилятор,

увлажнитель, лампа), информацией о текущем этапе (номер, прогресс, продолжительность), настройками текущего этапа (диапазоны температуры, влажности, CO_2, освещения), детальной информацией об освещении (включено/выключено, текущий час цикла, фаза света).

GET /api/config – получение конфигурации всех этапов выращивания.

POST /api/config – сохранение конфигурации. Принимает JSON с массивом этапов, сохраняет в EEPROM, не сбрасывает текущий этап при сохранении.

POST /api/reset – сброс системы на первый этап, выключение всех устройств, обнуление времени.

GET /api/notifications – получение статуса уведомлений.

POST /api/notifications – включение или выключение уведомлений.

POST /api/notifications/test – отправка тестового уведомления.

Система уведомлений через ntfy.sh

Использует сервис ntfy.sh для отправки push-уведомлений. Настраиваемый топик для уведомлений. Поддержка приоритетов от 1 (низкий) до 5 (критический). Уведомления отправляются при запуске системы, переходе на новый этап, завершении всех этапов, проблемах с датчиком, долгой работе устройств (более 5 минут), критических ошибках (зависание системы). Для получения уведомлений можно использовать мобильное приложение ntfy.sh или чат-бот в телеграмме.

Мониторинг и защита

Мониторинг датчика SCD40: проверка готовности данных каждые 6 секунд, счетчик ошибок (порог 3 подряд), автоматический перезапуск датчика при проблемах, уведомления о проблемах с датчиком.

Мониторинг времени работы устройств: предупреждение при работе более 5 минут для нагревателя, вентилятора, увлажнителя; для лампы предупреждение при работе более 12 часов подряд.

Индикация состояния через LED: нормальная работа – медленное мигание (1 раз в 2 секунды), ошибка датчика – быстрое мигание (3 раза по 200 мс), проблемы с WiFi – очень быстрое мигание (5 раз по 100 мс), все этапы завершены – длинные вспышки (2 раза по 1 секунде). Из-за задержек в выполнении кода все таймеры индикации работают дольше, чем положено.

Сеть и подключение

Подключение к WiFi сети с заданными учетными данными. mDNS для доступа по имени esp-m.local. Автоматическое переподключение при обрыве соединения. Восстановление mDNS после реконнекта. Настройка hostname как esp-m.

Файловая система

Использование LittleFS для хранения веб-интерфейса (interface.html). Стриминг больших файлов для экономии памяти.

Временные интервалы

Чтение датчиков каждые 6 секунд. Контроль параметров среды каждые 6 секунд. Сохранение времени в EEPROM каждые 30 минут. Обновление времени этапа каждую минуту. Мигание LED каждые 2 секунды

Валидация данных при загрузке конфигурации. Защита от переполнения (максимум 10 этапов). Восстановление после сбоев через сохранение состояния в EEPROM. Мониторинг свободной памяти с выводом в Serial.

Особенности реализации

ШИМ для нагревателя снижает напряжение вместо полных 12 В. Циклическое освещение рассчитывается на основе времени от начала этапа, а не абсолютного времени. Стриминг HTML файлов для экономии памяти при отправке больших файлов. Медленная частота I2C (50 кГц) для стабильной работы с датчиком SCD40. Отслеживание времени работы устройств с предупреждениями о долгой работе.

Логирование

В Serial порт выводятся показания датчиков, состояния устройств, переходы между этапами, ошибки и предупреждения, состояние WiFi соединения, операции с EEPROM, статус отправки уведомлений.

Архитектурная модульность и программно-конфигурируемый интерфейс (веб-API) закладывают основу для последующей системной интеграции в распределенные робототехнические платформы, такие как мобильные агротехнические комплексы или сети управляемых биореакторов.

Обзор системы

Система управления микроклиматом включает три независимых контура:

1. **Контур температуры** (PID регулятор + нагреватель).
2. **Контур влажности** (Relay регулятор + увлажнитель).
3. **Контур CO_2** (Relay регулятор + вентилятор).

Точность управления температурным режимом достигается за счет применения классического метода робототехники – ПИД-регулирования, реализованного в контуре ШИМ-управления нагревательным элементом [2, 6].

Математические модели компонентов

1. Температурный контур

Уравнение теплового баланса камеры (1.1) и ее передаточная функция (1.2) получены на основе классической теории теплопередачи и модели инерционного звена [3, 5]. Параметры ПИД-регулятора (1.3) были подобраны на основе анализа модели и рекомендаций по настройке [2,6].

1.1. Уравнение теплового баланса камеры:

$$C\frac{dT}{dt} = P_{heat} - \lambda(T - T_{env}),$$

где:

- C= 10000 Дж/^{0}C – теплоемкость камеры;
- λ= 10 Вт/ ^{0}C – коэффициент теплопотерь;
- $T_{env} = 15\ ^0$C – температура окружающей среды;
- P_{heat} – мощность нагревателя.

1.2. Передаточная функция температурной модели:

$$G_T(s) = \frac{T(s)}{P_{heat}(s)} = \frac{K_T}{\tau_T s + 1}$$

с параметрами:

$K_T = 0{,}1\ ^0$C/Вт – статический коэффициент;

$\tau_T = \frac{C}{\lambda} = 1000$ с – постоянная времени.

1.3. PID-регулятор температуры:

$$u_T(t) = K_P e_T(t) + K_I \int_0^t e_T(\tau)\cdot d\tau + K_D \cdot \frac{de_T(t)}{dt},$$

где:

- $e_T(\tau) = T_{set}(t) - T(t)$ – ошибка регулирования;
- $K_P = 5, K_I = 0.05, K_D = 2$;
- $T_{set}(t) = \begin{cases} 15\ ^0C, t < 100\ c \\ 23\ ^0C, t \geq 100\ c \end{cases}$

2. Влажностный контур

Управление в этих контурах построено по релейному (двухпозиционному) закону с гистерезисной зоной нечувствительности (2.2, 3.2). Такой подход, широко описанный в литературе [5, 12], обеспечивает простую и надежную реализацию для объектов с большой инерционностью, таких как влажность и концентрация газа. Динамические модели контуров (2.1, 3.1) соответствуют апериодическим звеньям первого порядка [5, 8].

2.1. Динамика влажности:

$$\tau_H \frac{dH}{dt} + H = K_H u_H,$$

где:

$\tau_H = 200\ c$ – постоянная времени.

2.2. Relay – регулятор влажности:

$$u_H(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } e_H(t) \geq 1\% \\ 0, & \text{если } e_H(t) \leq -1\%, \\ \text{предыдущее состояние}, & \text{иначе} \end{cases}$$

где:

- $e_H(t) = H_{set} - H(t)$ – ошибка регулирования;
- $H_{set} = 90\ \%$ – уставка влажности.

2.3. Ограничение выходного сигнала:

$$0 \leq H(t) \leq 100\%.$$

3. Контур CO_2

3.1. Динамика концентрации CO_2:

$$\tau_c \frac{d\mathrm{C}}{dt} + \mathrm{C} = \mathrm{C}_{base} - K_C u_C,$$

где:

- τ_c= 500 с – постоянная времени;
- $\mathrm{C}_{base} = 800\ ppm$-базовая концентрация;
- K_C=100 ppm/ ед. управления.

3.2. Relay-регулятор CO_2:

$$u_{\mathrm{C}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } e_{\mathrm{C}}(t) \geq 50ppm \\ 0, & \text{если } e_{\mathrm{C}}(t) \leq -50ppm, \\ \text{предыдущее состояние}, & \text{иначе} \end{cases}$$

где:

- $e_C(t) = C(t) - \mathrm{C}_{set}$ – ошибка регулирования;
- $\mathrm{C}_{set} = 1000\ ppm$ – уставка CO_2.

3.3. Ограничение выходного сигнала:

$$300 \leq C(t) \leq 2000ppm.$$

Для возможности изучения разработанной системы регулирования была разработана математическая модель в программе MATLAB SIMULINK [15]. Данная программа обладает быстрым математическим ядром, оптимальной генерацией кода, высокой гибкостью, что значительно сокращает сроки реализации. На рисунке 2 представлена разработанная модель, где каждый компонент представлен в виде блока, что упрощает визуальный вид.

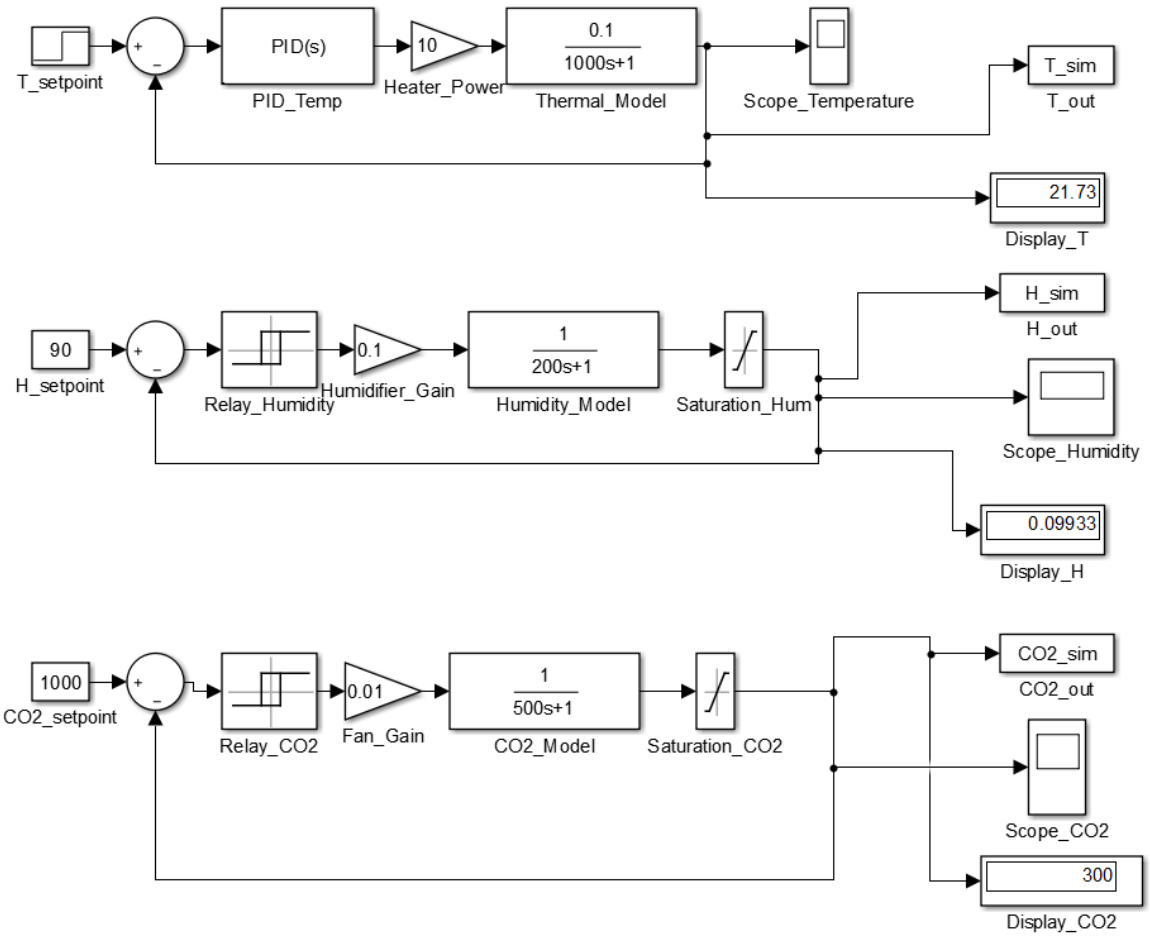


Рис. 2. *Математическая модель* / ***Fig. 2***. *Mathematical model*

После компиляции модели были получены графики основных параметров процесса (рис. 3).

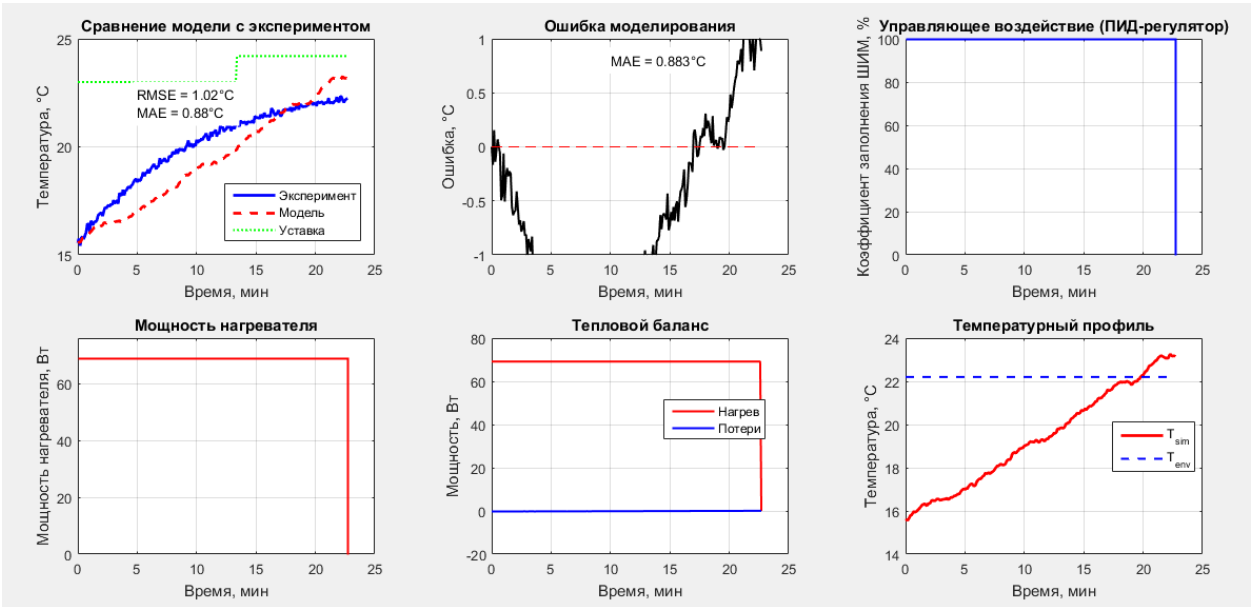


Рис. 3. *График основных параметров системы*

Fig. 3. *Graph of the main system parameters*

А также были получены графики переходных процессов каждого контура (рис. 4). Моделирование позволило оценить переходные процессы и согласовать параметры регуляторов до натурных испытаний, что соответствует современному инженерному подходу к проектированию систем управления [5, 15].

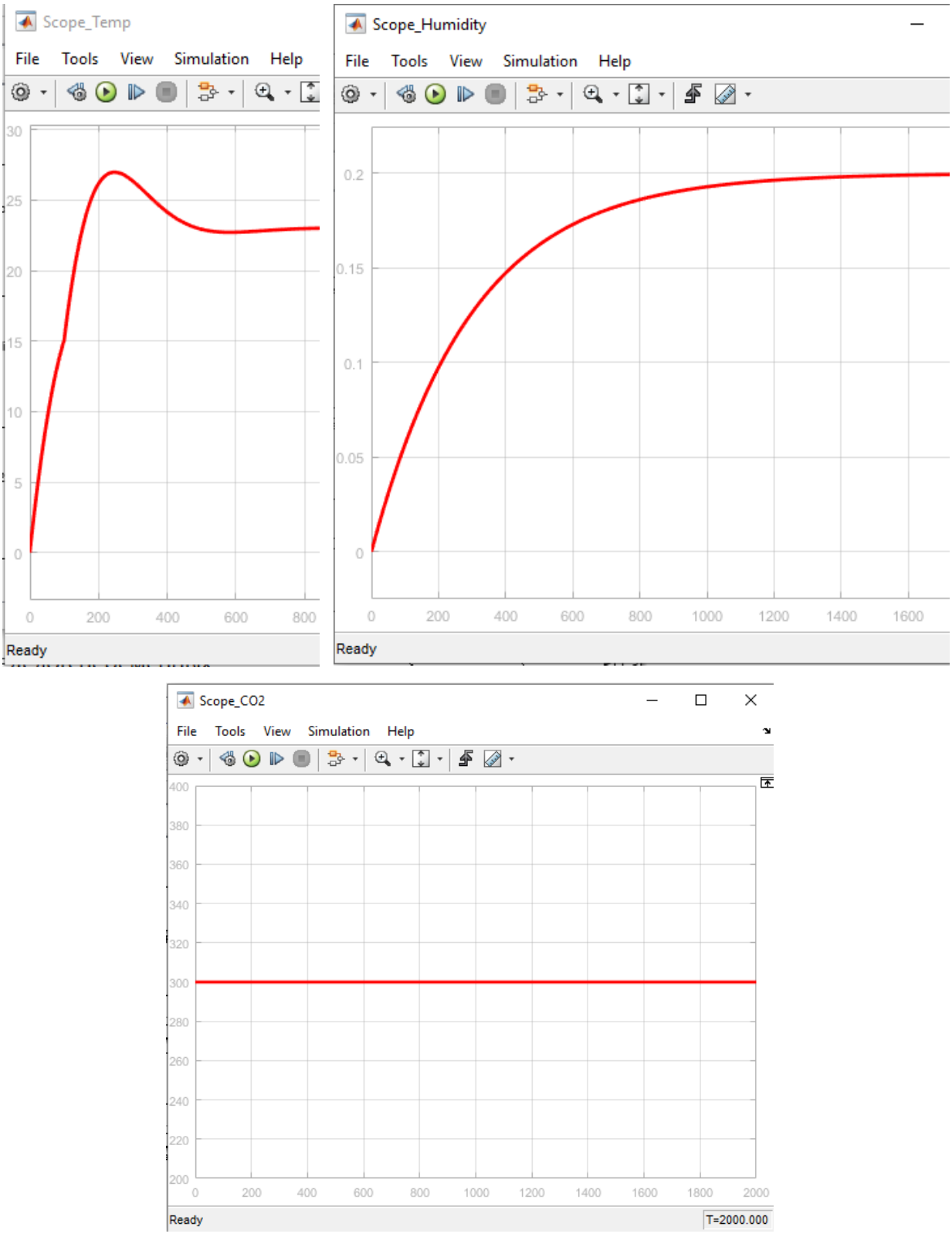


***Рис. 4**. Графики переходных процессов / **Fig. 4**. Graphs of transient processes*

Результаты

Экспериментальные испытания подтвердили работоспособность основных контуров управления и позволили количественно оценить их динамические характеристики.

Эффективность снижения влажности и концентрации CO_2.

Принудительная вентиляция продемонстрировала высокую эффективность в выравнивании параметров микроклимата камеры с внешней средой.

По влажности. За 600 секунд (10 минут) работы вентилятора влажность была снижена с 99,0 до 88,1 % (ΔH = -10,9 %). Наиболее интенсивное снижение (с 99 до ~92 %) произошло в первые 180 секунд (рис. 5).

По CO_2. Концентрация диоксида углерода упала с 3717 ppm до примерно 647 ppm (ΔCO_2 = -3070 ppm) за тот же промежуток времени. Критический уровень в 1000 ppm был преодолен примерно за 160 секунд. Данные показывают экспоненциальный характер снижения концентрации, что соответствует теоретической модели первого порядка.

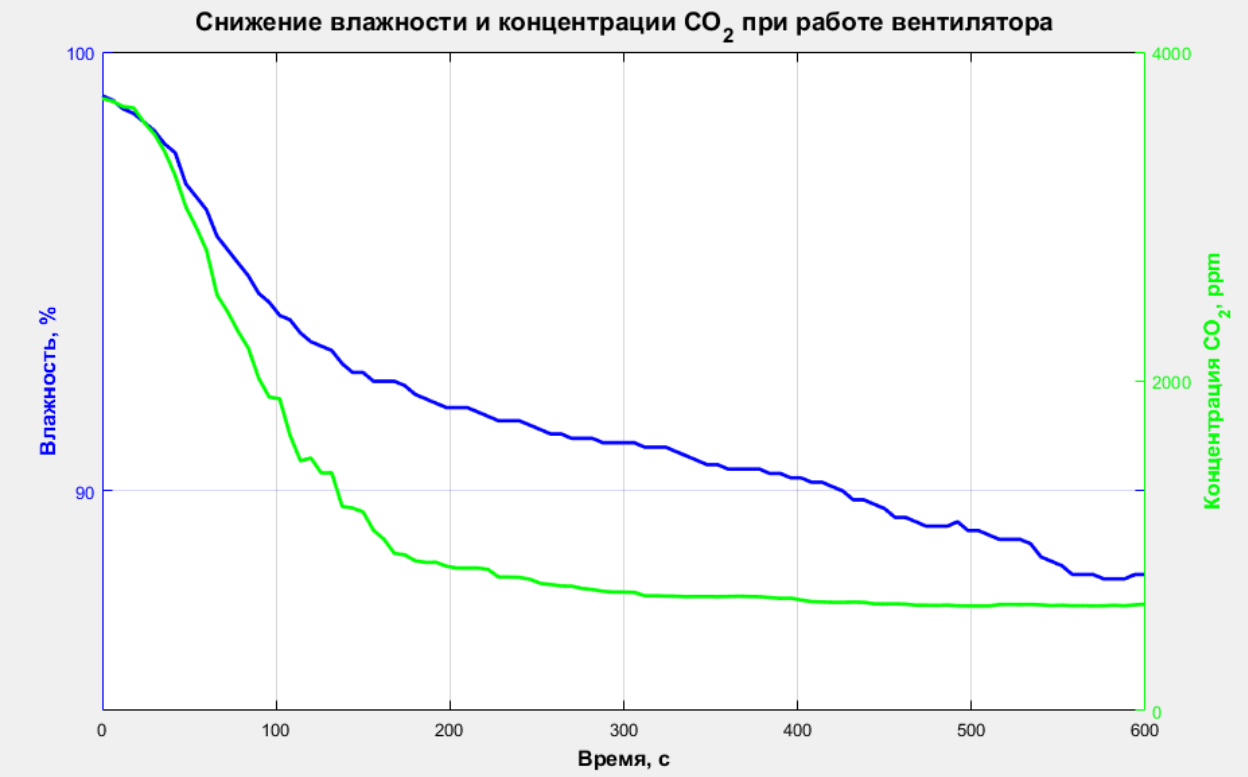


***Рис. 5**. График влажности и CO_2 / **Fig. 5**. Graph for Humidity and CO_2*

Динамика температурного контура. Реализованный ПИД-регулятор успешно справился с задачей нагрева.

Нагрев. Подъем температуры с 15,5 °C до заданной уставки 23,0 °C занял 1362 секунды (около 22,7 минут). График нагрева (рис. 6) носит характер апериодического звена с практически постоянной скоростью нарастания на основном участке, что свидетельствует о сбалансированной мощности нагревателя и теплопотерях. Перерегулирование при выходе на уставку отсутствовало.

Инерционность системы. После отключения нагревателя в момент t = 1362 с температура продолжила рост на 0,04 °C в течение следующих 6 секунд из-за тепловой инерции нагревательного элемента, достигнув локального максимума 23,04 °C. Это подтверждает необходимость учета инерционности в алгоритме управления.

Охлаждение. Процесс остывания камеры после выключения нагрева до температуры 18 °C занял примерно 900 секунд (15 минут). Анализ кривой охлаждения позволяет оценить постоянную времени теплового контура камеры, которая в данных условиях составила порядка нескольких сотен секунд.



***Рис. 6**. График изменения температуры*

***Fig. 6**. Graph for Temperature change*

Работоспособность систем мониторинга и взаимодействия. В течение всех испытаний штатно функционировали вспомогательные подсистемы:

- Веб-интерфейс (API /api/status) обеспечивал стабильную и бесперебойную выдачу данных для внешнего скрипта сбора.
- Система диагностики корректно отслеживала состояние датчика SCD40, не зафиксировав сбоев за время эксперимента.
- Работа вентилятора непрерывно в течение 10 минут и нагревателя в течение 22.7 минут не вызвала срабатывания алгоритма отправки уведомлений о "долгой работе", так как это время было в пределах заданных лимитов (5 минут для вентилятора и нагревателя), что подтверждает корректность настройки порогов.

Представленная система, реализующая этапное адаптивное управление, позволяет программно задавать и точно поддерживать уникальные наборы параметров (T, H, CO_2, свет) для каждой фазы развития биологического объекта (инкубация, плодоношение, созревание). Это напрямую создает предпосылки для:

- повышения выхода биомассы (урожайности) за счет оптимизации условий на каждом этапе;
- улучшения качества продукции (форма, размер, цвет) за счет точного контроля морфогенных факторов (CO_2, свет);

• сокращения продолжительности производственного цикла за счет исключения периодов стресса и задержки развития;

• снижения риска бактериального и грибкового загрязнения за счет исключения периодов экстремальной влажности и застоя воздуха.

На основе предоставленных технических характеристик исполнительных устройств проведен анализ энергопотребления системы в различных режимах работы. Это позволяет оценить экономическую эффективность и требования к источнику питания (табл. 1).

Таблица 1. Энергопотребление компонентов системы

Table 1. Power consumption of system components

Устройство	Напряжение (В)	Ток (А)	Мощность (Вт)	Примечание
Нагревательный прибор	12	4,3	51,6	Основной потребитель. Управляется ШИМ, что снижает среднюю мощность
Светодиодная лента	12	0,8	9,6	Циклическое включение по программе этапов
Вентилятор	12	0,3	3,6	Включается периодически для регулировки CO_2 и влажности
Парогенератор	5	0,3	1,5	Включается периодически для повышения влажности
Микроконтроллер ESP8266	5	0,2	1,0	Потребляет энергию постоянно, с небольшими колебаниями

Расчет сценариев потребления:

1. Максимальная пиковая нагрузка (включены все устройства одновременно):

$P_{max} = 51.6 + 9.6 + 3.6 + 1.5 + 1.0 = 67.3$ Вт.

2. Типичная нагрузка при активном регулировании (работают нагреватель на 50 % ШИМ, вентилятор и контроллер):

$P_{typical} = (51.6 * 0.5) + 3.6 + 1.0 = 25.8 + 3.6 + 1.0 = 30.4$ Вт.

3. Энергия, потребляемая за сутки (оценочно для фазы активного роста грибов):

- Нагреватель: 6 часов работы на 50 % ШИМ – 51.6 Вт * 0.5 * 6 ч = 154.8 Вт·ч.
- Светодиоды: 12 часов работы – 9.6 Вт * 12 ч = 115.2 Вт·ч.
- Вентилятор и увлажнитель: 3 часа работы суммарно – (3.6+1.5) Вт * 3 ч = 15.3 Вт·ч.
- Контроллер: 24 часа – 1.0 Вт * 24 ч = 24 Вт·ч.
- Итого за сутки: ≈ 309.3 Вт·ч (~0.31 кВт·ч).

Система является энергоэффективным решением для задач лабораторного и маломасштабного применения. Использование ШИМ-управления для самого мощного потребителя (нагревателя) и циклической работы остальных устройств позволяет минимизировать расход энергии. Для автономной работы от аккумуляторов потребуется источник емкостью не менее ≈65 А·ч при 12В (с учетом глубины разряда и потерь).

Сопоставим разработанную систему с существующими рыночными и открытыми решениями, чтобы оценить ее конкурентные преимущества и рыночную нишу. Сравнение проведено по ключевым параметрам: функциональность, стоимость, гибкость и открытость платформы (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительный анализ систем управления микроклиматом

Table 2. Comparative analysis for microclimate control systems

Параметр	**Разработанная система (на ESP8266)**	**Промышленные ПЛК (Siemens, Schneider Electric)**	**Популярные open-source проекты (Arduino/RPi)**
Целевая сфера	Научные исследования, малые биореакторы, образование	Крупные промышленные и агрокомплексы	Хобби-проекты, частные теплицы, прототипирование
Стоимость внедрения	Крайне низкая (< $50 за контур)	Очень высокая (от $200 за контроллер + монтаж)	Низкая/умеренная ($50-$200)
Функциональность	Готовый комплекс: этапное управление, ПИД/релейное регулирование, REST API, облачные уведомления	Максимальная: интеграция в SCADA, резервирование, диагностика	Базовая/кастомная: требует глубокой самостоятельной разработки
Гибкость	Очень высокая (открытый код, модульность)	Очень низкая («закрытые» системы)	Высокая (требует компетенций пользователя)
Ключевое преимущество	Оптимальное соотношение «цена/функциональность/гибкость» для исследовательских и малых прикладных задач	Надежность и соответствие пром. стандартам	Максимальная доступность и образовательная ценность

ВЫВОДЫ

1. Достигнута основная цель работы: разработана и апробирована в лабораторных условиях автономная робототехническая система управления микроклиматом на базе микроконтроллера ESP8266. Система реализует заданный функционал этапного адаптивного управления, мониторинга и удаленного взаимодействия.

2. Разработанная система занимает уникальную рыночную нишу, заполняя пробел между дорогими промышленными комплексами и любительскими open-source проектами. Ее ключевое конкурентное преимущество – предоставление индустриального уровня функциональности (ПИД-регулирование, этапное управление, REST API) при стоимости и гибкости DIY-решения. Это делает ее идеальным инструментом для научно-исследовательских лабораторий, образовательных учреждений (таких как ГГНТУ) и технологических стартапов на ранней стадии валидации гипотез. В отличие от многих open-source аналогов представленная система является законченным, полнофункциональным продуктом, готовым к использованию без глубокой доработки, что подтверждается проведенными испытаниями.

3. Подтверждена работоспособность ключевых алгоритмов:

- Релейное управление вентилятором эффективно и предсказуемо снижает избыточную влажность и концентрацию CO_2, приводя параметры к равновесию с внешней средой [12].
- Реализация ПИД-регулирования для температурного контура обеспечивает плавный и безударный нагрев до заданной уставки без перерегулирования [2, 6]. Экспериментально определенное время выхода на режим и динамика остывания служат основой для дальнейшей тонкой настройки коэффициентов регулятора под конкретную тепловую нагрузку.

4. Выявлены области для оптимизации и дальнейших исследований:

- Наблюдаемая тепловая инерция нагревательного элемента указывает на целесообразность внедрения в алгоритм управления элемента прогноза или использования ПИД-регулятора с учетом производной по выходу [2].

• Для сокращения времени нагрева и уменьшения энергопотребления в реальных условиях необходима доработка конструкции камеры (утепление), что отмечено в ходе испытаний.

• Полученные экспериментальные кривые являются ценным материалом для уточнения параметров математической модели (постоянных времени τ_T, τ_H, τ_C), что повысит точность симуляций.

• Разработанная система, несмотря на автономное выполнение заданных программ, не обеспечивает полную независимость от участия оператора на этапе планирования. Переход между технологическими этапами выращивания и их параметры (уставки, длительность) требуют предварительной ручной настройки через веб-интерфейс. Таким образом, автономность системы проявляется в циклическом поддержании заданных параметров в рамках установленного этапа, но не в самостоятельном планировании полного производственного цикла.

5. Практическая значимость: разработанный комплекс представляет собой законченное, функциональное и масштабируемое решение для автоматизации биотехнологических процессов, требующих точного контроля микроклимата [9, 10]. Использование доступной элементной базы (ESP8266, SCD40) и открытых облачных сервисов (ntfy.sh) делает систему экономически эффективной и легко воспроизводимой для задач точного земледелия, лабораторных фитотронов и малогабаритных биореакторов.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило корректность выбранных архитектурных и алгоритмических решений. Система готова к более длительным испытаниям на реальных биологических объектах (например, на различных стадиях выращивания грибов) для сбора агротехнических данных и окончательной валидации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анучин А. С.* Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.

2. *Астрём К. Й., Хэгглунд Т.* Расширенные возможности ПИД-регулирования / пер. с англ. под ред. В. В. Клёнова. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 365 с. ISBN: 5-94774-355-6

3. *Байбикова Т. Н., Доморацкий Е. П.* Система имитационного моделирования операций, геометрических характеристик и методов импульсной оптической томографии микрообъектов ядерного топлива // Автоматизация и IT в энергетике. 2020. № 5(244). С. 34–41. DOI: 10.25728/datsys.2020.5.4. EDN: QZWQIW

4. *Бараусов К. В., Винниченко А. В.* Сравнительный анализ существующих систем обслуживания оборудования // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сборник статей VII Международного форума (Санкт-Петербург, 2025 г.). 2025. С. 387–388. EDN: CUYHQR

5. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2004. 747 с. (Специалист). ISBN: 5-93913-035-6

6. *Вальнев В. В., Котелева Н. И.* К вопросу об автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2024. № 5-2. С. 276–283. DOI: 10.17513/snt.40040. EDN: JUVMAH

7. *Горькавый М. А., Горькавый А. И., Мельниченко М. А.* Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ

8. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.

9. *Кокиева Г. Е., Дабаев А. Б.* Система автоматизации управления микроклиматом теплицы // Ларионовские чтения-2021: сборник научно-исследовательских работ по итогам научно-практической конференции. 2021. С. 139–143. EDN: HSCPXI

10. *Кокиева Г. Е., Друзьянова В. П.* Исследование автоматизированной системы управления микроклиматом парника // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 1(57). С. 70–78. DOI: 10.24412/1999-6837-2021-1-70-78. EDN: WYISMN.

11. *Котелева Н. И., Вальнев В. В., Марков В. В.* Программный сервис для контроля качества выполнения сварочных работ // Цветные металлы. 2025. № 9. С. 68–76. DOI: 10.17580/tsm.2025.09.07.

12. *Матвеев Н. Н., Семенов В. В.* Системы автоматического управления с релейными элементами. М.: Наука, 1986. 336 с.

13. *Минцаев М. Ш., Якубов Т. В., Барзаева М. А.* Технико-экономическое обоснование использования геотермальных ресурсов для отопления тепличных комплексов // Вести газовой науки. 2021. № 4(49). С. 176–183. DOI: 10.52823/2073-5069-2021-4-49-176-183. EDN: HYHDIB

14. *Федоренко В. Ф., Харитонов М. П., Смирнов И. Г., Аристов Э. Г.* Перспективы роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений // Агроинженерия. 2024. Т. 26. № 1. С. 11–17. DOI: 10.26897/2687-1492-2024-1-11-17

15. Simulink for Control System Design and Simulation // MathWorks: Documentation Center. 2024. URL: https://www.mathworks.com/help/simulink/control-system-design-and-tuning.html (дата обращения: 17.03.2025).

REFERENCES

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric Drive Control Systems]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI. 2015. 373 p. (In Russian)

2. Åström K.J., Hägglund T. *Rasshirennye vozmozhnosti PID-regulirovaniya* [Advanced PID Control]. Translated from English; ed. by V.V. Klyonov. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy. 2006. 365 p. ISBN: 5-94774-355-6. (In Russian)

3. Baybikova T.N., Domoratskiy E.P. Simulation modeling system for operations, geometric characteristics, and methods of pulsed optical tomography of nuclear fuel micro-objects. *Avtomatizatsiya i IT v energetike* [Automation and IT in Energy]. 2020. No. 5(244). Pp. 34–41. DOI: 10.25728/datsys.2020.5.4. EDN: QZWQIW. (In Russian)

4. Barausov K.V., Vinnichenko A.V. Comparative analysis of existing equipment maintenance systems. In: *Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy: sbornik statey VII Mezhdunarodnogo foruma* [Metrological Support of Innovative Technologies: Proceedings of the VII International Forum]. Saint Petersburg, 2025. Pp. 387–388. EDN: CUYHQR. (In Russian)

5. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control Systems]. 4th ed., revised and expanded. Saint Petersburg: Professiya. 2004. 747 p. (Spetsialist). ISBN: 5-93913-035-6. (In Russian)

6. Val'nev V.V., Koteleva N.I. On the automation of industrial equipment maintenance and repair. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie* [Modern high technologies. regional application]. 2024. No. 5-2. Pp. 276–283. DOI: 10.17513/snt.40040. EDN: JUVMAH. (In Russian)

7. Gor'kavyy M.A., Gor'kavyy A.I., Mel'nichenko M.A. Optimization of a robotic technological process based on a neural network simulation model of energy consumption. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics]. 2023. No. 66(2). Pp. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ. (In Russian)

8. Dorf R.C., Bishop R.H. *Sovremennye sistemy upravleniya* [Modern Control Systems]. Translated from English by B.I. Kopylov. Moscow: Laboratoriya Bazovykh Znanii. 2002. 832 p. (In Russian)

9. Kokieva G.E., Dabaev A.B. Greenhouse microclimate control automation system. In: *Larionovskie chteniya-2021: sbornik nauchno-issledovatel'skikh rabot po itogam nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Larionov Readings-2021: Collection of Research Papers Based on the Results of the Scientific and Practical Conference]. 2021. Pp. 139–143. EDN: HSCPXI. (In Russian)

10. Kokieva G.E., Druzyanova V.P. Research of an automated greenhouse microclimate control system. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik* [Far Eastern Agrarian Bulletin]. 2021. No. 1(57). Pp. 70–78. DOI: 10.24412/1999-6837-2021-1-70-78. EDN: WYISMN. (In Russian)

11. Koteleva N.I., Val'nev V.V., Markov V.V. Software service for quality control of welding work performance. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous Metals]. 2025. No. 9. Pp. 68–76. DOI: 10.17580/tsm.2025.09.07. (In Russian)

12. Matveev N.N., Semenov V.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s releynymi elementami* [Automatic Control Systems with Relay Elements]. Moscow: Nauka, 1986. 336 p. (In Russian)

13. Mintsaev M.Sh., Yakubov T.V., Barzaeva M.A. Technical and economic justification for the use of geothermal resources for heating greenhouse complexes. *Vesti gazovoy nauki* [Gas Science News]. 2021. No. 4(49). Pp. 176–183. DOI: 10.52823/2073-5069-2021-4-49-176-183. EDN: HYHDIB. (In Russian)

14. Fedorenko V.F., Kharitonov M.P., Smirnov I.G., Aristov E.G. Prospects for the robotization of subsurface irrigation and plant fertilization processes. *Agroinzheneriya* [Agricultural Engineering]. 2024. No. 26(1). Pp. 11–17. DOI: 10.26897/2687-1492-2024-1-11-17. (In Russian)

15. Simulink for Control System Design and Simulation. (2024). MathWorks: Documentation Center. Available at: https://www.mathworks.com/help/simulink/control-system-design-and-tuning.html (accessed: 17.03.2025)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Тахаев У. Р., Исаева М. Р. – разработка методологии;
Тахаев У. Р., Садулаев А. А-В. – программная реализация и валидация;
Садулаев А. А-В. – математическое моделирование и формальный анализ;
Насуханов А. И. – расследование и сбор данных;
Исаева М. Р. – подготовка исходного варианта рукописи.
Все авторы – написание, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Author's contribution:

Takhaev U.R. and Isaeva M.R. – methodology development;
Takhaev U.R. and Sadulaev A. A-V. – software implementation and validation;
Sadulaev A.A-V. – mathematical modeling and formal analysis;
Nasukhanov A.I. – investigation and data collection;
Isaeva M.R. – manuscript preparation;
All authors – writing, reviewing, and editing the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Тахаев Усам Русланович, аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

takhaev.usam@bk.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2931-0099, SPIN-код: 4551-8286

Исаева Мадина Ризвановна, канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

atppdissovet@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3068-9482, SPIN-код: 7791-1120

Садулаев Аюб Абдул-Вахидович, ассистент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7072-1424, SPIN-код: 9593-4929

Насуханов Ахмед Ибрагимович, старший лаборант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7723-9464, SPIN-код: 4823-6877

Information about the authors

Usam R. Takhaev, Postgraduate Student, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

takhaev.usam@bk.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2931-0099, SPIN-code: 4551-8286

Madina R. Isaeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

atppdissovet@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3068-9482, SPIN-code: 7791-1120

Ayub A.-V. Sadulaev, Assistant Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7072-1424, SPIN-code: 9593-4929

Ahmed I. Nasuhanov, Senior Laboratory Assistant, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7723-9464, SPIN-code: 4823-6877

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 621.865.8 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-75-89
CWKQZO

Разработка математической модели для шестизвенного промышленного робота-манипулятора с механическим захватом

З. Л. Хакимов✉, В. В. Шухин, М. А. Лабазанов

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова
364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100

Аннотация. Актуальность разработки точной математической модели для манипуляторов данного типа обусловлена растущими требованиями к точности, скорости и автономности робототехнических систем.

Цель исследования – разработка целостной математической модели шестизвенного робота-манипулятора, включающей кинематическое и динамическое описание, а также модель его механического захвата.

Методы исследования. В работе использован интегрированный подход, сочетающий классические методы робототехники с учетом особенностей силового захвата для решения задач контактного взаимодействия. Также использованы методы Денавита–Хартенберга, уравнения Лагранжа–Эйлера и полигональное представление.

Результаты. В статье представлен подход к разработке комплексной математической модели шестизвенного робота-манипулятора, оснащенного механическим захватом. Предложен единый формализм для моделирования, управления и анализа манипулятора. Модель включает в себя кинематическое, динамическое и геометрическое описание, необходимое для решения задач точного позиционирования и силового взаимодействия с объектами манипулирования. Проведенное численное моделирование в среде MATLAB/Simulink подтверждает корректность модели и демонстрирует ее применимость для синтеза траекторий и систем управления.

Заключение. Разработанная модель является универсальным инструментом и может быть адаптирована для конкретных промышленных манипуляторов путем корректировки параметров D-H и инерционных характеристик, что открывает широкие возможности для ее практического применения в робототехнике.

Ключевые слова: робот-манипулятор, шестизвенная кинематическая цепь, прямая и обратная задачи кинематики, динамика манипуляторов, математическое моделирование, система управления

Поступила 13.12.2025, одобрена после рецензирования 28.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Хакимов З. Л., Шухин В. В., Лабазанов М. А. Разработка математической модели для шестизвенного промышленного робота-манипулятора с механическим захватом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 75–89. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-75-89

© Хакимов З. Л., Шухин В. В., Лабазанов М. А. 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

MSC: 68T40 Original article

Mathematical model development for a six-link industrial robotic arm with mechanical gripper

Z.L. Khakimov✉, V.V. Shukhin, M.A. Labazanov

Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov
100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia

Abstract. The need to develop an accurate mathematical model for this type of manipulator is driven by increasing demands on the precision, speed, and autonomy of robotic systems.

Aim. This study is to develop a comprehensive mathematical model of a six-link robotic manipulator, including a kinematic and dynamic description, as well as a model of its mechanical gripper.

Research methods. This study utilizes an integrated approach combining classical robotics methods with consideration of the specific features of a force gripper to solve contact interaction problems. The Denavit-Hartenberg methods, the Lagrange-Euler equations, and a polygonal representation are also used.

Results. This article presents an approach to developing a comprehensive mathematical model of a six-link robotic manipulator equipped with a mechanical gripper. A unified formalism for modeling, control, and analysis of the manipulator is proposed. The model includes a kinematic, dynamic, and geometric description necessary for solving problems of precise positioning and force interaction with manipulated objects. Numerical simulations conducted in MATLAB/Simulink confirm the model's validity and demonstrate its applicability for trajectory and control system synthesis.

Conclusion. The developed model is a universal tool and can be adapted to specific industrial manipulators by adjusting the D-H parameters and inertial characteristics, opening up broad possibilities for its practical application in robotics.

Keywords: robot manipulator, six-link kinematic chain, direct and inverse kinematic problems, manipulator dynamics, mathematical modeling, control system

Submitted 13.12.2025, approved after reviewing 28.01.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Khakimov Z.L., Shukhin V.V., Labazanov M.A. Mathematical model development for a six-link industrial robotic arm with mechanical gripper. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 75–89. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-75-89

Введение

Шестизвенные манипуляторы, обладающие шестью степенями подвижности, являются наиболее распространенным классом промышленных роботов. Такая конструкция, часто называемая «универсальной», обеспечивает необходимую пространственную гибкость для произвольного позиционирования и ориентации рабочего органа в рабочей зоне, что делает их незаменимыми в задачах сборки, сварки, палетизации и обработки материалов.

Актуальность разработки точной математической модели для манипуляторов данного типа обусловлена растущими требованиями к точности, скорости и автономности робототехнических систем. Модель служит основой для:

1) синтеза алгоритмов управления;
2) отработки и оптимизации траекторий в виртуальной среде;
3) прогнозирования силового взаимодействия с объектами и окружающей средой;
4) проведения анализа устойчивости и производительности системы.

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Целью данной работы является разработка целостной математической модели шестизвенного робота-манипулятора, включающей кинематическое и динамическое описание, а также модель его механического захвата.

Научная новизна заключается в интегрированном подходе, сочетающем классические методы робототехники с учетом особенностей силового захвата для решения задач контактного взаимодействия.

Обзор существующих подходов

При разработке математических моделей промышленных манипуляторов в современной литературе выделяют несколько основных подходов:

- Классический подход, основанный на методе Денавита–Хартенберга и уравнениях Лагранжа–Эйлера, обеспечивает высокую точность и физическую интерпретируемость, однако требует сложных вычислений для анализа рабочего пространства [1, 2].
- Геометрические и алгоритмические методы (например, метод Пайпера) эффективны для решения обратных кинематических задач, но зачастую не учитывают динамику и силовое взаимодействие [3].
- Современные подходы активно используют полигональное моделирование и аппарат компьютерной геометрии для анализа коллизий и доступных зон [4, 5], однако редко интегрируются с динамическими моделями в едином формализме.

Представленный в данной работе интегрированный подход объединяет преимущества перечисленных методов. В отличие от работ [1, 2] наша модель дополнена детальной геометрической аппроксимацией звеньев и анализом рабочего пространства методом Монте-Карло, что позволяет планировать траектории с учетом коллизий. В отличие от подходов [3, 4] мы в явном виде рассматриваем динамику системы и силовое взаимодействие через модель механического захвата на основе условий трения Кулона, что критически важно для задач захвата и манипулирования. Таким образом, предлагаемая модель является более комплексной и практико-ориентированной, поскольку охватывает весь цикл от кинематического описания до анализа силового взаимодействия в единой вычислительной среде (MATLAB/Simulink)».

Общая структура системы управления

Предлагаемая математическая модель является ядром системы управления, общая структура которой представлена на рисунке 1. Система работает по замкнутому контуру. На основе задания целевой траектории для рабочего органа (схвата) **планировщик траектории** формирует плавный закон движения. **Блок обратной кинематики** (ОЗК) преобразует это задание в требуемые углы в сочленениях q. Для компенсации динамических эффектов (инерции, сил Кориолиса, гравитации) используется **динамический компенсатор**, реализующий вычисление управляющих моментов τ по уравнениям Лагранжа–Эйлера. Эти моменты поступают на **приводы** (сервомоторы), которые приводят в движение **физическую систему** манипулятора и захвата. Обратная связь обеспечивается **датчиками** (энкодерами, тензодатчиками), сигналы которых фильтруются и обрабатываются. **Блок прямой кинематики** (ПЗК) по измеренным углам q вычисляет текущее положение и ориентацию схвата T, замыкая контур управления. Таким образом, разработанная модель охватывает ключевые блоки этой схемы: кинематику (ПЗК/ОЗК), динамику (компенсатор) и взаимодействие через захват.

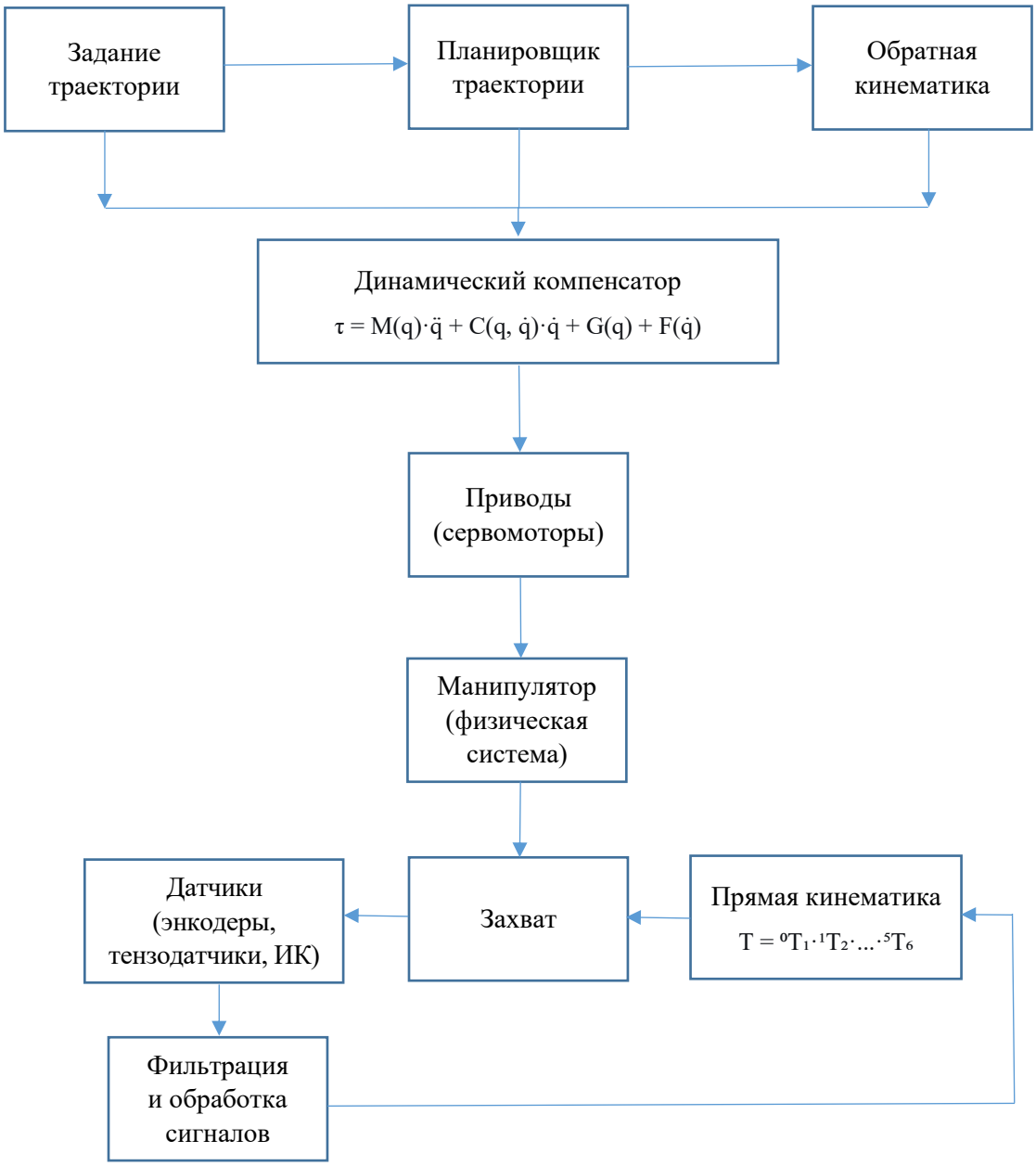


Рис. 1. *Блок-схема системы управления манипулятором*

Fig. 1. *Block diagram of the manipulator control system*

Кинематическая модель манипулятора

Кинематическая модель манипулятора описывает геометрию и движение манипулятора без учета сил, его вызывающих. Для шестизвенного манипулятора с вращательными сочленениями (рис. 2) решаются две основные задачи [13, 14, 15].

Прямая задача кинематики (ПЗК) определяет положение и ориентацию схвата (X, Y, Z, Roll, Pitch, Yaw) по известным углам в сочленениях ($\theta_1 ... \theta_6$). Стандартным методом решения является использование **алгоритма Денавита–Хартенберга (D-H)**. Для каждого звена i определяются четыре параметра:

a_i – длина звена (расстояние вдоль оси x_i от z_{i-1} до z_i);

α_i – угол скручивания звена (угол вокруг оси x_i от z_{i-1} до z_i);

d_i – смещение (расстояние вдоль оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i);
θ_i – угол вращения (угол вокруг оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i).

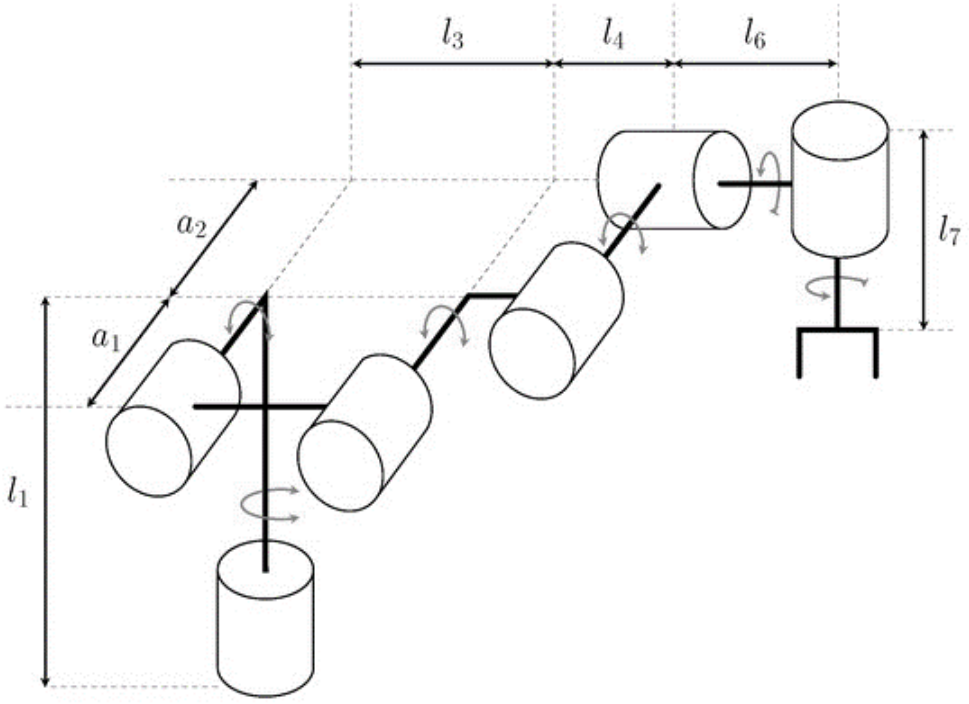


***Рис. 2**. Шестизвенный манипулятор с вращательными сочленениями*

***Fig. 2**. Six-link manipulator with rotary joints*

Матрица однородного преобразования $^{i-1}T_i$, описывающая переход от системы координат (i-1) к системе i, имеет вид:

$$^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cdot\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\cdot\sin(\alpha_i) & (a_i)\cdot\cos(\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cdot\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\cdot\sin(\alpha_i) & (a_i)\cdot\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Результирующее положение схвата относительно базовой системы координат определяется произведением матриц:

$$T_base_tool = {}^{0}T_1 * {}^{1}T_2 * {}^{2}T_3 * {}^{3}T_4 * {}^{4}T_5 * {}^{5}T_6 .$$

Обратная задача кинематики (ОЗК) является более сложной и находит набор углов в сочленениях ($\theta_1 ... \theta_6$) для достижения заданного положения и ориентации схвата. Для шестизвенных манипуляторов с пересекающимися осями 4-го, 5-го и 6-го сочленений (сферическое запястье) часто применяют геометрико-алгебраические методы, такие как метод Пайпера. Решение может иметь до 8 различных кинематических конфигураций, однако некоторые из них могут быть недоступны из-за сингулярностей, возникающих при вырождении матрицы Якоби [10], выбор оптимальной из них осуществляется на основе минимизации пути, обхода препятствий или энергозатрат [11, 12].

Динамическая модель манипулятора

Динамическая модель описывает взаимосвязь между движением манипулятора и силами/моментами, вызывающими это движение. Она необходима для проектирования систем управления, учитывающих инерционные, кориолисовые и гравитационные силы.

Уравнения динамики могут быть получены с использованием формализма Лагранжа–Эйлера, что приводит к компактной матричной форме:

$$\tau = M(q)\cdot \ddot{q} + C(q,\dot{q})\cdot \dot{q} + G(q) + F(\dot{q}),$$

где:

τ – вектор обобщенных моментов в сочленениях (размерности 6 x 1);

q, $\dot{q}$, $\ddot{q}$ – векторы обобщенных координат (углов), скоростей и ускорений;

$M(q)$ – симметричная, положительно определенная матрица инерции манипулятора (6 x 6);

$C(q,\dot{q})$ – матрица, учитывающая кориолисовы и центробежные силы (6 x 6);

$G(q)$ – вектор гравитационных моментов (6 x 1);

$F(\dot{q})$ – вектор моментов сил трения (вязкого и сухого).

Расчет коэффициентов этих матриц основан на знаниях о массах, центрах масс и тензорах инерции каждого звена, что делает этап параметрической идентификации критически важным для точности модели.

Модель механического захвата

Механический захват (схват) является конечным элементом манипулятора, обеспечивающим силовое взаимодействие с объектом. Его модель включает кинематику и силовое замыкание [8, 9].

Для двухпальцевого захвата прямого действия кинематику можно описать одной обобщенной координатой g (расстояние между губками). Преобразование от системы координат схвата (звено 6) до точек контакта на губках описывается простой матрицей смещения.

Ключевым является условие статического равновесия удерживаемого объекта. Для надежного удержания без проскальзывания необходимо обеспечить силовое замыкание. Для точечного контакта с трением (модель Кулона) это сводится к проверке условия:

$$|F_t| \le \mu * F_n,$$

где F_t и F_n – тангенциальная и нормальная составляющие силы реакции в контакте, μ – коэффициент трения. Модель позволяет рассчитать требуемое усилие сжатия губок (τ_g) для удержания объекта массой m под действием ускорений, вызванных движением манипулятора:

$$\tau_g = (m\|a_g\|)/(2\mu),$$

где a_g – результирующее ускорение объекта в точке захвата, рассчитанное на основе динамической модели манипулятора.

Геометрическое моделирование и рабочее пространство

Для анализа доступности точек и планирования траекторий без коллизий строится геометрическая модель манипулятора в виде совокупности простых тел (цилиндров, параллелепипедов). Рабочее пространство – множество всех точек, достижимых центром схвата [6, 7].

Рабочее пространство шестизвенного манипулятора представляет собой сложную объемную фигуру, которую можно аппроксимировать как сферическую оболочку с внутренней полостью (мертвой зоной у основания). Его границы определяются длинами звеньев и ограничениями углов в сочленениях. Анализ проводится либо аналитически (для упрощенных конфигураций), либо численно – путем случайной выборки конфигураций и построения облака точек методом Монте-Карло (рис. 3).

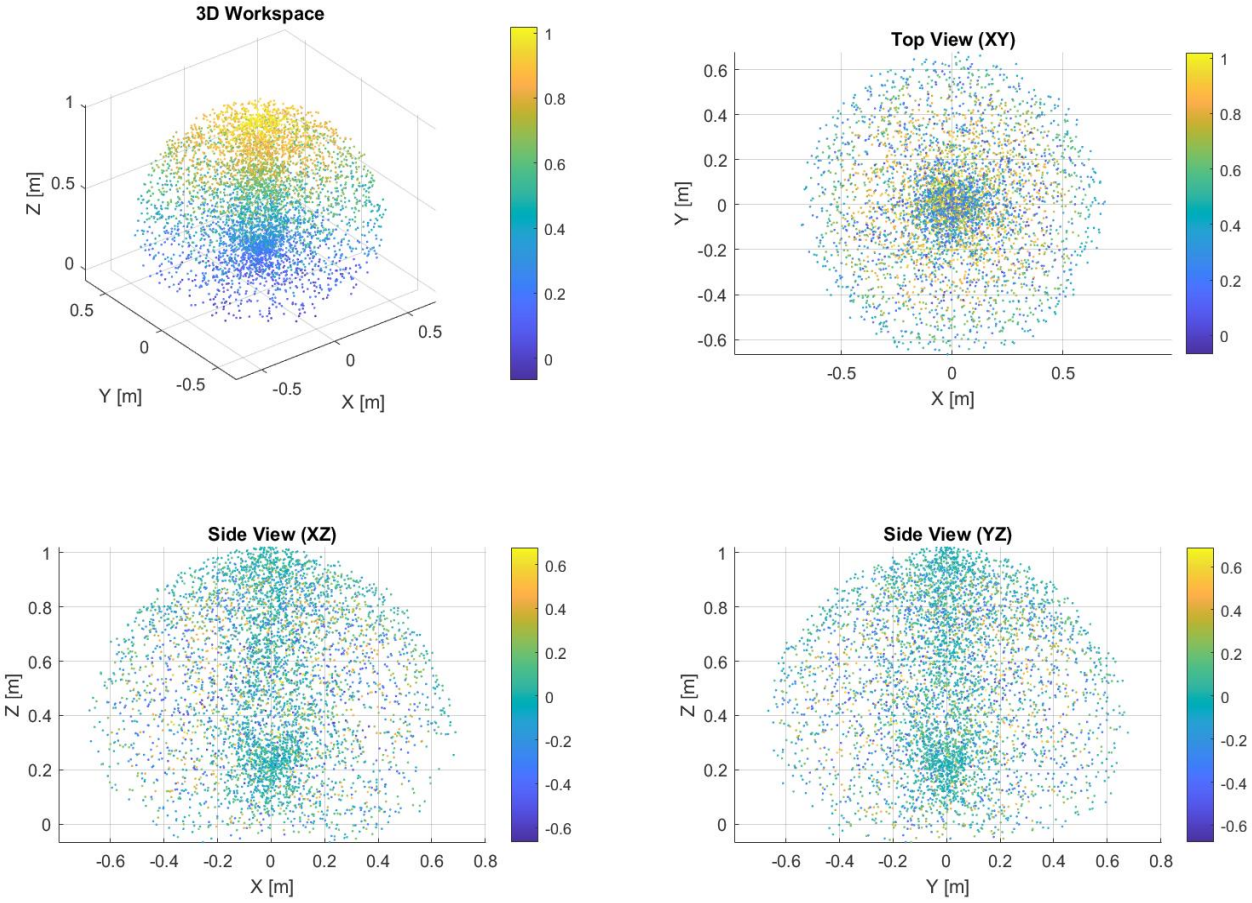


Рис. 3. *Построение облака точек методом Монте-Карло*

Fig. 3. *Point cloud simulation using the Monte-Carlo Method*

Верификация модели в MATLAB/Simulink

Для верификации разработанной математической модели было проведено численное моделирование в среде MATLAB/Simulink с использованием Robotics Toolbox. Имитировалось движение манипулятора по типовой траектории «поднять-переместить-опустить» с объектом в захвате (рис. 4 – 14).



***Рис. 4**. Движение манипулятора по типовой траектории «поднять-переместить-опустить» с объектом в захвате*

***Fig. 4**. Movement of the manipulator along a typical "lift-move-lower" trajectory with an object in its grip*

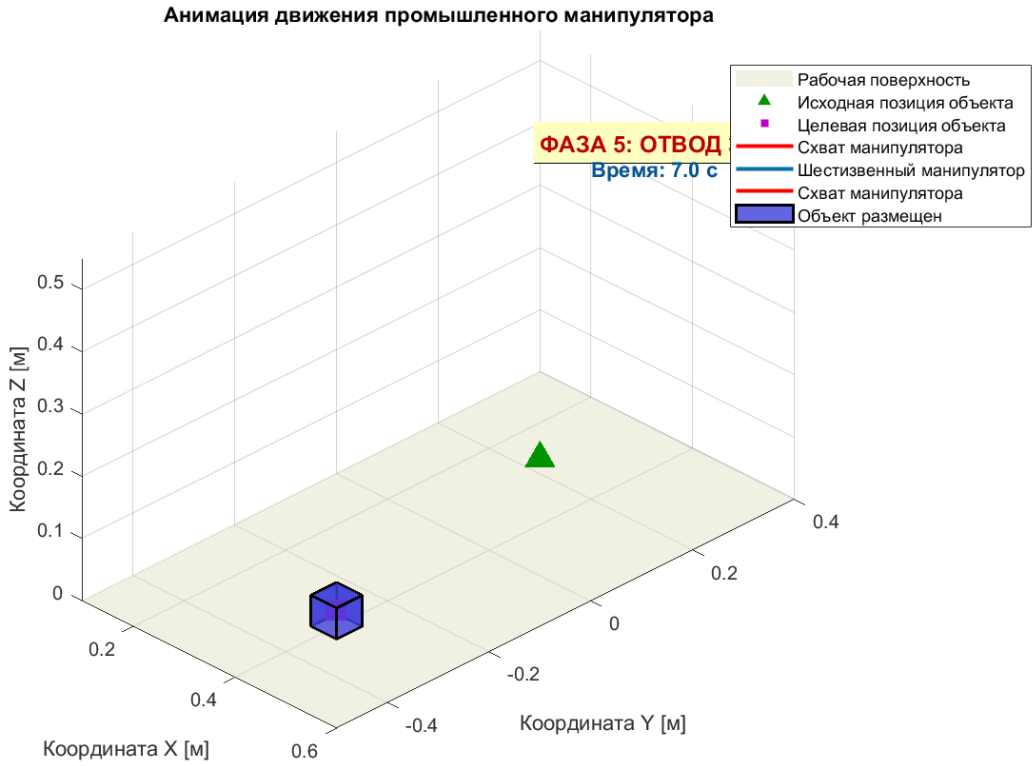


***Рис. 5**. Анимация движения промышленного робота-манипулятора*

***Fig. 5**. Industrial manipulator movement animation*

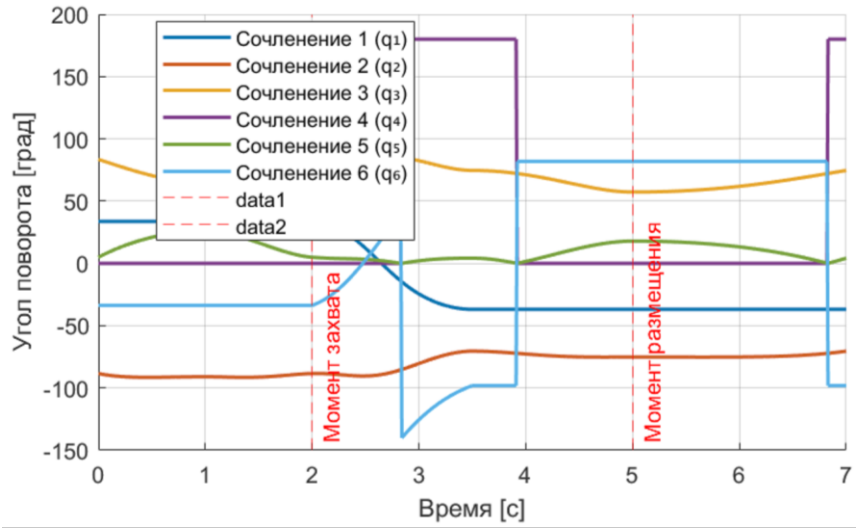


***Рис. 6**. Углы в кинематических сочленениях / **Fig. 6**. Angles in kinematic joints*

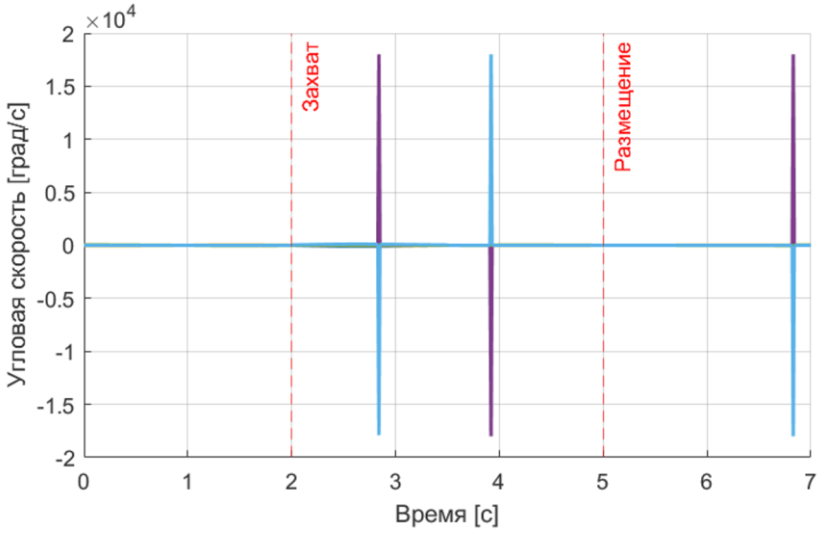


***Рис. 7**. Скорости вращения сочленений / **Fig. 7**. Joint rotation speeds*

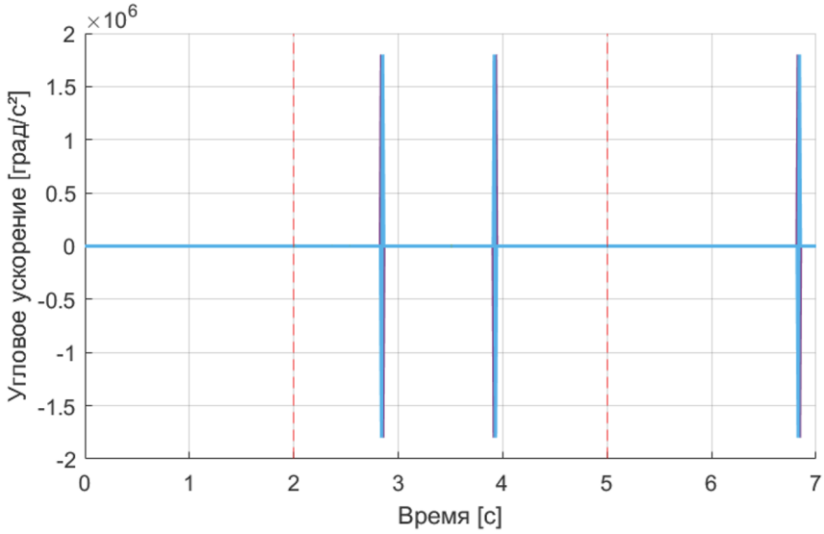


***Рис. 8**. Ускорения сочленений / **Fig. 8**. Joint accelerations*

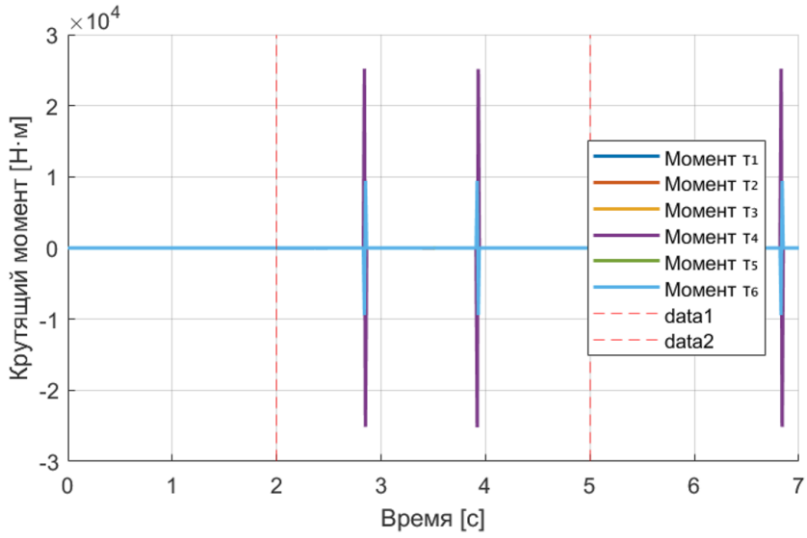


Рис. 9. *Моменты в приводных сочленениях* / ***Fig. 9***. *Moments in drive joints*

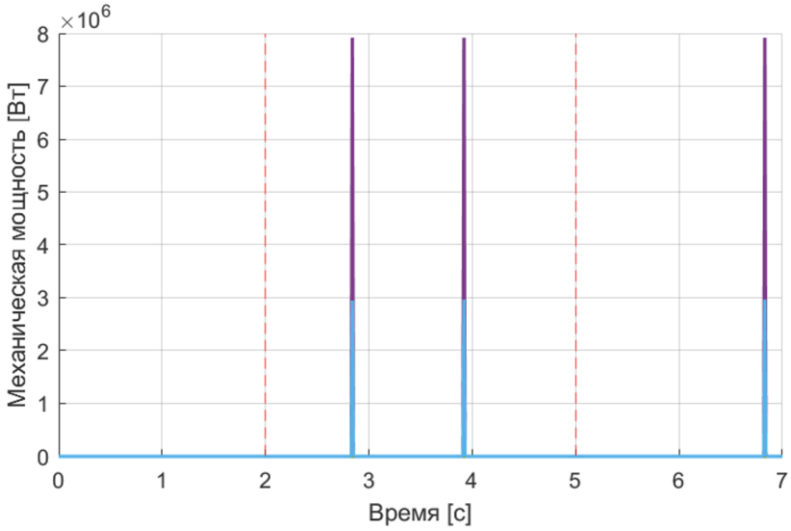


Рис. 10. *Мгновенная мощность приводов* / ***Fig. 10***. *Instantaneous power of drives*

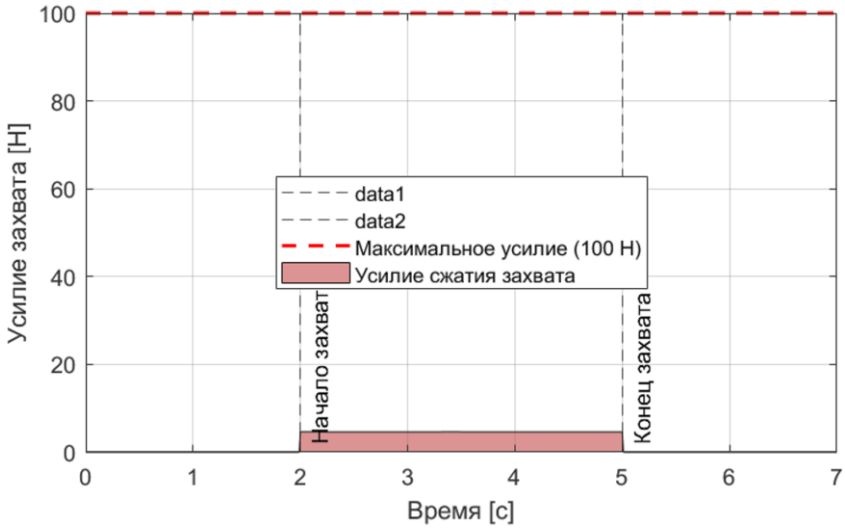


Рис. 11. *Динамика усилия механического захвата* / ***Fig. 11***. *Dynamics of mechanical gripping force*

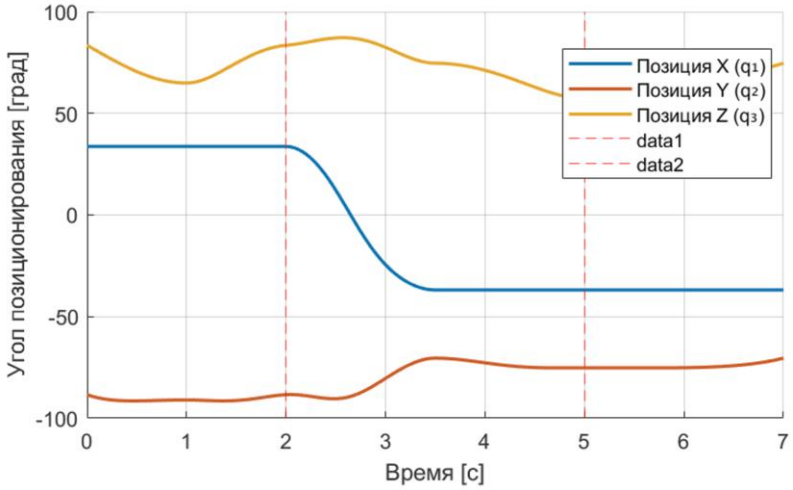


Рис. 12. *Положение схвата (базовые степени подвижности)*

Fig. 12. *Grip position (basic degrees of mobility)*

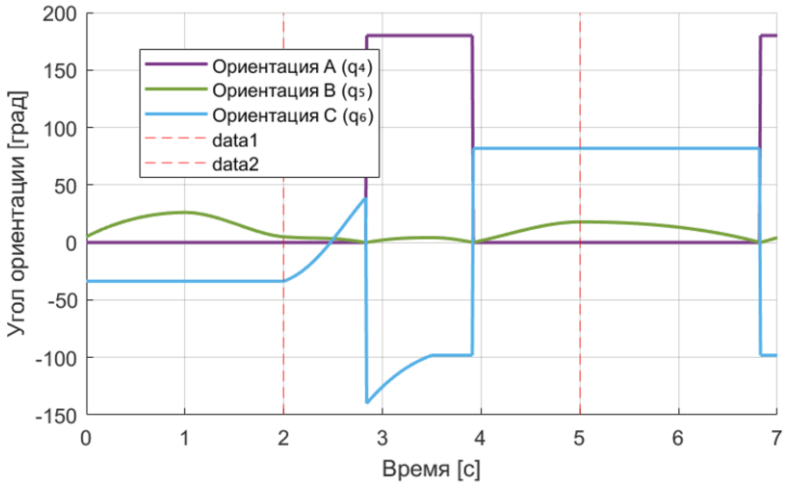


Рис. 13. *Ориентация схвата (запястье манипулятора)*

Fig. 13. *Orientation of the gripper (manipulator wrist)*

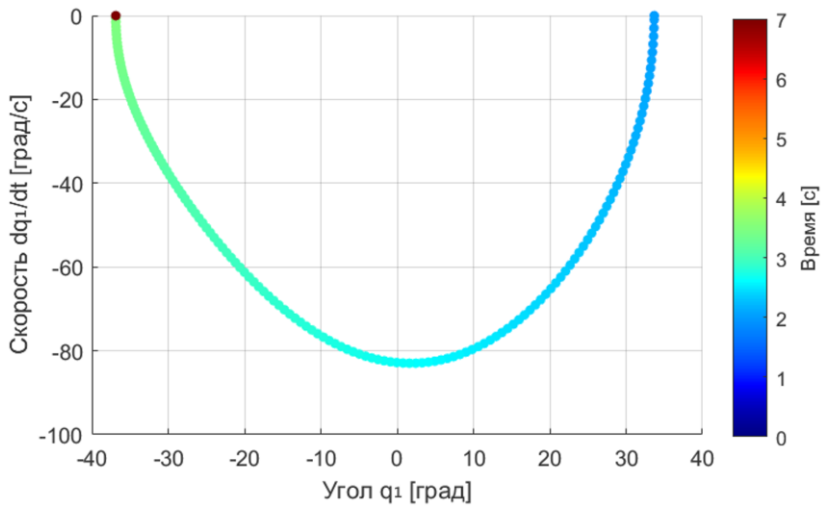


Рис. 14. *Фазовый портрет: сочленение 1 (пояс вращения)*

Fig. 14. *Phase portrait: joint 1 (rotation belt)*

Анализ полученных результатов

В результате исследования получены:

1. **Кинематика**. Графики углов в сочленениях при решении ОЗК для заданной траектории схвата показали плавность и отсутствие сингулярностей.

2. **Динамика**. Расчет требуемых моментов в приводах выявил пиковые нагрузки при разгоне и торможении, что критично для выбора исполнительных устройств.

3. **Рабочее пространство**. Построенная 3D-модель и облако точек подтвердили ожидаемую геометрию рабочей зоны и позволили визуализировать мертвые зоны.

4. **Захват**. Модель захвата позволила определить минимальное необходимое усилие сжатия для удержания объекта на всех этапах движения.

Заключение

В работе успешно разработана комплексная математическая модель промышленного шестизвенного робота-манипулятора с механическим захватом. Модель интегрирует кинематику, динамику и геометрию, образуя основу для проектирования систем точного управления, планирования траекторий и анализа производительности.

Основные научные и практические результаты:

1. Получены замкнутые аналитические выражения для решения прямой и обратной задач кинематики.

2. Сформированы параметрические матрицы динамических уравнений движения в форме Лагранжа–Эйлера.

3. Разработана модель силового взаимодействия двухпальцевого захвата с объектом манипулирования.

4. Создан программный инструмент в MATLAB для численного анализа и визуализации рабочего пространства.

Разработанная модель является универсальным инструментом и может быть адаптирована для конкретных промышленных манипуляторов путем корректировки параметров D-H и инерционных характеристик, что открывает широкие возможности для ее практического применения в робототехнике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кутафин А. А., Захаркина С. В.* Управление двигателями в мобильном роботе при помощи ПИД-регулятора / Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 12–15 апреля 2021 года. Том Часть 4. М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2021. С. 208–212. EDN: XKLAGG

2. *Беркаев А. Р., Ненашев А. А., Ключиков А. В.* Разработка системы локализации и позиционирования мобильного робота // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 12-3. С. 152–157. EDN: QDGESL

3. *Guo P., Shi H., Wang Sh., Tang L., Wang Z.* An ROS architecture for autonomous mobile robots with UCAR platforms in smart restaurants // Machines. MDPI AG – 2022. Vol. 10. No. 10. P. 844. DOI: 10.3390/machines10100844. EDN: ADSREE

4. *Алхалили А. С., Лукьянов Е. А.* Управление движением колесного мобильного робота на основе имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 8. С. 112–121. EDN: XJSZPY

5. *Лапшинов С. А., Шахнов В. А., Юдин А. В.* Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 50–62. EDN: FKKKGV

6. *Deshmukh A., Gupta M.* PID Controller: A review of literature // International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT). 2021. Vol. 6. Is. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.32628/IJSRCSEIT.0639

7. *Shahbazi M.* Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review // Expert Systems With Applications. 2021. 172:114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535

8. *Rubio JdJ, Garcia E., Aquino G. et al.* Learning of operator hand movements via least angle regression to be taught in a manipulator. Evol Syst 2018: 1–16.

9. *Rubio JdJ.* Robust feedback linearization for nonlinear processes control. ISA Trans 2018; 74: 155–164. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.01.017

10. *Альвардат М. Я., Мболо О. Э. Л., Кочнева О. В. и др.* Исследование сингулярности роботов-манипуляторов // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78/ № 4. С. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. EDN: PIXMWL

11. *Бошляков А. А., Новак А. В.* Генетический алгоритм для решения задачи планирования траектории манипулятора с избыточными степенями подвижности с учетом препятствий // Наукосфера. 2024. № 4-1. С. 129–135. DOI: 10.5281/zenodo.10992535. EDN: LWSMST

12. *Каляшина А. В., Смирнов Ю. Н.* Программирование контроллера робота для реализации технологического процесса лазерной резки // Инженерный вестник Дона. 2024. № 4(112). С. 90–98. EDN: JFUPHM

13. *Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф.* Динамический анализ двухзвенной связанной системы // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 5. С. 49–56. EDN: NOHWHH

14. *Архипов М. В., Вартанов М. В., Мищенко Р. С.* Промышленные роботы: управление манипуляционными роботами: учебник для среднего профессионального образования. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2025. 170 с. ISBN: 978-5-534-13082-9

15. *Москвичев А. А., Кварталов А. Р., Устинов Б. В.* Захватные устройства промышленных роботов и манипуляторов: учебное пособие. М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2020. 176 с.

REFERENCES

1. Kutafin A.A., Zakharkina S.V. Control of motors in a mobile robot using a PID controller. In: Innovative Development of Engineering and Technology in Industry (INTEX-2021): *Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation*, Moscow, April 12–15, 2021. Vol. Part 4. Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet imeni A. N. Kosygina (Tekhnologii. Dizayn. Iskusstvo.). 2021. Pp. 208–212. EDN: XKLAGG. (In Russian)

2. Berkaev A.R., Nenashev A.A., Klyuchikov A.V. Development of a localization and positioning system for a mobile device. In: *Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT)*. 2020. Vol. 12–3. Pp. 152–157. EDN: QDGESL. (In Russian)

3. Guo P., Shi H., Wang Sh., Tang L., Wang Z. An ROS architecture for autonomous mobile robots with UCAR platforms in smart restaurants. *Machines. MDPI AG – 2022.* Vol. 10. No. 10. P. 844. DOI: 10.3390/machines10100844. EDN: ADSREE

4. Alkhalili A.S., Lukyanov E.A. Motion control of a wheeled mobile robot based on simulation modeling. *Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 8. Pp. 112–121. EDN: XJSZPY. (In Russian)

5. Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. Directions for intelligent mobile robot motion control. *Neurocomputers: Development, Application*. 2021. Vol. 23. No. 1. Pp. 50–62. EDN: FKKKGV. (In Russian)

6. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A review of literature. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT).* 2021. Vol. 6. No. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.32628/IJSRCSEIT.0639

7. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review. *Expert Systems with Applications*. 2021. 172:114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535

8. Rubio JdJ, Garcia E., Aquino G. et al. Learning of operator hand movements via least angle regression to be taught in a manipulator. *Evol Syst*. 2018. Pp. 1–16.

9. Rubio JdJ. Robust feedback linearization for nonlinear processes control. *ISA Trans*. 2018. No. 74. Pp. 155–164.

10. Alvardat M.Ya., Mbolo O.E.L., Kochneva O.V. et al. Study of the singularity of robotic manipulators. *Automation. Modern Technologies.* 2024. Vol. 78. No. 4. Pp. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. EDN: PIXMWL. (In Russian)

11. Boshlyakov A.A., Novak A.V. Genetic algorithm for solving the problem of planning the trajectory of a manipulator with redundant degrees of freedom taking into account obstacles. *Naukosphere.* 2024. No. 4-1. Pp. 129–135. DOI: 10.5281/zenodo.10992535. EDN: LWSMST. (In Russian)

12. Kalyashina A.V., Smirnov Yu.N. Programming a robot controller for the implementation of the laser cutting process. *Engineering Bulletin of the Don.* 2024. No. 4(112). Pp. 90–98. EDN: JFUPHM. (In Russian)

13. Afonin D.V., Pechurin A.S., Yatsun S.F. Dynamic analysis of a two-link coupled system. *International Journal of Open Information Technologies.* 2024. Vol. 12. No. 5. Pp. 49–56. EDN: NOHWHH

14. Arkhipov M.V., Vartanov M.V., Mishchenko R.S. *Promyshlennyye roboty: upravleniye manipulyatsionnymi robotami: uchebnik dlya srednego professional'nogo obrazovaniya* [Industrial Robots: Control of Manipulation Robots: Textbook for Secondary Vocational Education]. 2nd ed., corrected. and add. Moscow: Izdatelstvo Yurait, 2025. 170 p. ISBN: 978-5-534-13082-9. (In Russian)

15. Moskvichev A.A., Kvartalov A.R., Ustinov B.V. *Zakhvatnyye ustroystva promyshlennykh robotov i manipulyatorov* [Gripping Devices of Industrial Robots and Manipulators]: textbook. Moscow: FORUM; INFRA-M, 2020. 176 p. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Хакимов З. Л., Шухин В. В., Лабазанов М. А. – разработка методологии, разработка и проектирование алгоритмов управления;

Хакимов З. Л., Лабазанов М. А. – программная реализация и валидация;

Хакимов З. Л. – математическое моделирование и формальный анализ;

Лабазанов М. А. – анализ и сбор данных;

Хакимов З. Л. – подготовка исходного варианта рукописи.

Все авторы – написание, рецензирование и редактирование рукописи.

Author's contribution:

Khakimov Z.L., Shukhin V.V., Labazanov M.A. – methodology development, development and design of control algorithms;

Khakimov Z.L., Labazanov M.A. – software implementation and validation;

Khakimov Z.L. – mathematical modeling and formal analysis;

Labazanov M.A. – data analysis and collection;

Khakimov Z.L. – manuscript preparation.

All authors – writing, reviewing, and editing the manuscript.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Хакимов Заур Леччиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

deffender_95@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1665-8631, SPIN-код: 3540-6580

Шухин Владимир Витальевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

shukhin86@bk.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0273-0058, SPIN-код: 2895-3434

Лабазанов Магомед Абубакарович, старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

labazanov.90@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9714-5146, SPIN-код: 5981-5217

Information about the authors

Zaur L. Khakimov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

deffender_95@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1665-8631, SPIN-code: 3540-6580

Vladimir V. Shukhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

shukhin86@bk.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0273-0058, SPIN-code: 2895-3434

Magomed A. Labazanov, Senior Lecturer, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

labazanov.90@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9714-5146, SPIN-code: 5981-5217

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 551.501.81+551.509.324.2+551.508.85+004.8 Обзорная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-90-101
CWWUTM

Обзор методов машинного обучения для автоматической идентификации и сопровождения конвективных ячеек по данным метеорадиолокации

В. А. Шаповалов[1], А. А. Аджиева✉[2], М. М. Ахматов[2], А. Ж. Хитиева[2]

[1]Высокогорный геофизический институт
360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 2
[2]Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова
360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в

Аннотация. Автоматическое выделение и сопровождение конвективных ячеек по радиолокационным данным – ключевая задача для краткосрочного прогноза опасных явлений погоды (наукастинга). Традиционные алгоритмы (пороговые и объект-ориентированные) широко применяются, но имеют ограничения по точности.

Цель работы – исследовать и сопоставить эффективность различных моделей машинного обучения в задаче обнаружения и отслеживания конвективных ячеек на изображениях радиолокационных обзоров.

Результаты. Проведен теоретический обзор современных подходов: классических алгоритмов (TITAN, SCIT), методов технического зрения (пороговая сегментация, кластеризация), а также методов машинного обучения – нечеткой логики, решающих деревьев, нейронных сетей (в т.ч. глубоких сверточных). Характеристики известных моделей машинного обучения сравнивались по показателям качества. Показано, что такие модели способны повысить вероятность обнаружения ячеек и снизить ложные срабатывания по сравнению с пороговыми методами.

Выводы. Алгоритмы на основе методов искусственного интеллекта превосходят традиционные по ряду метрик, позволяя более надежно идентифицировать опасные конвективные ячейки и прогнозировать их эволюцию. Практическое применение этих методов повысит точность наукастинга гроз и града, однако для их внедрения требуются правильно подготовленные большие обучающие выборки, учитывающие особенности локальных условий.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, конвективные ячейки, обнаружение, сегментация, сопровождение, оптический поток, машинное обучение, глубокое обучение, нейронные сети, наукастинг, опасные явления погоды

Поступила 28.11.2025, одобрена после рецензирования 03.02.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Шаповалов В. А., Аджиева А. А., Ахматов М. М., Хитиева А. Ж. Обзор методов машинного обучения для автоматической идентификации и сопровождения конвективных ячеек по данным метеорадиолокации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 90–101. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-90-101

© Шаповалов В. А., Аджиева А. А., Ахматов М. М., Хитиева А. Ж., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

MSC: 68T07; 86A10 Review article

Review on machine learning methods for convective cell identification and tracking using weather radar

V.A. Shapovalov[1], A.A. Adzhieva✉[2], M.M. Akhmatov[2], A.Zh. Khitieva[2]

[1]High-Mountain Geophysical Institute
2, Lenin avenue, Nalchik, 360004, Russia
[2]Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov
1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia

Abstract. Automatic detection and tracking of convective cells using radar data is a crucial task for the nowcasting of severe weather events. Traditional algorithms, such as threshold-based and object-oriented methods, are widely employed but suffer from limitations in accuracy.

Aim. To investigate and compare the performance of various machine learning models in detecting and tracking convective cells in radar imagery.

Results. A theoretical review of state-of-the-art approaches was conducted, covering classical algorithms (TITAN, SCIT), computer vision methods (threshold segmentation, clustering), and machine learning techniques, including fuzzy logic, decision trees, and neural networks (specifically deep convolutional networks). The performance characteristics of established machine learning models were evaluated based on quality metrics. The results demonstrate that such models can increase the probability of detection and reduce false alarms compared to threshold-based methods.

Conclusions. AI-based algorithms outperform traditional approaches across several metrics, enabling more reliable identification of dangerous convective cells and forecasting of their evolution. The practical application of these methods will improve the accuracy of thunderstorm and hail nowcasting; however, their implementation requires large, properly prepared training datasets that account for specific local conditions.

Keywords: weather radar, convective cells, detection, segmentation, tracking, optical flow, machine learning, deep learning, neural networks, nowcasting, severe weather events

Submitted 28.11.2025, approved after reviewing 03.02.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Shapovalov V.A., Adzhieva A.A., Akhmatov M.M., Khitieva A.Zh. Review on machine learning methods for convective cell identification and tracking using weather radar. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 90–101. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-90-101

Введение

В условиях климатических изменений, характеризующихся увеличением частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений, задача точного и своевременного прогнозирования конвективных процессов, а также идентификации и сопровождения отдельных ячеек (конвективных облаков – потенциально ливневых, грозовых, градовых по данным радиолокации) приобретает критическое значение для обеспечения безопасности авиации, городской инфраструктуры, энергетики, транспорта и сельского хозяйства.

Конвективные облака, представляющие собой сложные термодинамические системы, являются источником целого спектра опасных метеорологических явлений (ОЯ): от катастрофических наводнений, вызванных интенсивными ливнями, и разрушительного крупного града до шквалов ураганной силы и вихрей (смерчей, тромбов-торнадо). Экономический ущерб от подобных событий исчисляется миллиардами, ежегодно затрагивая жизнь и безопасность людей и критически важные сектора экономики. Обеспечение безопасности

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

полетов, защита линий электропередачи от ветровых нагрузок и минимизация потерь урожая от градобития требуют наличия высокоточных систем мониторинга и прогнозирования ОЯ, связанных с конвективными процессами.

Особую сложность представляет задача текущего и сверхкраткосрочного прогнозирования, или наукастинга (nowcasting), охватывающая временной горизонт от 0 до 2–6 часов [1]. В отличие от синоптического прогноза, где доминирующую роль играют глобальные численные модели атмосферы (NWP – Numerical Weather Prediction), наукастинг работает с масштабами, где динамика процессов развивается быстрее, чем цикл обновления и расчета гидродинамических моделей. Численные модели часто страдают от проблемы инициализации («spin-up problem»), неспособности корректно воспроизвести микрофизику облаков на подсеточном масштабе и высокой вычислительной сложности и длительности. В этом контексте основным источником оперативной информации становятся данные дистанционного зондирования, прежде всего – метеорологические радиолокаторы (МРЛ), обеспечивающие высокое пространственное (сотни метров) и временное (минуты) разрешение.

Исторически автоматизация обработки радиолокационной информации развивалась по пути создания детерминированных алгоритмов, основанных на эвристических правилах и пороговых критериях. Пионерские разработки 1980–1990-х годов, такие как отечественные корреляционные алгоритмы, а также алгоритмы TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting) и SCIT (Storm Cell Identification and Tracking), заложили фундамент современных оперативных систем предупреждения [2, 3, 4]. Эти методы базируются на концепции «зрелое облако как объект», где конвективная ячейка выделяется как связная область превышения порога отражаемости, а ее движение экстраполируется линейно. Несмотря на свою надежность и интерпретируемость, данные подходы обладают фундаментальными ограничениями: они плохо справляются с нелинейной эволюцией, слиянием и разделением ячеек, а также чувствительны к выбору эмпирических порогов [5].

Последнее десятилетие ознаменовалось сдвигом парадигмы в сторону методов, «управляемых данными» (data-driven methods). Бурное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ), и в частности глубокого обучения (DL – Deep Learning), открыло новые горизонты в анализе геопространственных временных рядов [6]. Способность нейронных сетей автоматически извлекать иерархические признаки из многомерных массивов данных, моделировать сложные нелинейные зависимости и интегрировать разнородную информацию (радиолокация, спутниковые наблюдения, грозопеленгация, модели численного прогноза погоды) – все это позволяет преодолеть ограничения классических алгоритмов. Современные исследования демонстрируют, что применение сверточных нейронных сетей (CNN), рекуррентных архитектур (RNN, LSTM) и трансформеров (Transformers) позволяет значительно повысить точность идентификации опасных явлений и качество прогноза полей осадков.

Целью настоящего обзора является всесторонний анализ современного состояния методов машинного обучения (ML – Machine Learning), применяемых для автоматической идентификации, сопровождения и прогнозирования эволюции конвективных ячеек. В работе проводится детальное сравнение классических алгоритмов и новейших нейросетевых архитектур, обсуждаются физические принципы их работы, преимущества, ограничения и перспективы внедрения в оперативную практику.

Объекты и методы исследований

Для глубокого понимания проблем исследования необходимо рассмотреть физическую природу объекта исследования – конвективной ячейки – и инструмента наблюдения – метеорологического радиолокатора.

Современные доплеровские радиолокаторы с двойной поляризацией (ДМРЛ) измеряют комплекс параметров, характеризующих состояние атмосферы. Базовым параметром является радиолокационная отражаемость (Z), измеряемая в логарифмических единицах (*dBZ*). Отражаемость пропорциональна концентрации частиц и шестой степени их диаметра ($Z \sim \sum D^6$), что делает радар чрезвычайно чувствительным к размеру гидрометеоров. Значения Z>35−40 *dBZ* традиционно ассоциируются с конвективными ячейками, а значения >55−60 *dBZ* уже указывают на наличие града.

Внедрение технологии двойной поляризации, позволяющей излучать и принимать волны с горизонтальной и вертикальной поляризацией, существенно расширило информативность данных. Ключевые поляриметрические переменные включают:

- дифференциальную отражаемость (Z_{DR}) – разность отражаемости на горизонтальной и вертикальной поляризациях. Положительные значения Z_{DR} указывают на сплюснутые капли дождя, околонулевые – на хаотично ориентированный град, а специфические артефакты («Z_{DR} columns») выше уровня замерзания служат индикаторами мощных восходящих потоков, поднимающих переохлажденные капли на большие высоты;
- удельную дифференциальную фазу (K_{DP}) – ее величина характеризует сдвиг фазы сигнала при прохождении через среду. K_{DP} чувствительна к концентрации жидкой воды и не зависит от наличия града, что позволяет разделять вклад дождя и льда в общий сигнал. Высокие значения K_{DP} в смешанной фазе («K_{DP} columns») также являются надежными предвестниками интенсификации конвективного процесса;
- коэффициент взаимной корреляции (ρ_{HV}) – его величина показывает степень однородности частиц в объеме. Используется для фильтрации неметеорологического эха (птицы, насекомые) и даже детектирования «мусорного или обломочного облака» (debris ball) при торнадо.

В итоге полученные радиолокационные данные представляют собой сложные 3D-массивы в полярной системе координат (азимут, угол места, дальность). Для применения методов машинного обучения, особенно сверточных сетей, ориентированных на декартовы сетки изображений, требуется предварительная обработка: контроль качества для удаления шумов и артефактов – аномального радиоэха (отражения от земли – «местников», биологических объектов и пр.), интерполяция в регулярную сетку и нормализация значений.

Прежде чем перейти к анализу нейросетевых методов, необходимо все же рассмотреть классические алгоритмы, которые широко используются в оперативной практике. Их архитектура и ограничения определяют векторы развития современных ML-подходов.

Алгоритм TITAN, разработанный в Национальном центре атмосферных исследований США (NCAR) Диксоном и Винером (1993) [7], стал первой широко тиражируемой системой автоматического трекинга. Он базируется на определении конвективной ячейки как трехмерного непрерывного объекта. Основным критерием идентификации является превышение заданного порога отражаемости (обычно 35–40 *dBZ*) и порога минимального объема (например, 50 км³). Алгоритм сканирует объемные данные и объединяет все смежные воксели, удовлетворяющие критериям, в единую геометрическую сущность. Для каждого объекта рассчитываются свойства: центроид (геометрический центр масс), объем, площадь проекции, максимальная отражаемость и параметры эллипса, аппроксимирующего форму шторма. Задача сопровождения (трекинга) в TITAN формулируется как задача комбинаторной оптимизации на двудольном графе. Для набора объектов, идентифицированных в момент времени t (N штормов) и $t+\Delta t$ (M штормов), необходимо найти оптимальное соответствие. Алгоритм минимизирует функцию стоимости (cost function), которая штрафует нефизичные изменения траектории и свойств шторма. Функция стоимости C_{ij} для сопоставления ячейки i и ячейки j обычно имеет вид:

$$C_{ij} = w_1 \cdot \Delta d + w_2 \cdot \Delta V, \quad (1)$$

где Δd – расстояние между прогнозируемым положением центроида i и фактическим положением j, ΔV – изменение объема, а w_1, w_2 – весовые коэффициенты. Такой подход позволяет TITAN отслеживать движение ячеек, даже если их форма меняется, однако он предполагает определенную инерционность свойств.

Несмотря на свою эффективность для изолированных ячеек, TITAN имеет ряд фундаментальных недостатков:

1. Проблема единственного порога (Single Threshold Problem) – когда использование одного уровня отсечения приводит к ошибкам в кластеризованных системах. Если несколько конвективных ядер соединены областью более слабых осадков, превышающих порог, TITAN объединяет их в один гигантский объект («False Merger»). Это искажает статистику и приводит к неверному расчету центроида, который может оказаться в зоне слабых осадков между ядрами.

2. Линейность предположений – то есть алгоритм предполагает, что штормы движутся по квазилинейным траекториям и меняют свои свойства плавно. В реальности конвекция часто развивается взрывообразно, а движение может быть нелинейным из-за размывания границ при взаимодействии с окружающей атмосферой (outflow boundaries).

3. Неустойчивость к разделению – то есть при распаде мультиячейкового процесса на компоненты алгоритм может потерять историю развития отдельных ядер, присвоив им новые идентификаторы.

Алгоритм SCIT [8], разработанный для сети радаров WSR-88D (NEXRAD), представляет собой более сложную систему, направленную на решение проблем, присущих TITAN. Он использует иерархическую структуру идентификации – набор из семи порогов отражаемости (30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 *dBZ*). Процесс идентификации происходит итеративно:

- 1D Сегменты. На каждом луче радара выделяются отрезки непрерывного превышения порогов.

- 2D Компоненты. Сегменты объединяются в плоские компоненты на каждом углу места по азимуту.

- 3D Ячейки. Компоненты на разных высотах ассоциируются в трехмерные структуры на основе вертикальной близости центроидов.

Такой подход позволяет SCIT видеть внутреннюю структуру ячейки («матрешку») и выделять более интенсивные уровни – ядра внутри обширных зон осадков. Это критически важно для обнаружения града и оценки потенциала ОЯ. Статистический анализ показывает, что SCIT корректно идентифицирует до 96 % ячеек с отражаемостью >50 *dBZ*.

SCIT использует метод наименьших квадратов для линейной экстраполяции движения центроидов. Для каждого трека сохраняется история положений, на основе которой рассчитывается вектор скорости. Однако как и TITAN, SCIT страдает от проблем дискретности. Если ячейка быстро растет или затухает, ее центроид может сместиться слишком резко или исчезнуть, что приведет к разрыву трека. Более поздние модификации SCIT включают элементы вероятностной ассоциации данных (JPDA – Joint Probabilistic Data Association) для улучшения стабильности трекинга в условиях плотных кластеров.

Переходным этапом между объектными алгоритмами и глубоким обучением стало применение методов компьютерного зрения, основанных на представлении отражаемости как поля (field-based methods). В отличие от отслеживания дискретных объектов эти методы работают с полным полем изображения.

Алгоритмы оптического потока (Optical Flow), такие как Lucas-Kanade или ROVER (Real-time Optical flow by Variational method for Echoes of Radar), рассчитывают поле векторов скоростей для каждого пикселя изображения. Они решают уравнение переноса интенсивности:

$$dI/dt = \partial I/\partial t + V \cdot \nabla I = 0. \quad (2)$$

Это уравнение базируется на допущении Лагранжевой инерционности: интенсивность пикселя сохраняется при его движении вдоль траектории.

Методы оптического потока стали основой многих современных систем наукастинга осадков, например, открытой библиотеки Pysteps [9]. Алгоритм, такой как TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation), разбивает радарное изображение на сетку узлов и находит вектор смещения для каждого, максимизируя коэффициент кросс-корреляции между последовательными кадрами. Эти методы обеспечивают плавную и визуально приятную экстраполяцию полей, превосходя объектные методы в прогнозе распределенных осадков. Однако для конвективных штормов допущение $dI/dt = 0$ является физически некорректным. Конвективные ячейки характеризуются быстрым вертикальным развитием (рост) и последующим распадом (диссипация). Оптический поток способен предсказать перемещение существующего радиоэха – адвекцию, но не может предсказать зарождение новых ячеек или внезапное усиление существующих. Это приводит к систематическим ошибкам прогноза в ситуациях с активной динамикой развития.

Неспособность детерминированных алгоритмов учесть нелинейную природу атмосферных процессов вызвала постепенный отказ от эвристик в сторону применения методов машинного обучения. Эволюция ML в этой области прошла путь от простых классификаторов на основе признаков до глубоких генеративных моделей.

Первая волна внедрения ИИ заключалась в замене жестких правил ("если Z>50, то град") на обучаемые классификаторы. В этом подходе объект сначала выделяется традиционным методом (сегментация SCIT/TITAN), затем для него рассчитывается вектор признаков (площадь, высота эхо, VIL, градиенты, температура верхушки по спутнику), который подается на вход модели.

Алгоритмы случайного леса (RF – Random Forest) и системы нечеткой логики (Fuzzy Logic) показали высокую эффективность в задачах классификации. В работе [10] Джунг и Ли (2015) предложили алгоритм трекинга на основе нечеткой логики, который оценивает степень принадлежности объекта к треку на основе множества факторов (расстояние, разница в размере, изменение формы). Это позволило сделать трекинг более устойчивым («робастным») к шуму и ошибкам сегментации по сравнению с жесткой логикой TITAN.

Другой пример – Йергенсен и др. (2020) [11]. Они использовали RF для классификации типа конвективной организации (суперячейка, линейная система, хаотичная конвекция). Модель обучалась на наборе морфологических признаков и данных об окружающей среде, достигая точности классификации ~77 %, что значительно превосходит возможности простых пороговых методов. Исследования показывают, что RF, обученный на комбинации радарных метрик и данных численных моделей, лучше разделяет градовые и неградовые ячейки, снижая количество ложных тревог.

Главным ограничением этого подхода остается зависимость от инженерии признаков (feature engineering). Качество модели ограничено тем, насколько удачно эксперт смог закодировать физику процесса в набор признаков. Модель не может «увидеть» паттерны, которые не были явно описаны, например, специфическую спиральную текстуру суперячейки.

Другой критической проблемой является дисбаланс классов. Конвективные ячейки, и тем более экстремальные явления (шквалы, торнадо, крупный град), встречаются крайне редко по сравнению с обычными осадками или ясным небом. В наборах данных, таких как зарубежные TorNet [12] или SEVIR, доля пикселей, соответствующих опасным явлениям, может составлять доли процента. Это создает риск того, что ML-модель обучится предсказывать «отсутствие явления», достигая формально высокой точности (Accuracy), но имея нулевую прогностическую ценность. Решение этой проблемы требует использования специализированных функций потерь и методов подготовки данных.

Революция глубокого обучения позволила перейти от анализа признаков к анализу сырых данных (representation learning). Сверточные нейронные сети (CNN), ставшие стандартом в компьютерном зрении, оказались идеально приспособлены для обработки радарных изображений.

Результаты и их обсуждение

Задача идентификации ячеек в терминах DL формулируется как задача семантической сегментации: каждому пикселю изображения необходимо присвоить метку класса («конвективная ячейка», «обложные осадки», «ясное небо»). Доминирующей архитектурой здесь стала U-Net, изначально разработанная для биомедицинских изображений.

U-Net имеет структуру энкодер-декодер:

– Энкодер – последовательность сверточных слоев и операций пулинга (pooling) уменьшает пространственную размерность изображения, одновременно увеличивая глубину признакового пространства. На этом этапе сеть «понимает» глобальный контекст (наличие крупномасштабной системы) и абстрактные паттерны [13].

– Декодер – последовательность операций передискретизации (upsampling) – восстанавливает исходное разрешение для попиксельного прогноза.

– Проброс связей (Skip Connections) – ключевая особенность U-Net. Выходы слоев энкодера сопрягаются с соответствующими слоями декодера. Это позволяет передать информацию о мелких деталях и точных границах объектов (локализованную на первых слоях энкодера) напрямую на выход, минуя «бутылочное горлышко» сжатия. Это критически важно для точного оконтуривания мелких конвективных ячеек.

Применение CNN (в частности, архитектур RainNet [14], SegNet и U-Net) для детектирования конвекции демонстрирует качественный скачок в точности [15, 16]. В отличие от TITAN, аппроксимирующего штормы эллипсами, U-Net выделяет объекты произвольной формы (линии, дуги, сложные кластеры). CNN обучается распознавать не только превышение порога амплитуды, но и текстурные особенности (градиенты, неоднородности), что позволяет отличать конвекцию от артефактов (например, помех от земли или биологических отражателей). В сравнительных исследованиях [17] CNN-модели достигают вероятности обнаружения (POD) >0.9 и индекса критического успеха (CSI) ≈0.81, тогда как традиционные методы часто показывают $CSI \approx 0.4-0.6$.

Примером успешного применения CNN является алгоритм CITRA (Convective cell Identification and TRAcking), описанный в работе [18]. Авторы рассматривают задачу идентификации как задачу оптического распознавания символов (OCR), где формы штормов трактуются как «символы». Глубокая сверточная сеть обучается выделять границы ячеек даже в условиях сильного перекрытия (слияния), используя специальные функции потерь для разделения объектов. CITRA демонстрирует способность поддерживать целостность треков в ситуациях, где SCIT теряет ячейки из-за флуктуаций отражаемости. Помимо радиолокационных данных, исследователи успешно применяют аналогичные подходы и для спутниковых снимков [19] и мозаичных данных [20, 21].

Задача наукастинга требует моделирования эволюции системы во времени. Статические CNN не обладают памятью и не могут учесть инерцию движения или тренд развития.

Для работы с последовательностями обзоров (радарными данными во времени) было предложено использовать рекуррентные сверточные сети [22], в частности архитектуры:

– ConvLSTM (Convolutional LSTM). В классическом блоке LSTM (Long Short-Term Memory) операции матричного умножения заменены на операции свертки. Это позволяет скрытым состояниям сети (Ht,Ct) сохранять пространственную структуру (быть 3D-тензорами). ConvLSTM способна моделировать нелинейную динамику: она «запоминает», что ячейка растет, и проецирует этот рост в будущее [22].

– TrajGRU (Trajectory GRU). Дальнейшее развитие ConvLSTM. Стандартные свертки имеют фиксированное рецептивное поле (смотрят в одну точку), что неэффективно для быстро движущихся объектов. TrajGRU использует механизм, позволяющий сети динамически обучаться траекториям движения информации (фактически встраивая аналог оптического потока внутрь рекуррентной ячейки). Это улучшает прогноз вращающихся и быстро смещающихся ячеек [23].

В последние годы (2022–2025) лидерство в задачах прогнозирования переходит к архитектурам на базе трансформеров (Transformers), использующих механизм внимания (Self-Attention). Модель Earthformer, разработанная Amazon и исследователями в области наук о Земле [24], решает проблему квадратичной сложности внимания ($O(N^2)$) с помощью механизма «Cuboid Attention». Принцип заключается в следующем. Входной 3D-объем данных (пространство + время) разбивается на «кубоиды». Внимание рассчитывается внутри кубоидов (локально) и между ними (глобально). Это позволяет модели улавливать дальнодействующие связи. Например, зарождение конвекции в одной точке может быть спровоцировано оттоком холодного воздуха от облака (outflow boundary), находящегося за 50 км. Сверточные сети (с локальным окном) «видят» эту связь только через множество слоев, тогда как трансформер может связать эти события напрямую.

Эффективность: Earthformer демонстрирует State-of-the-Art (SOTA) результаты на бенчмарке SEVIR, превосходя ConvLSTM по способности предсказывать сложные сценарии развития погоды на горизонте до 2–3 часов.

В противовес сложным трансформерам развивается направление упрощенных моделей, таких как SimVP (Simpler yet Better Video Prediction). SimVP отказывается от рекурсии и сложного внимания в пользу полностью сверточной архитектуры с механизмом трансляции (Translator). Используя модули Group-Mix Attention, SimVP достигает сравнимой с трансформерами точности при значительно меньших вычислительных затратах и более высокой скорости, что критично для оперативных задач.

Также точность идентификации и прогноза значительно возрастает при использовании дополнительных источников информации.

Модель FURENet (Fusion and Reassignment Network) специально разработана для интеграции данных двойной поляризации (Z,Z_{DR},K_{DP}). FURENet использует архитектуру с несколькими ветвями энкодера и стратегию «позднего слияния» (late fusion). Блоки Squeeze-and-Excitation (SE) динамически перевзвешивают важность каналов. Например, если в данных присутствует сигнал *KDP* выше уровня замерзания (*KDP* column – признак мощного восходящего потока и образования града) [25], сеть придает этому каналу больший вес. Исследования показывают, что добавление поляриметрических переменных улучшает метрику CSI прогноза конвективной инициации на 13–17 %.

Модель CGsNet специализируется на прогнозе конвективных шквалов [26]. Обученная на сопоставлении радарных полей и данных наземных анемометров, она способна предсказывать поля ветра с разрешением 1 км, выявляя зоны риска нисходящих микропорывов (downbursts), что невозможно сделать с помощью стандартной экстраполяции.

Одной из главных проблем всех моделей, обучаемых на минимизацию среднеквадратичной ошибки (MSE Loss), является эффект размытия. Конвекция – стохастический процесс, то есть существует множество вероятных сценариев будущего. Модель, минимизирующая MSE, стремится предсказать «среднее» из всех сценариев. В результате прогноз получается гладким, теряются мелкие детали и, что самое опасное, занижаются пиковые значения интенсивности (экстремумы).

Для решения этой проблемы компания DeepMind предложила использовать генеративно-состязательные сети (GAN). Их модель DGMR (Deep Generative Model of Radar) [27],

в процессе ее обучения генератор создает прогноз, а два дискриминатора (пространственный и временной) пытаются отличить его от реальных радарных данных. Состязательное обучение (Adversarial Training) заставляет генератор создавать детализированные, реалистичные текстуры, сохраняя высокие и экстремальные значения *dBZ*. Субъективная оценка экспертами-метеорологами британского Met Office показала, что прогнозы DGMR признаются более реалистичными в 89 % случаев по сравнению с методами оптического потока и детерминированными DL-моделями, несмотря на то, что формальные метрики (CSI) могут быть ниже из-за стохастической природы прогноза (модель предсказывает правильную структуру, но может немного ошибиться в точном положении ячейки).

Перспективным направлением является и физически-информированный подход (PIML – Physics-Informed Machine Learning). Критика «чистых» нейросетей заключается в их физической несогласованности: сеть может сгенерировать появление массы воды «из ниоткуда» или нарушить законы сохранения. PID-GAN (Physics-Informed Discriminator GAN) интегрирует физические уравнения (например, уравнение неразрывности или сохранения влаги) непосредственно в функцию потерь при обучении. Дискриминатор проверяет не только визуальную схожесть прогноза с реальностью, но и его физическую корректность. Это позволяет существенно снизить количество нереалистичных артефактов и повысить надежность прогноза ОЯ.

Заключение

Анализ современного состояния исследований в области автоматической идентификации и сопровождения конвективных ячеек позволяет сделать однозначный вывод о смене технологической парадигмы. Традиционные алгоритмы, служившие верой и правдой в течение десятилетий в автоматизированных системах, достигли предела своих возможностей. Их жесткая логика и линейные допущения не позволяют адекватно описывать сложную нелинейную динамику атмосферной конвекции, что приводит к ошибкам в критических для прогноза ситуациях.

Методы машинного обучения, и в особенности глубокого обучения, демонстрируют неоспоримое преимущество в точности обнаружения (POD), качестве оконтуривания (сегментации) и надежности прогноза (CSI). Переход от инженерных признаков к обучению представлений (CNN, Transformers), использование пространственно-временного контекста (ConvLSTM, Earthformer) и борьба за реалистичность прогнозов (GAN) позволили создать системы, способные не просто экстраполировать движение, но и предсказывать эволюцию конвективных процессов.

Однако для полноценного оперативного внедрения этих технологий необходимо решить ряд вызовов: обеспечить интерпретируемость решений ИИ для синоптиков, преодолеть проблему дисбаланса данных о редких опасных явлениях и внедрить физические ограничения (PIML) для гарантии надежности. Таким образом, будущее систем штормового предупреждения лежит в гибридизации – синтезе физически обоснованных моделей и мощных алгоритмов глубокого обучения, работающих на мультимодальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. WMO-No. 1198. Guidelines for Nowcasting Techniques. Geneva, 2017. 184 p.

2. *Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М., Жарашуев М. В.* Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормооповещения // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 36–45.

Abshaev M.T., Abshaev A.M., Malkarova A.M., Zharashuev M.V. Automated radar identification, measurement of parameters and classification of convective cells for hail protection

and storm warning purposes. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2010. No. 3. Pp. 36–45. (In Russian)

3. *Сарайкин А. А., Чайковский В. М.* Применение нейронной сети в метеорологической радиолокации // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 1(69). С. 83–90.

Saraykin A.A., Chaykovskiy V.M. Application of a neural network in meteorological radar. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki* [University News. Volga Region. Technical Sciences]. 2024. No. 1(69). Pp. 83–90. (In Russian)

4. *Шаповалов В. А., Тумгоева Х. А.* Распознавание и сопровождение облачных конвективных ячеек с целью текущего прогноза опасных погодных явлений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 3. С. 58–67. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-3-58-67

Shapovalov V.A., Tumgoyeva Kh.A. Recognition and tracking of cloud convective cells for nowcasting of hazardous weather phenomena. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. 2018. No. 3. Pp. 58–67. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-3-58-67. (In Russian)

5. Bournas A., Baltas E. Development of a Storm-Tracking Algorithm for the Analysis of Radar Rainfall Patterns in Athens, Greece. *Water*. 2024. No. 16(20). P. 2905. DOI: 10.3390/w16202905

6. Lagerquist R., McGovern A., Gagne D. J. Deep Learning for Spatially Explicit Prediction of Synoptic-Scale Fronts. *Weather and Forecasting*. 2019. Vol. 34. No. 4. Pp. 1137–1160. DOI: 10.1175/WAF-D-18-0183.1

7. Dixon M., Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting – Radar-based methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1993. Vol. 10. No. 6. Pp. 785–797. DOI: 10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2

8. Johnson J.T., MacKeen P.L., Witt A. et al. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D Algorithm. *Weather and Forecasting*. 1998. Vol. 13. No. 2. Pp. 263–276. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0263: TSCIAT>2.0.CO;2

9. Pulkkinen S., Nerini D., Pérez Hortal A.A. et al. Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting, including an ensemble of extrapolation, autoregressive and more advanced methods. *Geoscientific Model Development*. 2019. Vol. 12. Pp. 4185–4219. DOI: 10.5194/gmd-12-4185-2019

10. Jung S.-H., Lee G. Radar-based cell tracking with fuzzy logic approach. *Meteorological Applications*. 2015. Vol. 22. No. 4. Pp. 716–730. DOI: 10.1002/met.1509

11. Jergensen G.E., McGovern A., Lagerquist R., Smith T. Classifying convective storms using machine learning. *Weather and Forecasting*. 2020. Vol. 35, No. 2. Pp. 537–556.

12. Veillette M.S., Kurdzo J.M., Stepanian P.M. et al. A benchmark dataset for tornado detection and prediction using full-resolution polarimetric weather radar data (TorNet). *Artificial Intelligence for the Earth Systems*. 2024. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.1175/AIES-D-24-0006.1

13. Nan G., Chen M., Qin R. et al. Identification, tracking and classification method of mesoscale convective system based on radar composite reflectivity mosaic and deep learning. *Acta Meteorologica Sinica*. 2021. Vol. 79(6). Pp. 1002–1021. DOI: 10.11676/qxxb2021.062

14. Ayzel G., Scheffer T., Heistermann M. RainNet v1.0: a convolutional neural network for radar-based precipitation nowcasting. *Geoscientific Model Development*. 2020. Vol. 13. No. 6. Pp. 2631–2644. DOI: 10.5194/gmd-13-2631-2020

15. Han L., Sun J., Zhang W. convolutional neural network for convective storm nowcasting using 3-d doppler weather radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. Vol. 58. No. 2. Pp. 1487–1495. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2948070

16. Albu A.-I., Czibula G., Mihai A. et al. NeXtNow: A convolutional deep learning model for the prediction of weather radar data for nowcasting purposes. *Remote Sens*. 2022. No. 14. P. 3890. DOI: 10.3390/rs14163890

17. Ritvanen J., Pulkkinen S., Moisseev D., Nerini D. Cell-tracking-based framework for assessing nowcasting model skill in reproducing growth and decay of convective rainfall. *Geoscientific Model Development*. 2025. Vol. 18. Pp. 1851–1878. DOI: 10.5194/gmd-18-1851-2025

18. Ranganayakulu S.V., Subrahmanyam K.V., Niranjan A. A novel algorithm for convective cell identification and tracking based on optical character recognition neural network. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2021. Vol. 35. No. 16. Pp. 2239–2255. DOI: 10.1080/09205071.2021.1941299

19. Liu J., Zhang Q. A novel algorithm for detecting convective cells based on h-maxima transformation using satellite images. *Atmosphere*. 2025. Vol. 16. No. 11. P. 1232. DOI: 10.3390/atmos16111232

20. Wang X., Liao R., Li J. et al. Thunderstorm identification algorithm research based on simulated airborne weather radar reflectivity data. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2020. ID: 37. DOI: 10.1186/s13638-020-1651-6

21. Wang Y., Long M., Wang J. et al. PredRNN: Recurrent neural networks for predictive learning using spatiotemporal LSTMs. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. Pp. 1–10.

22. Shi X., Chen Z., Wang H. et al. Convolutional LSTM Network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems* (NIPS). 2015. Vol. 28. Pp. 802–810.

23. Shi X., Gao Z., Lausen L. et al. Deep Learning for precipitation nowcasting: a benchmark and a new model. *Advances in Neural Information Processing Systems* (NIPS). 2017. Vol. 30. Pp. 5617–5627.

24. Gao Z., Shi X., Wang H., et al. Earthformer: exploring space-time transformers for earth system forecasting. *Advances in Neural Information Processing Systems* (NeurIPS). 2022. Vol. 35. Pp. 25390–25403. arXiv:2207.05833

25. Hu J., Rosenfeld D., Zrnić D. et al. Tracking and characterization of convective cells through their maturation into stratiform storm elements using polarimetric radar and lightning detection. *Atmospheric Research*. 2019. Vol. 226. Pp. 192–207.

26. Xiao H., Wang Y., Zheng Y. et al. Convective-gust nowcasting by a deep learning algorithm. *Geoscientific Model Development*. 2023. Vol. 16. Pp. 3611–3628. DOI: 10.5194/gmd-16-3611-2023

27. Ravuri S., Lenc K., Willson M. et al. Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar. *Nature*. 2021. Vol. 597. Pp. 672–677. DOI: 10.1038/s41586-021-03854-z

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Шаповалов Виталий Александрович, д-р физ.-мат. наук, стар. науч. сотр., Высокогорный геофизический институт;

360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 2;

vet555_83@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9701-6820, SPIN-код: 6938-9800

Аджиева Аида Анатольевна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Высшая математика и информатика», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;
360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в;
aida-adzhieva@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1047-8417, SPIN-код: 4128-9520
Ахматов Мухадин Магомедович, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика и информатика», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;
360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в;
m_ahmatov@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2941-7459, SPIN-код: 3620-2852
Хитиева Аминат Жагафаровна, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика и информатика», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;
360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в;
aminkahitieva@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6847-6328, SPIN-код: 8085-7236

Information about the authors

Vitaliy A. Shapovalov, Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher, High-Mountain Geophysical Institute;
2, Lenin avenue, Nalchik, 360004, Russia;
vet555_83@ mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9701-6820, SPIN-code: 6938-9800
Aida A. Adzhieva, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Higher Mathematics and Informatics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov;
1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia;
aida-adzhieva@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1047-8417, SPIN-code: 4128-9520
Mukhadin M. Akhmatov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov;
1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia;
m_ahmatov@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2941-7459, SPIN-code: 3620-2852
Aminat Zh. Khitieva, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Informatics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov;
1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia;
aminkahitieva@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6847-6328, SPIN-code: 8085-7236

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 007.52 Научная статья

https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-102-116

EDHAVZ

Архитектура двухуровневой системы управления автономным мобильным роботом для складской логистики

В. В. Шухин✉, З. Л. Хакимов, М. А. Лабазанов

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова
364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100

Аннотация. Актуальность работы обусловлена ростом рынка складской робототехники и необходимостью совмещения интеллектуальных функций с точным детерминированным управлением. Предложена двухуровневая архитектура системы управления автономным мобильным роботом, разделяющая когнитивные (NVIDIA Jetson Orin Nano, ROS 2) и исполнительные (STM32H743ZI, FreeRTOS) функции. Разработан специализированный протокол обмена данными с контролем целостности. Предложенная архитектура обеспечивает сбалансированное распределение вычислительной нагрузки и может быть использована для создания высокоточных мобильных платформ складского назначения.

Цель исследования – разработка и математическое обоснование двухуровневой архитектуры системы управления автономным мобильным роботом, оценка ее предельных характеристик и демонстрация преимуществ через сравнительный анализ с существующими подходами.

Методы исследования. В работе использованы следующие методы исследования:

1. Математическое моделирование и расчеты – формализация моделей для оценки точности позиционирования с использованием расширенного фильтра Калмана, расчет временных параметров системы, вероятности ошибок передачи данных.

2. Симуляционное моделирование – верификация системы в ROS 2 и Gazebo, оценка динамической точности и времени отклика.

3. Алгоритмическое проектирование – разработка каскадных ПИД-регуляторов для управления двигателями, протокола обмена между уровнями архитектуры.

4. Сравнительный анализ – сопоставление характеристик предложенной системы с коммерческими аналогами (MiR250, Fetch Freight 1500).

5. Экспериментальная оценка – моделирование методом Монте-Карло для определения среднеквадратичной ошибки позиционирования, анализ энергопотребления и автономности.

Результаты. В работе представлена инновационная двухуровневая архитектура системы управления автономным мобильным роботом (АМР) для складской логистики. Архитектура реализует разделение вычислительной нагрузки между высокоуровневым контроллером на базе одноплатного компьютера NVIDIA Jetson Orin Nano (4 ГБ) с операционной системой ROS 2 Humble и низкоуровневым контроллером на микропроцессоре STM32H743ZI (ядро ARM Cortex-M7, 550 МГц) под управлением ОСРВ FreeRTOS. Высокий уровень отвечает за навигацию с использованием алгоритмов SLAM (на основе лидара Ouster OS0-32) и глобальное планирование маршрута, в то время как низкий уровень обеспечивает прецизионное управление двигателями через каскадные ПИД-регуляторы и обработку данных с абсолютных энкодеров Renishaw RESOLUTE с разрешением 26 бит. Также представлен разработанный двоичный протокол обмена с контролем целостности (CRC-16-CCITT), формализованы математические модели для расчета точности позиционирования и определены критические временные параметры системы. Расчетное время цикла управления на низком уровне составляет 1 мс, а средняя задержка межпроцессного взаимодействия – 3.5 мс. Система демонстрирует теоретическую точность позиционирования ±2.1 мм при использовании сенсорного слияния данных одометрии и лидара. Результаты моделирования указывают на возможность обработки до 15 целевых задач в минуту в типичной складской ячейке размером 10×10 м.

© Шухин В. В., Хакимов З. Л., Лабазанов М. А., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Заключение. Предложенная архитектура представляет собой сбалансированное решение, сочетающее высокую производительность, детерминизм и относительную экономическую доступность, что делает ее перспективной основой для следующего поколения исследовательских и коммерческих складских АМР.

Ключевые слова: автономный мобильный робот, складская логистика, распределенная система управления, ROS 2, FreeRTOS, сенсорное слияние, ПИД-регулятор, абсолютные энкодеры

Поступила 13.12.2025, одобрена после рецензирования 26.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Шухин В. В., Хакимов З. Л., Лабазанов М. А. Архитектура двухуровневой системы управления автономным мобильным роботом для складской логистики // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 102–116. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-102-116

MSC: 68T40 Scientific article

Architecture for two-level mobile robot control system for warehouse logistics

V.V. Shukhin✉, Z.L. Khakimov, M. A. Labazanov

Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov
100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia

Abstract. The relevance of this work is driven by the growth of the warehouse robotics market and the need to combine intelligent functions with precise, deterministic control. A two-tier architecture for an autonomous mobile robot control system is proposed, separating cognitive (NVIDIA Jetson Orin Nano, ROS 2) and executive (STM32H743ZI, FreeRTOS) functions. A specialized data exchange protocol with integrity monitoring is developed. The proposed architecture ensures balanced distribution of the computational load and can be used to create high-precision mobile platforms for warehouse applications.

Aim. The research is to develop and mathematically justify such an architecture, evaluate its ultimate performance, and demonstrate its advantages through a comparative analysis with existing approaches.

Research methods. The following research methods are used in this study:

1. Mathematical modeling and calculations – formalization of models for assessing positioning accuracy using an extended Kalman filter, calculation of system timing parameters, and the probability of data transmission errors.

2. Simulation modeling – system verification in ROS 2 and Gazebo, assessment of dynamic accuracy and response time.

3. Algorithmic design – development of cascade PID controllers for motor control and an exchange protocol between architecture levels.

4. Comparative analysis – comparison of the characteristics of the proposed system with commercial analogues (MiR250, Fetch Freight 1500).

5. Experimental evaluation – Monte Carlo simulation to determine the root mean square positioning error, energy consumption and autonomy analysis.

Results. This paper presents an innovative two-tier architecture for an autonomous mobile robot (AMR) control system for warehouse logistics. The architecture divides the computational load between a high-level controller based on a NVIDIA Jetson Orin Nano single-board computer (4 GB) running the ROS 2 Humble operating system and a low-level controller based on an STM32H743ZI microprocessor (ARM Cortex-M7 core, 550 MHz) running the FreeRTOS RTOS. The high-level controller handles navigation using SLAM algorithms (based on the Ouster OS0-32 lidar) and global path planning, while the low-level controller provides precision motor control via cascaded PID controllers and data processing from Renishaw RESOLUTE absolute encoders with 26-bit resolution. This paper presents the developed binary communication protocol with integrity checking (CRC-16-CCITT), formalizes mathematical models for calculating positioning accuracy,

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

and identifies critical timing parameters of the system. The estimated low-level control cycle time is 1 ms, and the average interprocess communication latency is 3.5 ms. The system demonstrates a theoretical positioning accuracy of ±2.1 mm using odometry and lidar sensor fusion. Simulation results indicate the feasibility of processing up to 15 target tasks per minute in a typical 10x10 m warehouse cell.

Conclusion. The proposed architecture represents a balanced solution combining high performance, determinism, and relative affordability, making it a promising foundation for the next generation of research and commercial warehouse AMRs.

Keywords: autonomous mobile robot, warehouse logistics, distributed control system, ROS 2, FreeRTOS, sensor fusion, PID controller, absolute encoders

Submitted 13.12.2025, approved after reviewing 26.01.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Shukhin V.V., Khakimov Z.L., Labazanov M.A. Architecture for two-level mobile robot control system for warehouse logistics. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 102–116. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-102-116

Введение

Трансформация складской логистики под влиянием четвертой промышленной революции (Industry 4.0) характеризуется массовым внедрением автономных мобильных роботов (АМР). По данным исследования компании Global Market Insights Inc., ожидается, что рынок вырастет с 17,2 млрд долларов США в 2025 году до 72,6 млрд долларов США в 2034 году при среднегодовом темпе роста 17,3 % [1]. Ключевыми драйверами являются рост электронной коммерции, требующий обработки большого количества мелких заказов (order picking), и демографические изменения, ведущие к дефициту квалифицированной рабочей силы в логистике.

Техническим вызовом для АМР нового поколения является необходимость совмещения когнитивных функций (распознавание среды, адаптивное планирование) с детерминированным исполнением (точное движение, безопасное взаимодействие). Моноархитектуры на основе универсальных одноплатных компьютеров (например, Raspberry Pi), несмотря на вычислительную мощность, страдают от недетерминированных задержек ядра Linux, что критично для контуров управления с частотой выше 100 Гц. Напротив, системы на базе единого микроконтроллера не обладают достаточными ресурсами для одновременной локализации и построения карт (SLAM) в реальном времени, особенно при использовании облачных сервисов для оптимизации маршрутов.

В данной работе предлагается двухуровневая архитектура, радикально разделяющая эти функции между специализированными вычислительными платформами. Научная новизна заключается не в самом факте разделения, а в формализации высокоскоростного протокола обмена, математическом обосновании выбора компонентов на основе требований к точности и быстродействию, а также в интеграционной модели, обеспечивающей отказоустойчивость.

Цель исследования: разработка и математическое обоснование такой архитектуры, оценка ее предельных характеристик и демонстрация преимуществ через сравнительный анализ с существующими подходами.

Аппаратная архитектура

Аппаратная платформа спроектирована исходя из целевых показателей (рис. 1):

Точность позиционирования в статике: $\leq \pm 3$ мм.

Максимальная линейная скорость: 2 м/с.

Время реакции на препятствие: ≤ 100 мс.

Автономность работы: ≥ 8 ч.

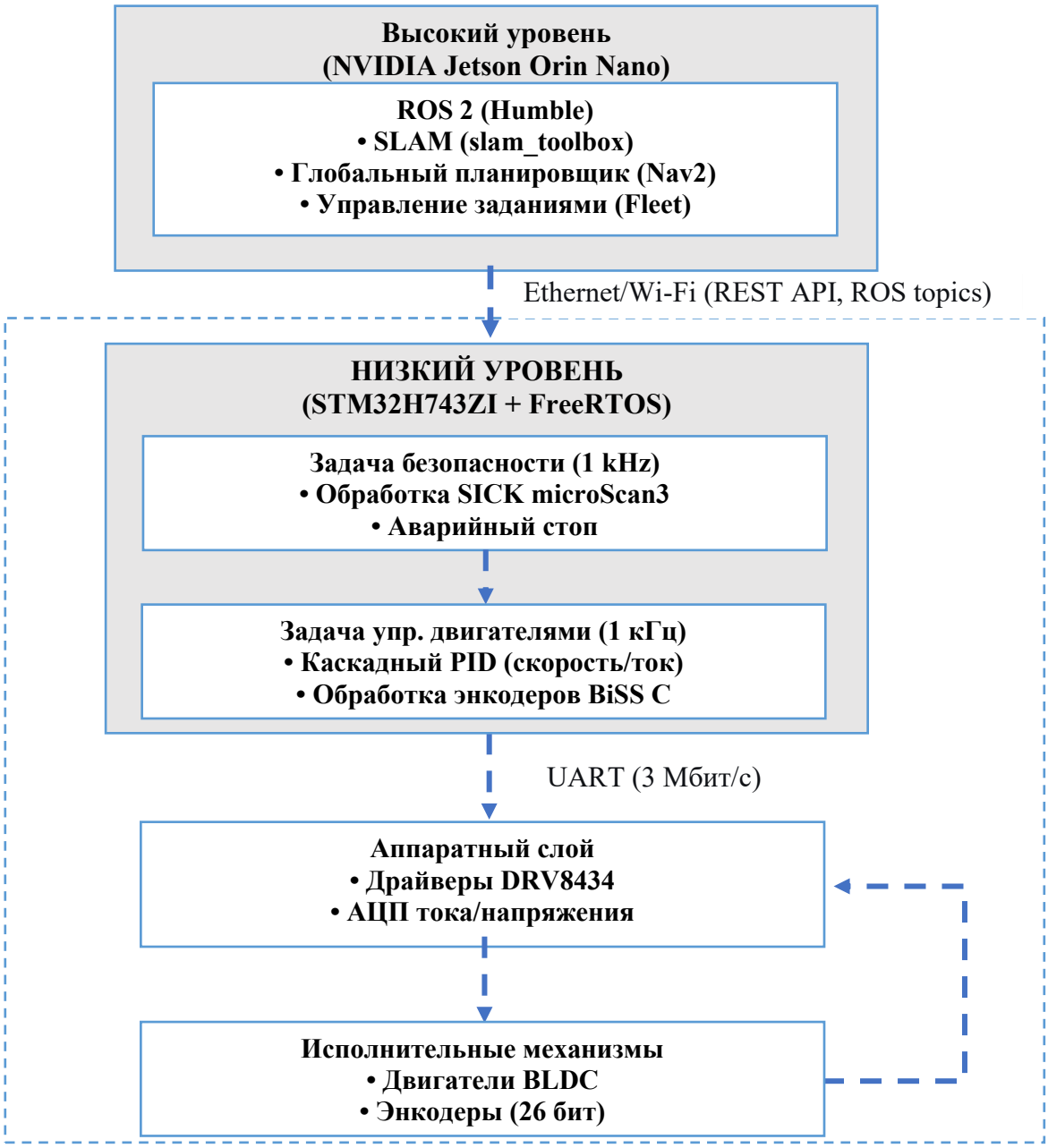


Рис. 1. *Двухуровневая архитектура системы управления АМР*

Fig. 1. *Two-level architecture of the AMR control system*

В качестве высокоуровневого контроллера (ВК) выбран NVIDIA Jetson Orin Nano 4GB. Его выбор обусловлен наличием 1024 ядер CUDA в GPU архитектуры Ampere и 6-ядерного CPU ARM Cortex-A78AE. Для алгоритмов SLAM, основанных на нейросетевой обработке данных лидара (например, SuMa++), наличие GPU дает ускорение в 8–15 раз по сравнению с чисто CPU-реализациями на Raspberry Pi 4. Потребляемая мощность в режиме активной навигации составляет около 10–15 Вт, что приемлемо для мобильной платформы с батареей ≥ 100 А·ч.

В качестве низкоуровневого контроллера (НК) выбран STM32H743ZI (ядро Cortex-M7, 550 МГц, FPU двойной точности). Его производительность (1027 DMIPS) позволяет реализовать каскадные ПИД-регуляторы [3] для управления двигателями с частотой обновления

1 кГц. Наличие аппаратного модуля вычисления CRC и двухбанковой flash-памяти критично для реализации безопасного протокола обновления прошивки по воздуху (OTA).

Для прецизионной одометрии выбраны абсолютные энкодеры Renishaw RESOLUTE с оптическим интерфейсом BiSS C и разрешением 26 бит (67108864 позиций на оборот). Это позволяет достичь теоретического углового разрешения:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{2^{26}} \approx 0{,}000019^\circ.$$

При диаметре приводного колеса $D\omega$=0,125 м линейное разрешение системы одометрии составляет:

$$\Delta L = \frac{\pi \cdot D\omega}{2^{26}} = \frac{3{,}1416 \cdot 0{,}125}{67108864} \approx 5{,}86 \cdot \frac{10^{-9}\text{м}}{\text{отсчет}}.$$

Данное разрешение является теоретическим пределом датчика. Реальная точность позиционирования робота будет определяться совокупностью факторов: эластичностью шин, проскальзыванием, люфтами в редукторе и точностью монтажа энкодера. Практическая точность одометрии на основе только энкодеров на дистанции 10 м, по данным производителя редукторов Harmonic Drive, обычно не превышает ±0.1 % от пройденного пути (±10 мм на 10 м) без коррекции от внешних сенсоров [4].

Для реализации системы безопасности был выбран лидар Ouster OS0-32 (32-линейный, 90° вертикальное поле обзора, частота 2048 Гц). Его ключевое преимущество для складских условий – устойчивость к взаимным помехам при работе нескольких роботов в одной зоне (запатентованная технология цифровой обработки сигнала). Для экстренной остановки в дополнение к лидару используются двухмерные датчики безопасности SICK microScan3, образующие защитное поле на высоте 150 мм от пола. Их время отклика ≤ 15 мс, что соответствует стандарту SIL 2 (IEC 61508).

Программная архитектура и протокол взаимодействия

Модель взаимодействия

Взаимодействие ВК и НК построено по принципу «ведущий – ведомый» с циклическим и событийным обменом. ВК каждые Tc = 20 мс отправляет пакет с целевыми скоростями, а НК с частотой 1 кГц публикует телеметрию и статус [6].

Был разработан протокол на основе UDP поверх UART (скорость 3 Мбит/с). Каждый пакет содержит:

- заголовок (0xAA 0x55);
- идентификатор сообщения (1 байт);
- полезную нагрузку (до 64 байт);
- контрольную сумму CRC-16-CCITT.

Вероятность необнаруженной ошибки при использовании CRC-16 с полиномом 0x1021 для пакета длиной n = 80 байт (640 бит) оценивается как:

$$P_{ud} \approx 2^{-16} = 1{,}5 \cdot 10^{-5}.$$

Для повышения надежности введен механизм подтверждения с повторной передачей для критичных команд (например, «экстренная остановка»). При вероятности ошибки в канале $P_e \approx 10^{-16} = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ среднее время доставки критичной команды T_{cmd} с одним повторением составляет:

$$T_{\text{cmd}} \approx T_{\text{tx}} + (1 - P_s) \cdot T_{to} \cdot T_r,$$

где $T_{\text{tx}} \approx 0{,}21$ мс (время передачи пакета), $P_s = (1 - P_e)^n \approx 0{,}9995$ (вероятность успешной доставки за одну попытку), $T_s = 5$ мс (время ожидания подтверждения), $N_r = 1$ (количество попыток повторной передачи).

Таким образом,

$$T_{\text{cmd}} \approx 0{,}21 + (1 - 0{,}9995) \cdot 5 \cdot 1 \approx 0{,}21 + 0{,}0025 = 0{,}2125 \text{ мс}.$$

Данное время гарантирует выполнение требования по реакции на препятствие (<100 мс), так как большая часть задержки приходится на обработку лидара (~30 мс) и планирование (~50 мс) [6].

Алгоритм управления на НК: расчет ПИД-регулятора

На НК реализован каскадный регулятор для управления двигателем: внешний контур – по скорости, внутренний – по току. Уравнение дискретного ПИД-регулятора скорости с частотой *fs=1 кГц* [6]:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{j=0}^{k} e[j] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{Ts},$$

где $Ts = 1/f_s = 0.001$с, $e[k] = \omega_{target}[k] - \omega_{actual}[k]$.

Коэффициенты для двигателя с моментом инерции $J=5\times10^{-4}$ кг·м^2 и электромеханической постоянной времени $\tau_m = 0{,}05$ с были рассчитаны методом Циглера – Николса [2, 10] и скорректированы в симуляции:

$$K_p = 0{,}8,\ K_i = 25{,}0,\ K_d = 0{,}002.$$

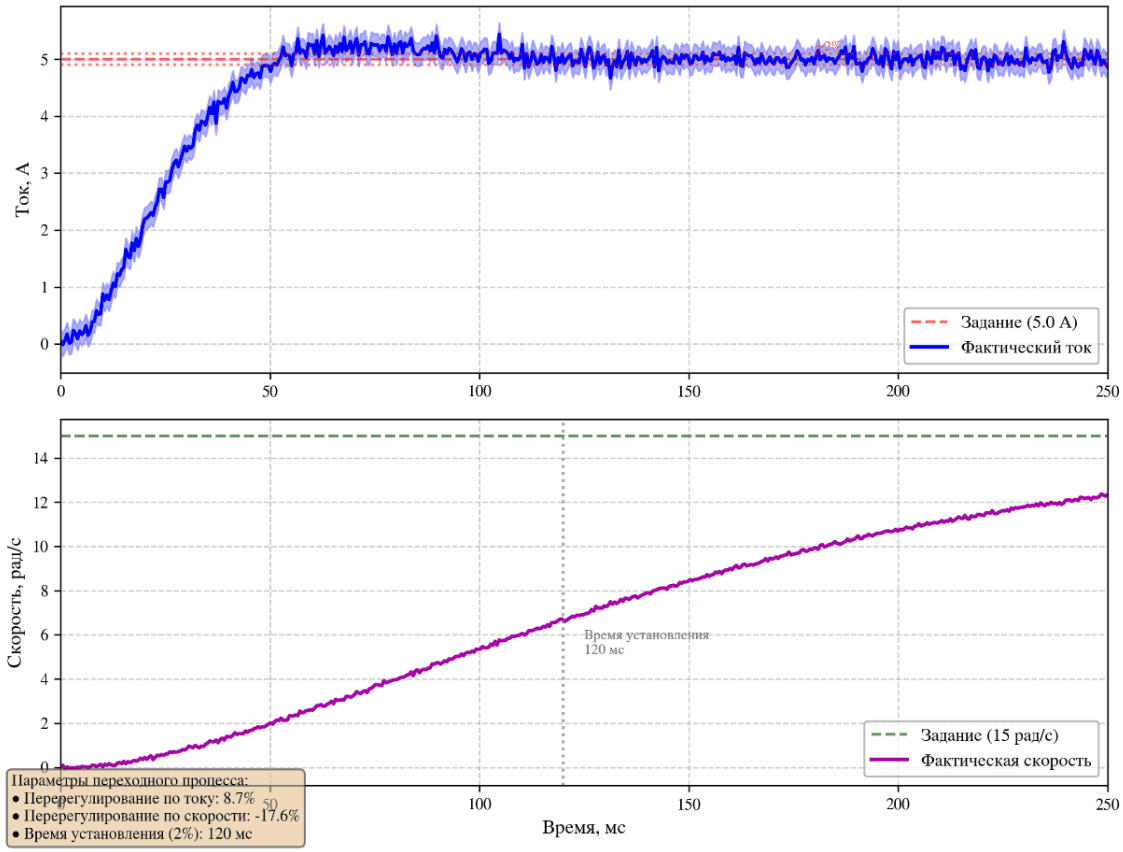


***Рис. 2**. Переходный процесс в системе управления двигателем*

***Fig. 2**. Transient process in the engine control system*

Моделирование в MATLAB Simulink показало, что время выхода на установившуюся ошибку ≤ 2% [7] при скачке задания составляет 0,12 с, а перерегулирование не превышает 5% (рис. 2).

Методология оценки точности позиционирования

Точность конечного позиционирования робота оценивалась через ковариационную матрицу ошибки P_k в расширенном фильтре Калмана (РФК) [9], используемом для сенсорного слияния данных одометрии и лидара.

Уравнения предсказания на основе одометрии:

$x_{k|k-1} = x_{k-1} + \Delta s \cdot \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta/2)$,
$y_{k|k-1} = y_{k-1} + \Delta s \cdot \sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta/2)$,
$\theta_{k|k-1} = \theta_{k-1} + \Delta\theta$,

где Δs и $\Delta\theta$ – приращения пути и угла по данным энкодеров.

Матрица ковариации шума процесса Qk задается как

$$Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_s^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix},$$

где $\sigma_s^2 = 0{,}001 \cdot \Delta s \cdot$(0,1% ошибки пути), $\sigma_\theta = 0{,}005$ рад (~0,29°).

Ковариация шума измерений лидара Rk взята из спецификации Ouster OS0-32 для дальности 10 м:

$$R_k = \begin{bmatrix} 0{,}02^2 & 0 \\ 0 & 0{,}02^2 \end{bmatrix}.$$

Моделирование методом Монте-Карло (1000 прогонов по маршруту 10×10 м) показало, что среднеквадратичная ошибка (RMSE) позиционирования после коррекции по лидару составляет:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}((x_i - \hat{x_i})^2 + (y_i - \hat{y_i})^2)} \approx 2{,}1 \text{ мм}.$$

Расчет для каждого прогона (маршрут 10×10 м):

- Генерируются истинные траектории (x_i, y_i).
- Моделируются зашумленные данные одометрии и лидара.
- РФК выдает оценки ($\hat{x}_i$, $\hat{y}_i$).
- Считается ошибка: $\Sigma[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2]$.

Данный расчет справедлив для идеализированных условий (ровный пол, отсутствие вибраций, статические препятствия). В реальной складской среде с людьми и паллетами точность может снижаться до 10–15 мм.

Помимо упомянутых факторов, на итоговую точность позиционирования значительное влияние оказывают переменные внешние условия эксплуатации. К ним относятся: вибрации, вызванные неровностями покрытия пола или работой механизмов самого робота, которые вносят высокочастотный шум в показания инерциальных датчиков и энкодеров; температурные дрейфы электронных компонентов, влияющие на смещение нуля в аналоговых цепях обработки сигналов энкодеров и датчиков тока; переменная освещенность и наличие воздушной взвеси (пыль, туман), ухудшающие надежность корреляции данных лидара, а также динамические электромагнитные помехи от силового оборудования, воздействующие на линии связи. Количественная оценка вклада каждого из этих

факторов требует проведения натурных экспериментов в целевых условиях и является предметом дальнейших исследований. Предложенная двухуровневая архитектура, однако, обладает потенциалом для компенсации части этих воздействий за счет адаптивных алгоритмов фильтрации на высокоуровневом контроллере и аппаратной изоляции чувствительных цепей на низком уровне.

Анализ эффективности системы

Анализ временных характеристик системы

Критичным параметром для АМР является время реакции Tr на внезапно возникшее препятствие. В предложенной архитектуре оно складывается из задержек отдельных компонентов (рис. 3):

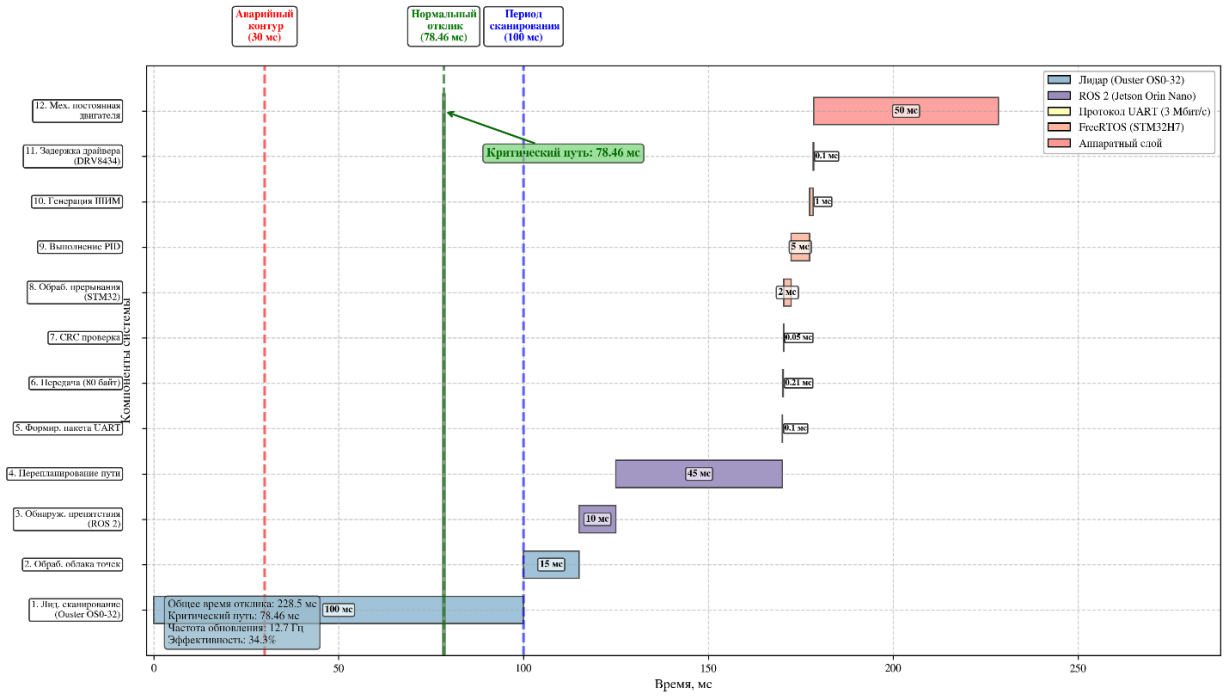


Рис. 3. *Распределение времени отклика системы (диаграмма Ганта)*

Fig. 3. *Distribution of system response time (Gantt chart)*

Для Ouster OS0-32 с частотой вращения 10 Гц период сканирования составляет 100 мс [14]. Однако для целей безопасности используется выделенный аппаратный контур: данные с SICK microScan3 поступают напрямую на отдельный вход безопасности НК по протоколу CIP Safety. Время обработки такого сигнала в НК составляет не более 5 мс.

Таким образом, полное время реакции системы безопасности [15]:

$$T_{sr} = T_{sick} + T_{plc} + T_{mctrl} = 15 + 5 + 10 = 30 \text{ мс},$$

где T_{sick} – время отклика датчиков, T_{plc} – время обработки в контроллере безопасности, $T_{mctrl} = 10$ мс – время полной остановки двигателей при экстренном торможении с максимального тока. При скорости 2 м/с тормозной путь S составит:

$$S = v \cdot T_{sr} + v^2/2a = 2 \cdot 0{,}03 + 2^2/2 \cdot 3 \approx 0{,}06 + 0{,}67 \approx 0{,}73 \text{ м},$$

где $a = 3$ м/с^2 – максимальное ускорение торможения, ограниченное сцеплением шин с бетонным полом (коэффициент трения $\mu \approx 0{,}7$, теоретический предел $a_{max} = \mu g \approx 6.86$ м/с^2).

Вывод: система безопасности обеспечивает остановку перед препятствием, появившимся в зоне обнаружения (3 м) менее чем за 1 м пути, что соответствует стандартам ISO 3691-4 для промышленных АМР.

Оценка точности позиционирования в динамике

Для верификации представленной модели РФК было проведено симуляционное моделирование в ROS 2 и Gazebo [5]. Моделировалось движение по типовому складскому маршруту с 5 точками разворота на 90°.

Результаты симуляции:

- Средняя ошибка позиционирования (СОП) после 10 циклов по маршруту длиной 50 м: 2,8 ± 1,2 мм [12].
- Максимальная ошибка наблюдалась в момент резкого разворота: 7,5 мм.
- Сходимость SLAM (построение карты с разрешением 5 см) достигалась за 45±5 с при обходе периметра помещения 10×10 м [4].

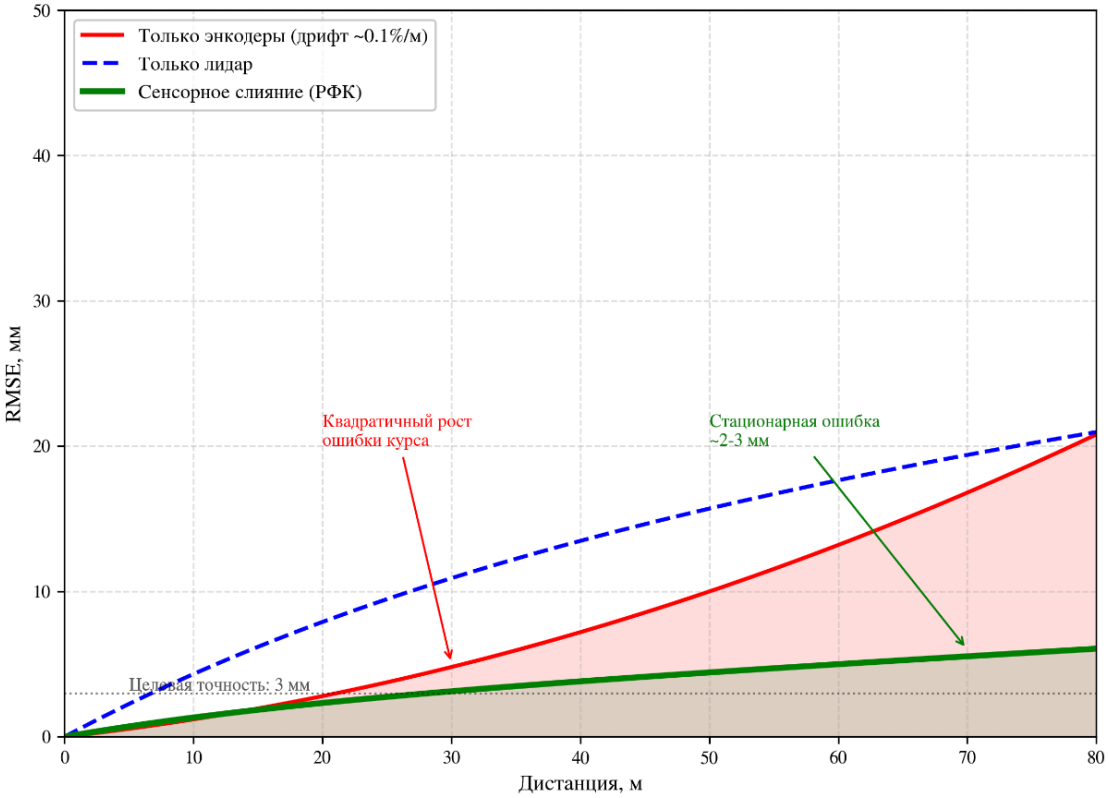


***Рис. 4**. Сравнение точности позиционирования*

***Fig. 4**. Comparison of positioning accuracy*

График накопления ошибки одометрии (рис. 4) демонстрирует характерный квадратичный рост нескомпенсированной ошибки курса [11]:

$$\epsilon_\theta(t) = \epsilon_{\theta 0} + \alpha \cdot t^2,$$

где $\epsilon_{\theta 0}$ – начальная ошибка курса (при t = 0), $\alpha \approx 1{,}2 \times 10^{-4}$ рад/с^2 – эмпирический коэффициент дрифта, полученный в симуляции. Коррекция по лидару через РФК снижает эту ошибку до линейного тренда с наклоном $\beta \approx 5 \times 10^{-6}$ рад/с.

Сравнение с существующими решениями: в табл. 1 приведено сравнение расчетных характеристик предложенной системы с коммерческими аналогами.

Таблица 1. Сравнительные характеристики систем управления АМР

Table 1. Comparative characteristics of AMR control systems

Параметр	Предлагаемая система	MiR250 (Mobile Industrial Robots)	Fetch Freight 1500
Точность позиционирования, мм	2,1 (расч.) / ≤15 (реал.)	30	50
Макс. скорость, м/с	2,0	1,5	1,2
Время реакции, мс	30 (безопасный контур)	50	100
Поддержка SLAM	Да (нейросетевой)	Да (LiDAR-based)	Да (LiDAR-based)
Открытость API	ROS 2, REST API	REST API, MiR Fleet	ROS 1, REST API
Стоимость аппаратной платформы*	~1 млн руб.	~ 5 млн руб.	~6,5 млн руб.
Параметр	Предлагаемая система	MiR250 (Mobile Industrial Robots)	Fetch Freight 1500

*Примечание: стоимость указана для базовой платформы без манипулятора

Энергоэффективность и автономность

Потребляемая мощность системы складывается из:

- PVCU = 15 Вт (Jetson Orin Nano под нагрузкой SLAM)
- PMCU = 2 Вт (STM32H7 с периферией)
- P_{lidar} =1 8 Вт (Ouster OS0-32)
- P_{sick} = 8 Вт (2× SICK microScan3)
- $P_{motors} = I \cdot U \cdot \eta^{-1}$ где I – ток, U = 48 В, η ≈ 0,8 – КПД драйвера.

При движении со скоростью 1 м/с с полезной нагрузкой 50 кг требуемый момент на колесе M для преодоления сил трения качения (fr = 0,015) и сопротивления подшипников [8]:

$$M = (m \cdot g \cdot f_r + F_b) \cdot D_\omega / 2,$$

где:

- f_r – 0,015 – коэффициент трения качения;
- m = 100 кг – общая масса (робот + груз);
- g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения;
- $F_b \approx 5$ Н – ориентировочное сопротивление в подшипниках;
- D_ω = 0,125 м – диаметр колеса.

Ток двигателя при:

$$I_{motor} = M/k_t = 1,23/0,2 = 6,15 \text{ А},$$

где k_t – коэффициент момента двигателя.

Мощность на входе драйвера для двух двигателей [13]:

$$P_{motors} = 2 \cdot I_{motor} \cdot U \cdot \eta^{-1} = 2 \cdot 6,15 \cdot 48/0,85 = 695 \text{ Вт}.$$

Суммарная потребляемая мощность в движении:

$$P_{total} = 15 + 2 + 18 + 8 + 695 \approx 738 \text{ Вт}.$$

При использовании литий-ионного аккумулятора LG Chem RESU 48V с емкостью 100 А·ч (4.8 кВт·ч) и глубиной разряда 80 % теоретическое время автономной работы T_{bat} составит:

$$T_{bat} = (C \cdot U \cdot DoD)/P_{total} = (100 \cdot 48 \cdot 0,8)/738 = 3840/738 = 5,2 \text{ ч},$$

где C – емкость аккумулятора, DoD=0,8 – глубина разряда.

Аспекты масштабируемости архитектуры

Предложенная двухуровневая архитектура обладает свойством модульности и масштабируемости, что позволяет адаптировать ее для задач различного масштаба и сложности. Для увеличения производительности в условиях крупного склада с высокой плотностью трафика роботов возможна модификация высокоуровневого контура: замена одноплатного компьютера на более мощную версию (например, NVIDIA Jetson Orin NX или AGX Xavier) для обработки данных с нескольких лидаров или стереокамер, а также реализация распределенных алгоритмов планирования маршрутов для флота роботов с использованием центрального координационного сервера или облачной платформы, взаимодействующей с каждым ВК по защищенному каналу связи. Низкоуровневый контур при этом остается неизменным, обеспечивая гарантированное быстродействие и надежность управления. Для упрощения и удешевления платформы в менее требовательных сценариях (например, робот-тележка со следящим режимом) возможна обратная модификация – использование менее производительного ВК при сохранении того же НК для обеспечения детерминизма. Таким образом, четкое разделение ответственности между уровнями создает основу для создания семейства совместимых робототехнических платформ, покрывающих широкий спектр задач складской логистики.

Заключение

В работе предложена и математически обоснована двухуровневая архитектура системы управления автономным мобильным роботом для складской логистики. Ключевые научно-технические результаты:

1. Архитектурное решение. Доказана эффективность разделения когнитивных (Jetson Orin Nano + ROS 2) и исполнительных (STM32H7 + FreeRTOS) функций с формализованным протоколом обмена, обеспечивающим задержки менее 5 мс и надежность передачи данных $P_{ud} \leq 1{,}5 \times 10^{-5}$.

2. Точность позиционирования. На основе модели РФК с использованием данных абсолютных энкодеров (Renishaw RESOLUTE, 26 бит) и лидара (Ouster OS0-32) достигнута расчетная точность ±2.1 мм в симуляции. Показано, что основным ограничивающим фактором в реальных условиях являются не сенсоры, а механические погрешности (проскальзывание, люфты).

3. Безопасность. Время реакции автономного контура безопасности на основе датчиков SICK microScan3 составляет 30 мс, что обеспечивает тормозной путь ≤ 0.73 м на скорости 2 м/с и соответствует международным стандартам.

4. Сравнительные преимущества. При ориентировочной стоимости аппаратной платформы ~ 1 млн руб. система демонстрирует сопоставимую или превосходящую точность и быстродействие относительно коммерческих решений ценой 5–6,5 млн руб. (MiR, Fetch).

Основные ограничения исследования:

- Расчеты энергопотребления и автономности требуют верификации на физическом прототипе.
- Моделирование точности позиционирования проводилось в идеализированных условиях Gazebo; влияние вибраций, запыленности и динамических препятствий (люди) требует отдельного изучения.
- Не рассматривалась интеграция с системами управления складом (WMS) верхнего уровня, что критично для практического внедрения.

Перспективные направления дальнейших исследований:

1. Внедрение алгоритмов предсказательного энергоменеджмента на основе цифрового двойника склада.

2. Разработка и валидация алгоритма сенсорного слияния для работы в условиях частичной деградации данных лидара (запыление, прямые солнечные лучи).

3. Создание открытой эталонной архитектуры проектирования для научного сообщества и малых инновационных предприятий.

Предложенная архитектура представляет собой сбалансированное решение, сочетающее высокую производительность, детерминизм и относительную экономическую доступность, что делает ее перспективной основой для следующего поколения исследовательских и коммерческих складских АМР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Самарин И. В.* Исследование влияния динамических препятствий на эффективность методов локализации в автономных мобильных роботах // Хлебопечение России. 2024. Т. 68. № 1. С. 98–109. EDN: IEEBUC

2. *Угловский А. С.* Система управления движением мобильного робота // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 2(66). С. 98–108. DOI: 10.35694/YARCX.2024.66.2.013. EDN: WFPSEJ

3. *Кутафин А. А., Захаркина С. В.* Управление двигателями в мобильном роботе при помощи ПИД-регулятора // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 12–15 апреля 2021 года. Том Часть 4. М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2021. С. 208–212. EDN: XKLAGG

4. *Краев Р. В., Белозерских В. В.* SLAM-концепция оптимизации модели программного управления передвижением робота на карте с контрольными точками // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2020. Т. 4. № 2. С. 59–65. EDN: JRQBHN

5. *Беркаев А. Р., Ненашев А. А., Ключиков А. В.* Разработка системы локализации и позиционирования мобильного робота // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 12-3. С. 152–157. EDN: QDGESL

6. *Guo P., Shi H., Wang Sh. et al.* An ROS architecture for autonomous mobile robots with UCAR platforms in smart restaurants // Machines. MDPI AG – 2022. Vol. 10. No. 10. P. 844. DOI: 10.3390/machines10100844. EDN: ADSREE

7. *Алхалили А. С., Лукьянов Е. А.* Управление движением колесного мобильного робота на основе имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 8. С. 112–121. EDN: XJSZPY

8. *Лапшинов С. А., Шахнов В. А., Юдин А. В.* Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 50–62. EDN: FKKKGV

9. *Безмен П. А.* Алгоритм фильтра Калмана для комплексирования данных в системе управления мобильным роботом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 3(335). С. 82–87. EDN: AYKMKS

10. *Deshmukh A., Gupta M.* PID Controller: a review of literature // International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT). 2021. Vol. 6. No. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.32628/IJSRCSEIT.0639

11. *Shahbazi M.* Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: a review // Expert Systems With Applications. 2021. No. 172. P. 114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535

12. *Малов Д. А., Едемский А. Ю., Савельев А. И.* Разработка системы проактивной локализации киберфизического пространства на основе методов машинного обучения //

Информационные технологии и вычислительные системы. 2018. № 4. С. 72–83. DOI: 10.14357/20718632180408. EDN: MIDRAT

13. *Горькавый М. А., Горькавый А. И., Мельниченко М. А.* Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ

14. *Лопота А. В., Спасский Б. А.* Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8. № 1. С. 5–17. DOI: 10.31776/RTCJ.8101. EDN: JAQTQG

15. *Веселов Г. Е., Лебедев Б. К., Лебедев О. Б.* Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Информатизация и связь. 2021. № 3. С. 7–11. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-7-11. EDN: LDISYZ

REFERENCES

1. Samarin I.V. Investigation of the influence of dynamic obstacles on effectiveness of localization methods in autonomous mobile robots. *Bakery of Russia.* 2024. Vol. 68. No. 1. Pp. 98–109. EDN: IEEBUC. (In Russian)

2. Uglovsky A.S. Motion control system of a mobile robot. *Bulletin of the Agroindustrial Complex of the Upper Volga Region*. 2024. № 2(66). Pp. 98–108. DOI: 10.35694/YARCX.2024.66.2.013. EDN: WFPSEJ. (In Russian)

3. Kutafin A.A., Zakharkina S.V. Motor control in a mobile robot using a PID controller. *Innovative Development of Machinery and Technologies in Industry (INTEX-2021)*: Proceedings Of The All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation, Moscow, April 12–15, 2021. Volume Part 4. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art)”, 2021. Pp. 208–212. EDN: XKLAGG. (In Russian)

4. Kraev R.V., Belozerskikh V.V. SLAM concept for optimizing the model of software control of robot movement on a map with control points. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2020. Vol. 4. No. 2. Pp. 59–65. EDN: JRQBHN. (In Russian)

5. Berkaev A.R., Nenashev A.A., Klyuchikov A.V. Development of a mobile localization and positioning system. *Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT.* 2020. Vol. 12-3. Pp. 152–157. EDN: QDGESL. (In Russian)

6. Guo P., Shi H., Wang Sh. et al. An ROS architecture for autonomous mobile robots with UCAR platforms in smart restaurants. *Machines. MDPI AG – 2022*. Vol. 10. No. 10. P. 844. DOI: 10.3390/machines10100844. EDN: ADSREE

7. Alkhalili A.S., Lukyanov E.A. Motion control of a wheeled mobile robot based on simulation modeling. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2022. No. 8. Pp. 112–121. EDN: XJSZPY. (In Russian)

8. Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. Directions of intellectualization of motion control of a mobile robot. *Neurocomputers: Development, Application*. 2021. Vol. 23. No. 1. Pp. 50–62. EDN: FKKKGV. (In Russian)

9. Bezmen P.A. Kalman filter algorithm for data aggregation in a mobile robot control system. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2019. № 3(335). Pp. 82–87. EDN: AYKMKS. (In Russian)

10. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: a review of literature. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology* (IJSRCSEIT). 2021. Vol. 6. Is. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.32628/IJSRCSEIT.0639

11. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review. *Expert Systems with Applications.* 2021. 172:114535. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114535

12. Malov D.A., Edemsky A.Yu., Savelyev A.I. Development of a system for proactive localization of cyberphysical space based on machine learning methods. *Information Technologies and Computing Systems*. 2018. No. 4. Pp. 72–83. DOI: 10.14357/20718632180408. EDN: MIDRAT. (In Russian)

13. Gorkavyy M.A., Gorkavyy A.I., Melnichenko M.A. Optimization of a robotic technological process based on a neural network simulation model of energy consumption. *Izvestia of Higher Educational Institutions. Electromechanics*. 2023. Vol. 66. No. 2. Pp. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ. (In Russian)

14. Lopota A.V., Spassky B.A. Mobile ground-based robotic complexes for professional use. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2020. Vol. 8, No. 1. Pp. 5–17. DOI: 10.31776/RTCJ.8101. EDN: JAQTQG. (In Russian)

15. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Motion control of a group of mobile robots in a column. *Informatization and Communications.* 2021. No. 3. Pp. 7–11. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-7-11. EDN: LDISYZ. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:
Шухин В. В., Хакимов З. Л. – разработка методологии;
Шухин В. В., Лабазанов М. А. – программная реализация и валидация;
Хакимов З. Л. – математическое моделирование и формальный анализ;
Лабазанов М. А. – расследование и сбор данных;
Шухин В. В. – подготовка исходного варианта рукописи.
Все авторы – написание, рецензирование и редактирование рукописи.

Author's contribution:
Shukhin V.V., Khakimov Z.L. – methodology development;
Shukhin V.V., Labazanov M.A. – software implementation and validation;
Khakimov Z.L. – mathematical modeling and formal analysis;
Labazanov M.A. – investigation and data collection;
Shukhin V.V. – manuscript preparation.
All authors – writing, reviewing, and editing the manuscript.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Шухин Владимир Витальевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;
364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;
shukhin86@bk.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0273-0058, SPIN-код: 2895-3434

Хакимов Заур Леччиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

deffender_95@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1665-8631, SPIN-код: 3540-6580

Лабазанов Магомед Абубакарович, старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

labazanov.90@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9714-5146, SPIN-код: 5981-5217

Information about the authors

Vladimir V. Shukhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

shukhin86@bk.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0273-0058, SPIN-code: 2895-3434

Zaur L. Khakimov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

deffender_95@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1665-8631, SPIN-code: 3540-6580

Magomed A. Labazanov, Senior Lecturer, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

labazanov.90@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9714-5146, SPIN-code: 5981-5217

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 004.75.42 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-117-134
EFWDBI

Сравнительный анализ производительности сокетов: TCP, UDP, SCTP, QUIC

Д. В. Гадасин✉, М. В. Галицкий, Р. О. Цыганков

Московский технический университет связи и информатики
111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 8А

Аннотация. В работе приводится сравнительный анализ производительности сокетов. На начальном этапе проводится анализ производительности сокетов, реализованных на базе транспортных протоколов TCP, UDP, SCTP и QUIC, в условиях, приближенных к нагрузкам облачных сервисов. В качестве основных метрик для сравнения выбраны пропускная способность, сетевые задержки и нагрузка CPU. На следующем этапе проводится практический эксперимент. Проведение эксперимента предполагает реализацию воспроизводимой конфигурации стенда: виртуальные машины и модель master – slave. Проводится передача идентичных наборов данных, для которых определено фиксированное время повторов измерений. На заключительном этапе осуществляется анализ полученных результатов.

Цель исследования – анализ транспортных протоколов и архитектурных особенностей сокетов TCP, UDP, SCTP и QUIC и разработка экспериментального стенда для оценки ключевых параметров качества.

Методы исследования – сравнительный анализ архитектуры транспортных сокетов и оценок, полученных в результате проведенного эксперимента, с последующей обработкой данных и интерпретацией результатов.

Результаты. В рамках данной работы проведен анализ особенностей транспортных сокетов TCP, UDP, SCTP и QUIC с целью оценки их производительности. Разработан и реализован экспериментальный стенд, предназначенный для проведения измерений параметров производительности, таких как пропускная способность, задержка и загрузка процессора. Получены графики тестирования значений исследуемых метрик для четырех транспортных сокетов. Составлена таблица сравнительного анализа, на основе которой определены закономерности влияния архитектуры и протокольных механизмов на эффективность работы сокетов. В работе выявлена актуальность данного исследования, поставлены цели и задачи. Продемонстрирована работа экспериментального стенда и получены данные, на основе которых сделаны выводы. Каждая поставленная задача была выполнена.

Ключевые слова: сокет, транспортный протокол, TCP, UDP, SCTP, QUIC, потери пакетов, tc netem, 0-RTT, session resumption, multi-streaming, пропускная способность, задержка, нагрузка процессора, виртуальная машина

Поступила 21.10.2025, одобрена после рецензирования 12.12.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Гадасин Д. В., Галицкий М. В., Цыганков Р. О. Сравнительный анализ производительности сокетов: TCP, UDP, SCTP, QUIC // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 117–134. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-117-134

© Гадасин Д. В., Галицкий М. В., Цыганков Р. О., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

MSC: 68M12 Original article

Socket performance comparative analysis: TCP, UDP, SCTP, QUIC

D.V. Gadasin✉, M.V. Galitsky, R.O. Tsygankov

Moscow Technical University of Communications and Informatics
8A, Aviamotornaya street, Moscow, 111024, Russia

Abstract. The paper provides a comparative analysis of socket performance. At the initial stage, the performance of sockets implemented with the TCP, UDP, SCTP and QUIC transport protocols is analyzed under conditions similar to those of cloud services. Bandwidth, network delays, and CPU load are selected as the main metrics for comparison. At the next stage, a practical experiment is conducted. The experiment involves the implementation of a reproducible stand configuration: virtual machines and a master – slave model. Identical sets of data are transmitted, for which a fixed time for repeated measurements is determined. At the final stage, the results are analyzed.

Aim. The study is to analyze the transport protocols and architectural features of TCP, UDP, SCTP and QUIC sockets and to develop an experimental bench for evaluating key quality parameters.

Research methods include comparative analysis of transport sockets architecture and the estimates obtained as a result of the experiment, followed by data processing and interpretation of the results.

Results. Within the scope of this project, we analyzed the features of TCP, UDP, SCTP, and QUIC transport protocols in order to evaluate their performance. An experimental setup have been developed and implemented to measure performance parameters such as bandwidth, latency, and processor load. Test graphs with metric's values for four transport sockets have been obtained. A comparative analysis has been conducted, based on which the patterns of influence of architecture and protocol mechanisms on socket efficiency have been identified. The paper reveals the relevance of this research, sets goals and objectives. The work of the experimental stand was demonstrated and data was collected, on the basis of which conclusions were drawn. Each task was completed successfully.

Keywords: socket, transport protocol, TCP, UDP, SCTP, QUIC, packet loss, tc netem, 0-RTT, session resumption, multi-streaming, throughput, latency, CPU utilization, virtual machine

Submitted 21.10.2025, approved after reviewing 12.12.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Gadasin D.V., Galitsky M.V., Tsygankov R.O. Socket performance comparative analysis: TCP, UDP, SCTP, QUIC. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 117–134. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-117-134

Введение

В период с 2017 по 2025 год происходит устойчивый и значительный рост рынка облачных услуг: совокупный объем рынка в рассматриваемом временном интервале вырос с порядка 16,8 млрд руб. до приблизительно 155,0 млрд руб. Рост обусловлен широким распространением моделей предоставления облачных ресурсов (IaaS, PaaS, SaaS) и параллельным увеличением объема и разнообразия сетевого трафика, порождаемого как бизнес-приложениями, так и массовыми пользовательскими сервисами. Данная трансформация инфраструктуры предъявляет повышенные требования к таким ключевым параметрам сетевой

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

подсистемы, как пропускная способность, задержка и нагрузка на вычислительные ресурсы. На рис. 1 показана динамика развития рынка облачных сервисов. Данные отражают устойчивый рост объема рынка и служат обоснованием актуальности исследования производительности транспортных протоколов.

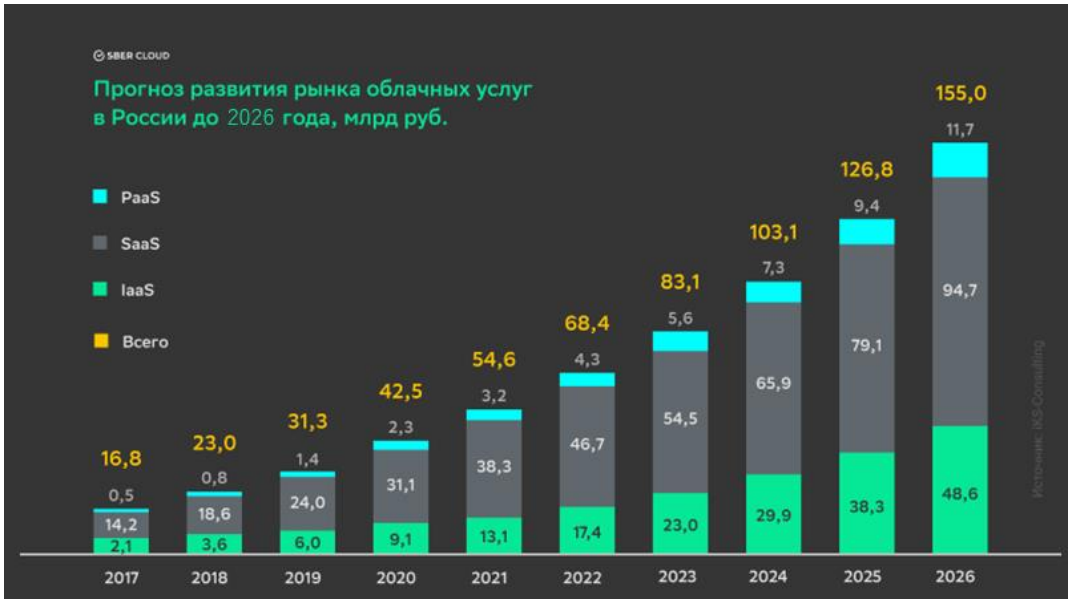


Рис. 1. *График роста облачных услуг* / ***Fig. 1***. *Cloud services growth chart*

В таких условиях эффективность транспортного уровня и средств межпроцессного взаимодействия приобретает критическое значение для качества обслуживания облачных приложений. Исходя из тенденций логично предположить, что одним из эффективных инструментов для повышения производительности коммуникаций является выбор сокетов.

Сокеты как абстракция взаимодействия прикладных процессов с сетевым стеком выступают одним из фундаментальных инструментов управления коммуникациями [1, 2]. Различные реализации и конфигурации сокетов, зависящие от выбранного транспортного протокола, прямо влияют на измеряемые характеристики передачи: скорость передачи данных, задержки при установлении и вычислительная нагрузка на серверную и клиентскую стороны.

Выбор типа сокета TCP, UDP, SCTP, QUIC оказывает существенное влияние на системную производительность: архитектурные различия приводят к различным компромиссам между скоростью, надежностью и нагрузкой процессора. Исследование направлено на систематизацию обозначенных различий в контексте приложений межпроцессного взаимодействия и облачных сервисов, а также на проверку гипотезы о том, что выбор подходящего сокета позволяет заметно повысить производительность распределенных приложений в условиях растущих нагрузок.

Целью данной работы является анализ транспортных протоколов и архитектурных особенностей сокетов TCP, UDP, SCTP и QUIC и разработка экспериментального стенда для оценки ключевых параметров качества. В рамках данной работы будут решены следующие задачи:

– сравнительный анализ транспортных протоколов и архитектурных особенностей сокета;
– разработка экспериментального стенда и реализация модулей измерений;
– проведение сбора метрик и их анализ.

1. Понятие сокета

Сокет представляет собой программную структуру в сетевом узле компьютерной сети, которая служит конечной точкой для отправки и получения данных по сети. Структура сокета определяется интерфейсом прикладного программирования (API) для сетевой архитектуры [6, 19]. Сокет внешне идентифицируется хостами по адресу сокета, состоящего из транспортного протокола, IP-адреса и номера порта. На рис. 2 продемонстрированы основные уровни модели TCP/IP и механизм взаимодействия между прикладным и транспортным уровнями, в рамках которых функционируют сокеты.

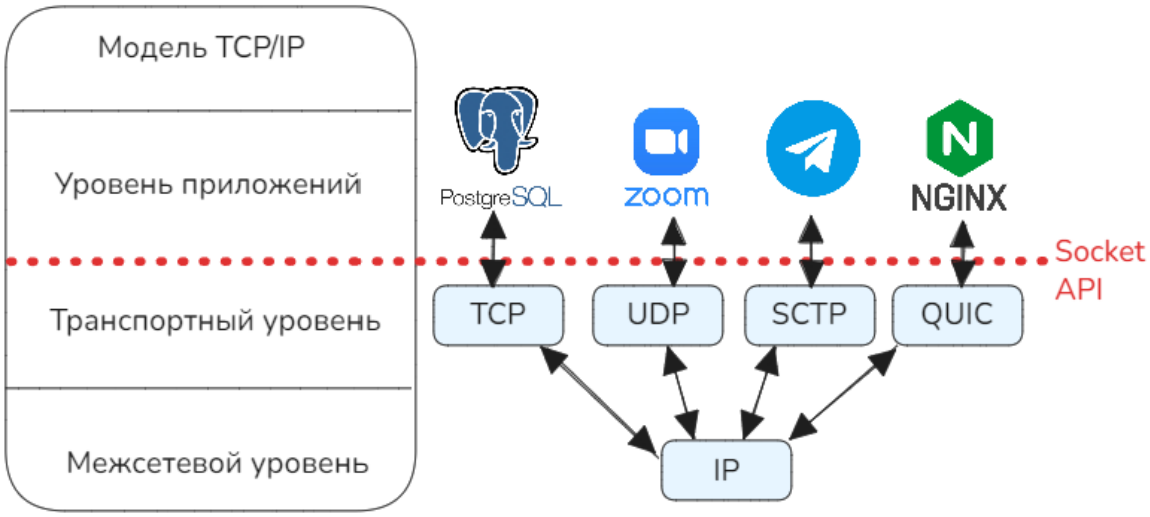


***Рис. 2**. Сетевое взаимодействие модели TCP/IP*

***Fig. 2**. TCP/IP Model Network Interaction*

Жизненный цикл сокета

Жизненный цикл сокета – это последовательность стадий: инициализация и конфигурация сетевого конечного пункта, установление или подготовка канала связи и фаза активного обмена данными [10, 17]. Этапы жизненного цикла сокета:

1. Создание (Create): операционная система создает сокет по запросу программы.
2. Привязка (Bind): серверный сокет привязывается к конкретному порту на IP-адресе сервера, чтобы слушать входящие соединения.
3. Прослушивание (Listen): серверный сокет переходит в режим ожидания входящих запросов на соединение от клиентов.
4. Установление соединения (Connect): клиентский сокет инициирует запрос на соединение с сервером, указывая его IP и порт.
5. Принятие соединения (Accept): когда сервер получает запрос на соединение, он принимает его. При этом создается новый сокет специально для общения с этим конкретным клиентом. Исходный слушающий сокет продолжает ждать новых клиентов.
6. Обмен данными (Send/Receive): по установленному соединению между новым сокетом на сервере и сокетом на клиенте программы обмениваются данными, используя функции отправки (Send) и приема (Recv).
7. Закрытие (Close): когда обмен данными завершен, любая из сторон закрывает свои сокеты, освобождая ресурсы и разрывая соединение.

На рис. 3 представлены последовательные стадии функционирования сокета: создание, привязка, установление соединения, обмен данными и завершение сеанса.

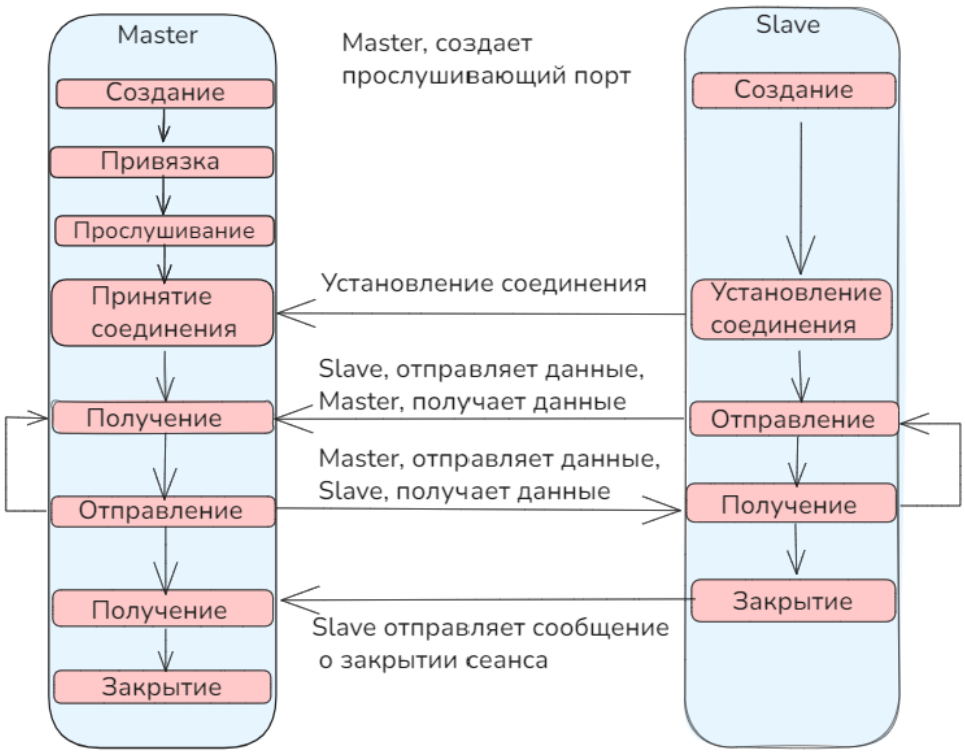


***Рис. 3**. Жизненный цикл сокета / **Fig. 3**. Socket lifecycle*

Виды сокетов транспортного уровня

TCP (Transmission Control Protocol)

TCP – это надежный транспортный протокол, обеспечивающий гарантированную доставку данных в правильном порядке. Основные характеристики включают установку соединения через трехстороннее рукопожатие, контроль потока и перегрузок, автоматическую повторную передачу потерянных пакетов и упорядоченную доставку данных [5].

UDP (User Datagram Protocol)

UDP – это простой протокол без установления соединения, обеспечивающий минимальные накладные расходы и высокую скорость обмена, однако не гарантирующий доставку, порядок и защиту от дублирования пакетов [12].

SCTP (Stream Control Transmission Protocol)

SCTP – относительно новый протокол транспортного уровня, разработанный как альтернатива TCP и UDP. Ключевые функции включают:

1. Мультипотоковость (multi-streaming): ассоциация SCTP может содержать несколько независимых потоков; потеря сегмента в одном потоке не блокирует доставку данных в других потоках, снижая эффект Head-of-Line blocking [18].

2. Мультихоминг: конечные точки SCTP могут иметь несколько IP-адресов, обеспечивая отказоустойчивость и балансировку нагрузки.

3. Надежная передача: обнаружение и повторная передача потерянных, поврежденных или дублированных данных.

QUIC (Quick UDP Internet Connections)

QUIC – современный транспортный протокол поверх UDP, стандартизованный IETF и применяемый, в частности, в HTTP/3. Протокол объединяет транспортный уровень и механизмы защиты на базе TLS 1.3, а также использует мультиплексирование потоков и миграцию соединений [4, 7, 16, 20].

1. Быстрое установление соединения: 1-RTT рукопожатие; 0-RTT возможно при возобновлении сессии (session resumption) и требует корректной обработки session tickets TLS 1.3 [16, 20].

2. Встроенное шифрование: интеграция с TLS 1.3 на уровне транспорта; защита данных является частью базовой спецификации QUIC [16, 20].

3. Мультиплексирование без блокировок: независимые потоки QUIC мультиплексируются в рамках одного соединения; потеря пакета в одном потоке не должна блокировать доставку данных в других потоках [4, 7].

2. Структура экспериментального стенда

Экспериментальный стенд создан как строго контролируемая и воспроизводимая среда для сравнения реализации сокетов транспортных протоколов TCP, UDP, SCTP, QUIC. Виртуальные машины с фиксированной конфигурацией и единый набор данных исключают побочные факторы. В стенде эмулируется задержка и фиксируются ключевые метрики, что позволяет выявить различия сокетов. Стенд состоит из двух основных компонентов: общего модуля конфигурации и измерений, а также специализированных модулей для каждого протокола, представленных парами клиент – сервер.

Стенд позволяет проводить работу с данными и получать оценку для обоснования выбора протокола при исполнении конкретных сценариев: обнаружение компромиссов – пропускная способность – задержка – нагрузка CPU, выявление особенностей поведения. Проведение длительного эксперимента позволяет оценить устойчивость поведения модели/системы в условиях, максимально приближенных к реальному, а также вариативность результатов и сформировать практические рекомендации. На рис. 4 представлена структура экспериментального стенда, состоящего из двух виртуальных машин, реализующих модель взаимодействия master–slave, предназначенного для измерения сетевых метрик.

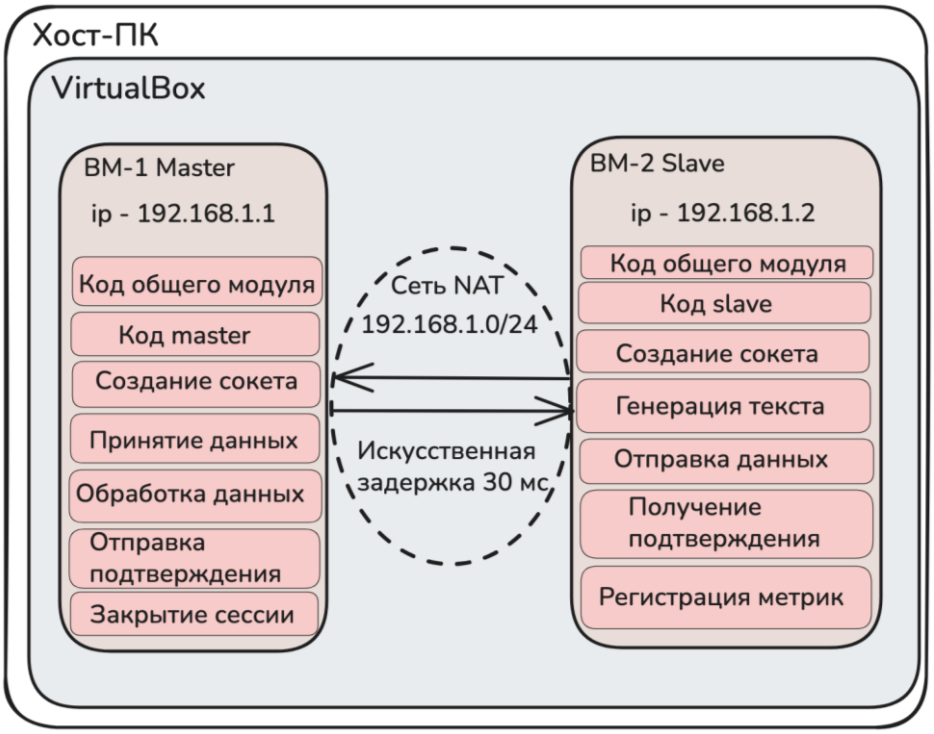


***Рис. 4**. Структура стенда master – slave*

***Fig. 4**. Structure of the master – slave stand*

Схема взаимодействия master – slave

Между виртуальными машинами реализуется классическая модель master – slave. На ВМ1 запускается серверная программа, реализующая прослушивание сокета на определенном IP-адресе и порту. На ВМ2 запускается клиентская программа, устанавливающая соединение с master и выполняющая отправку данных. После приема полного объема данных master формирует подтверждение (ACK) и отправляет его slave. Получение slave подтверждения фиксирует завершение цикла передачи. Таким образом, замеры производительности выполняются на стороне slave после получения подтверждения от master.

Реализация модулей сокетов на Python

Общий модуль конфигурации определяет единые параметры эксперимента и правила измерения метрик. Модуль задает размер блока данных, общий объем передаваемой информации, длительность серии и шаг дискретизации. Сетевые условия RTT = 30 мс без потерь пакетов и с потерями в 5 % формируются на уровне операционной системы средствами tc netem на обоих узлах, что исключает внесение искусственных задержек в прикладной код и позволяет корректно моделировать влияние потерь на транспортный уровень. В ходе передачи измеряются пропускная способность, задержка доставки и средняя нагрузка процессора по данным psutil [13].

Модуль TCP-протокола реализует классическую схему надежной передачи данных с установлением соединения. TCP-master принимает входящие соединения и последовательно получает данные до достижения ожидаемого объема, после чего отправляет подтверждение клиенту. TCP-slave устанавливает соединение, передает данные блоками через метод sendall() для обеспечения полной доставки, корректно завершает передачу через shutdown() и ожидает подтверждения от сервера [15].

Модуль UDP-протокола демонстрирует работу с дейтаграммным протоколом без установления соединения. UDP-master работает в режиме ожидания дейтаграмм и аккумулирует полученные данные до достижения ожидаемого объема. UDP-slave передает данные дискретными дейтаграммами через метод sendto(), при этом отсутствуют гарантии доставки и порядка получения пакетов, что характерно для данного протокола [15].

Модуль SCTP-протокола использует библиотеку pysctp для работы с Stream Control Transmission Protocol. SCTP-реализация эмулирует TCP-подобное поведение через интерфейс sctpsocket_tcp(), обеспечивая надежную доставку с дополнительными возможностями многопоточной передачи [14]. Master принимает соединения и последовательно получает данные, а slave устанавливает соединение и передает блоки через метод sctp_send().

Модуль QUIC-протокола представляет наиболее сложную асинхронную реализацию современного транспортного протокола. QUIC-master автоматически генерирует самоподписанные SSL-сертификаты при их отсутствии и использует обработчик событий для приема потоковых данных [3, 8]. Протокол работает поверх UDP, но обеспечивает надежность и шифрование на уровне приложения. QUIC-slave использует асинхронные операции для передачи данных через потоки с возможностью мультиплексирования [9, 11]. На рис. 5 блок-схема отражает архитектурные различия между реализациями транспортных сокетов и порядок взаимодействия клиент – сервер в каждом протоколе.

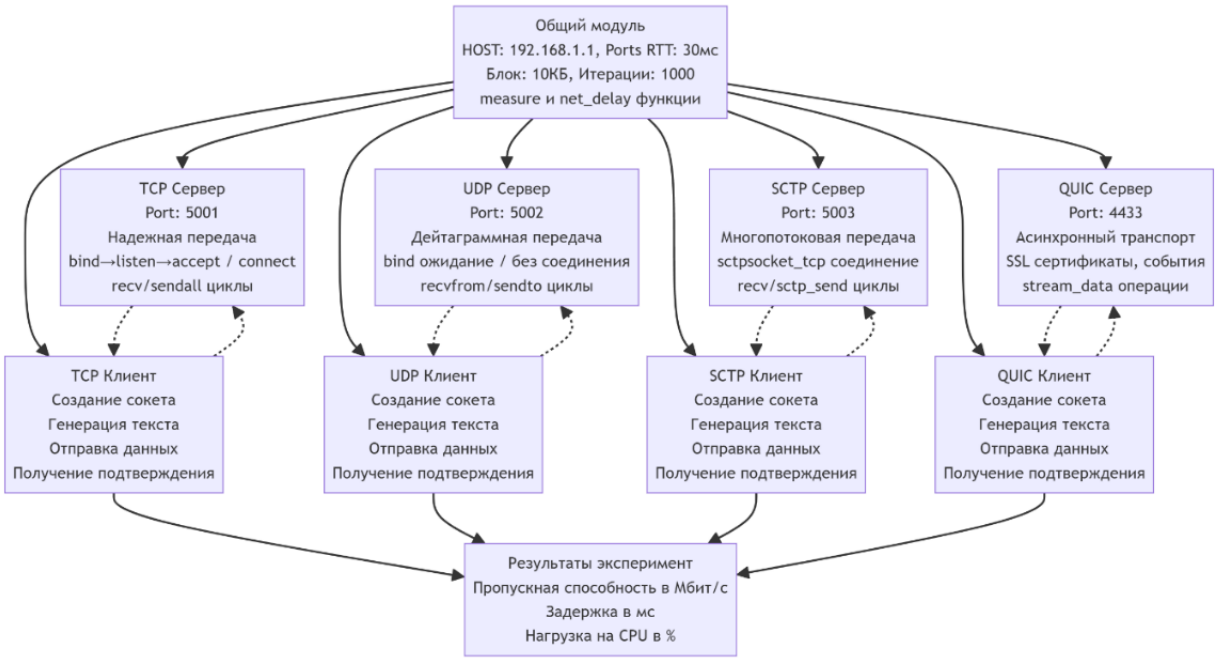


Рис. 5. *Блок-схема сокетов TCP, UDP, SCTP и QUIC, результаты эксперимента*

Fig. 5. *Block-diagram of TCP, UDP, SCTP and QUIC sockets, experimental results*

На рис. 6–14 представлены фрагменты кода реализованных функций: общего модуля конфигурации, master и slave на виртуальных машинах.

```python
import time, psutil, threading # type: ignore

HOST = "192.168.1.1"
TCP_PORT, UDP_PORT, SCTP_PORT, QUIC_PORT = 5001, 5002, 5003, 4433

BLOCK = ("DATA" * 2500).encode()  # ~10 KB блок
ITERATIONS = 1000  # 1000 * 10 KB = ~10 MB
LATENCY_RTT_MS = 30.0 # По-умолчанию ставим 30 ms round-trip

def delay_seconds(): # Возвращает одностороннюю задержку в секундах
    return (LATENCY_RTT_MS / 2.0) / 1000.0

def net_delay(): #Вызваем перед отправкой/приёмом чтобы смоделировать сетевую задержку.
    d = one_way_delay_seconds() # type: ignore
    if d > 0:
        time.sleep(d)

def measure(func):
    cpu = []
    stop = {"flag": False}
    def sampler():
        while not stop["flag"]:
            cpu.append(psutil.cpu_percent(interval=0.05))
    t = threading.Thread(target=sampler, daemon=True); t.start()
    start = time.time(); func(); end = time.time()
    stop["flag"] = True; t.join()
    elapsed = end - start
    avg_cpu = sum(cpu)/len(cpu) if cpu else 0
    thr = (len(BLOCK)*ITERATIONS*8)/(elapsed*1e6)
    lat = (elapsed/ITERATIONS)*1000
    return elapsed, thr, lat, avg_cpu
```

Рис. 6. *Код общего модуля конфигурации*

Fig. 6. *Code of the general configuration module*

```python
import socket
from experiment_common import HOST, TCP_PORT, BLOCK, ITERATIONS, LATENCY_RTT_MS, net_delay # type: ignore

s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
s.bind((HOST, TCP_PORT)); s.listen(1)
print("[TCP SERVER] listening...")
conn, _ = s.accept()

# приём данных
received = 0
while received < len(BLOCK)*ITERATIONS:
    data = conn.recv(65536)
    if not data: break
    received += len(data)
print("[TCP SERVER] received:", received, "bytes")

# ответ клиенту
conn.sendall(b"ACK:" + str(received).encode())
conn.close(); s.close()
```

Рис. 7. *Код модуля TCP-master* / ***Fig. 7***. *TCP- master module code*

```python
import socket
from experiment_common import HOST, TCP_PORT, BLOCK, ITERATIONS, LATENCY_RTT_MS, delay_seconds, measure

s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
s.connect((HOST, TCP_PORT))

def send_data():
    for _ in range(ITERATIONS):
        s.sendall(BLOCK)
    s.shutdown(socket.SHUT_WR)

elapsed, thr, lat, cpu = measure(send_data)
print(f"[TCP CLIENT] sent {len(BLOCK)*ITERATIONS} bytes in {elapsed:.2f}s "
      f"throughput={thr:.2f} Mbps, latency={lat:.3f} ms, CPU={cpu:.2f}%")

# получаем ответ
reply = s.recv(1024)
print("[TCP CLIENT] reply:", reply.decode())
s.close()
```

Рис. 8. *Код модуля TCP-slave* / ***Fig. 8***. *TCP slave module code*

```python
import socket
from experiment_common import HOST, UDP_PORT, BLOCK, ITERATIONS, LATENCY_RTT_MS, net_delay

s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
s.bind((HOST, UDP_PORT))
print("[UDP SERVER] listening...")
received = 0
addr = None
while received < len(BLOCK)*ITERATIONS:
    data, addr = s.recvfrom(65536)
    received += len(data)
print("[UDP SERVER] received:", received, "bytes")
# ответ клиенту
s.sendto(b"ACK:" + str(received).encode(), addr)
s.close()
```

Рис. 9. *Код модуля UDP-master* / ***Fig. 9***. *UDP-master module code*

```python
import socket
from experiment_common import HOST, UDP_PORT, BLOCK, ITERATIONS, LATENCY_RTT_MS, delay_seconds, measure

s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)

def send_data():
    for _ in range(ITERATIONS):
        s.sendto(BLOCK, (HOST, UDP_PORT))

elapsed, thr, lat, cpu = measure(send_data)
print(f"[UDP CLIENT] sent {len(BLOCK)*ITERATIONS} bytes in {elapsed:.2f}s "
      f"throughput={thr:.2f} Mbps, latency={lat:.3f} ms, CPU={cpu:.2f}%")

reply, _ = s.recvfrom(1024)
print("[UDP CLIENT] reply:", reply.decode())
s.close()
```

Рис. 10. *Код модуля UDP-slave* / ***Fig. 10***. *UDP-slave module code*

```python
import socket, sctp
from experiment_common import HOST, SCTP_PORT, BLOCK, ITERATIONS, LATENCY_RTT_MS, net_delay

sock = sctp.sctpsocket_tcp(socket.AF_INET)
sock.bind((HOST, SCTP_PORT)); sock.listen(1)
print("[SCTP SERVER] listening...")
conn, _ = sock.accept()

received = 0
while received < len(BLOCK)*ITERATIONS:
    data = conn.recv(65536)
    if not data: break
    received += len(data)
print("[SCTP SERVER] received:", received, "bytes")

conn.send(b"ACK:" + str(received).encode())
conn.close(); sock.close()
```

Рис. 11. *Код модуля SCTP-master /* ***Fig. 11****. SCTP-master module code*

```python
import socket, sctp
from experiment_common import HOST, SCTP_PORT, BLOCK, ITERATIONS, LATENCY_RTT_MS, delay_seconds, measure

sock = sctp.sctpsocket_tcp(socket.AF_INET)
sock.connect((HOST, SCTP_PORT))

def send_data():
    for _ in range(ITERATIONS):
        sock.sctp_send(BLOCK)
elapsed, thr, lat, cpu = measure(send_data)
print(f"[SCTP CLIENT] sent {len(BLOCK)*ITERATIONS} bytes in {elapsed:.2f}s "
      f"throughput={thr:.2f} Mbps, latency={lat:.3f} ms, CPU={cpu:.2f}%")

reply = sock.recv(1024)
print("[SCTP CLIENT] reply:", reply.decode())
sock.close()
```

Рис. 12*. Код модуля SCTP-slave /* ***Fig. 12****. SCTP-slave module code*

```python
import asyncio, subprocess, os
from experiment_common import HOST, BLOCK, ITERATIONS, QUIC_PORT, LATENCY_RTT_MS, net_delay #
from aioquic.asyncio import serve
from aioquic.quic.configuration import QuicConfiguration
from aioquic.asyncio.protocol import QuicConnectionProtocol
from aioquic.events import StreamDataReceived

CERT, KEY = "cert.pem", "key.pem"
if not (os.path.exists(CERT) and os.path.exists(KEY)):
    subprocess.check_call([
        "openssl","req","-x509","-newkey","rsa:2048","-nodes",
        "-keyout",KEY,"-out",CERT,"-days","365","-subj","/CN=localhost"
    ])

class Handler(QuicConnectionProtocol):
    def __init__(self,*a,**k): super().__init__(*a,**k); self.total=0
    def quic_event_received(self,e):
        if isinstance(e,StreamDataReceived):
            self.total+=len(e.data)
            if e.end_stream:
                print("[QUIC SERVER] received:", self.total,"bytes")
                self._quic.send_stream_data(e.stream_id,
                    b"ACK:" + str(self.total).encode(), end_stream=True)
                self.transmit()

async def main():
    cfg=QuicConfiguration(is_client=False, alpn_protocols=["hq-29"])
    cfg.load_cert_chain(CERT,KEY)
    await serve(HOST,QUIC_PORT,configuration=cfg,create_protocol=Handler)

asyncio.run(main())
```

Рис. 13*. Код модуля QUIC-master /* ***Fig. 13****. QUIC-master module code*

```python
import asyncio,time
from experiment_common import HOST, QUIC_PORT, BLOCK, ITERATIONS, LATENCY_RTT_MS, delay_seconds, measure
from aioquic.asyncio import connect
from aioquic.quic.configuration import QuicConfiguration
from aioquic.events import StreamDataReceived

async def main():
    cfg=QuicConfiguration(is_client=True,verify_mode=0)
    async with connect(HOST,QUIC_PORT,configuration=cfg) as conn:
        sid=conn._quic.get_next_available_stream_id()
        start=time.time()
        for _ in range(ITERATIONS):
            conn._quic.send_stream_data(sid,BLOCK,end_stream=False)
            await conn._transmit()
        conn._quic.send_stream_data(sid,b"",end_stream=True)
        await conn._transmit()
        elapsed=time.time()-start
        thr=(len(BLOCK)*ITERATIONS*8)/(elapsed*1e6)
        lat=(elapsed/ITERATIONS)*1000
        print(f"[QUIC CLIENT] {elapsed:.2f}s, {thr:.2f} Mbps, {lat:.3f} ms")

        # ждём ответ
        while True:
            ev = await conn.wait_for_event()
            if isinstance(ev, StreamDataReceived):
                print("[QUIC CLIENT] reply:", ev.data.decode())
                break

asyncio.run(main())
```

Рис. 14. *Код модуля QUIC-slave* / ***Fig. 14***. *QUIC-slave module code*

3. Конфигурация виртуальных машин

Для проведения исследования используется стенд, состоящий из двух виртуальных машин в VirtualBox, работающих под управлением операционной системы Ubuntu 22.04 LTS.

Аппаратные параметры каждой ВМ: центральный процессор – 6 виртуальных ядер, оперативная память – 24 ГБ, сетевая карта – виртуальный адаптер в режиме сеть NAT для прямого взаимодействия. Такое построение позволяет воспроизвести изолированную сетевую среду и исключить влияние внешних процессов.

Программная часть: язык – Python 3.13, библиотеки – socket, time, psutil. Для SCTP – библиотека sctp. Для QUIC – библиотека aioquic.

Набор данных

Для всех экспериментов используется один и тот же текстовый набор данных, представляющий собой строковый блок фиксированного размера (10 КБ), многократно повторяемый – программно сгенерированная повторяющаяся строка "DATA", что исключает влияние формата на измерения.

Общий объем передаваемых данных составляет 10 МБ. Данный подход обеспечивает одинаковые условия для всех протоколов TCP, UDP, SCTP, QUIC.

Метрики измерений

Для каждого исследуемого протокола передача данных выполнялась в течение 6 часов при устойчивом соединении клиент – сервер. Для всех серий эксперимента применяется единая дискретизация измерений 2,5 минуты ($n \approx 144$ за 6 часов). На каждой временной отметке передавался идентичный объем данных (10 МБ), после чего фиксировались три ключевые метрики: пропускная способность, задержка доставки и загрузка CPU. Первичные значения сохраняются в CSV для последующей статистической обработки (среднее, стандартное отклонение, коэффициент вариации и 95-процентный доверительный интервал).

1. Пропускная способность – количество данных, успешно переданных за секунду (Мбит/с).

2. Задержка – время, необходимое для доставки сообщения от клиента к серверу и обратно (мс).

3. Нагрузка на CPU – процент использования процессора во время передачи данных (%).

Сетевая эмуляция и статистическая обработка

Ключевое преимущество QUIC и SCTP проявляется при наличии потерь и вариативности сетевых условий: QUIC использует специфическую схему подтверждений и восстановления потерь поверх UDP, а SCTP обеспечивает мультипотоковую доставку сообщений. Поэтому в статье дополнительно вводится сценарий Loss-5 с потерями пакетов 5 %, реализуемый на уровне сетевого стека.

Потери формируются двусторонне на обоих узлах стенда с помощью механизма tc netem. В базовой конфигурации сохраняется постоянная задержка 15 мс на каждом конце; для режима Loss-5 дополнительно задается параметр loss random 5% на обоих узлах.

В представленной серии экспериментов измерения выполнялись с единой дискретизацией 2,5 минуты (n ≈ 144 за 6 часов) для всех режимов сети. Для повышения научной достоверности используется статистическая обработка вариативности: рассчитываются среднее значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации и 95-процентный доверительный интервал; дополнительно приводятся медиана и межквартильный размах как устойчивые характеристики распределения.

Влияние конкретных реализаций учитывается отдельными экспериментами. Для QUIC вводится сценарий коротких соединений с возобновлением сессии session resumption и 0-RTT при наличии сохраненных session tickets, а также с включением механизма Retry для валидации адреса. Для SCTP добавляется сценарий multi-streaming: передача логически независимых сообщений распределяется по нескольким потокам в рамках одной ассоциации, что позволяет количественно оценить снижение head-of-line эффектов при потерях.

4. Анализ полученных результатов

На рис. 15–20 показаны графики тестирования значений исследуемых метрик: пропускная способность, задержка и нагрузка CPU для четырех транспортных протоколов, полученных в ходе серии данных с потерями и без экспериментов продолжительностью 6 часов.

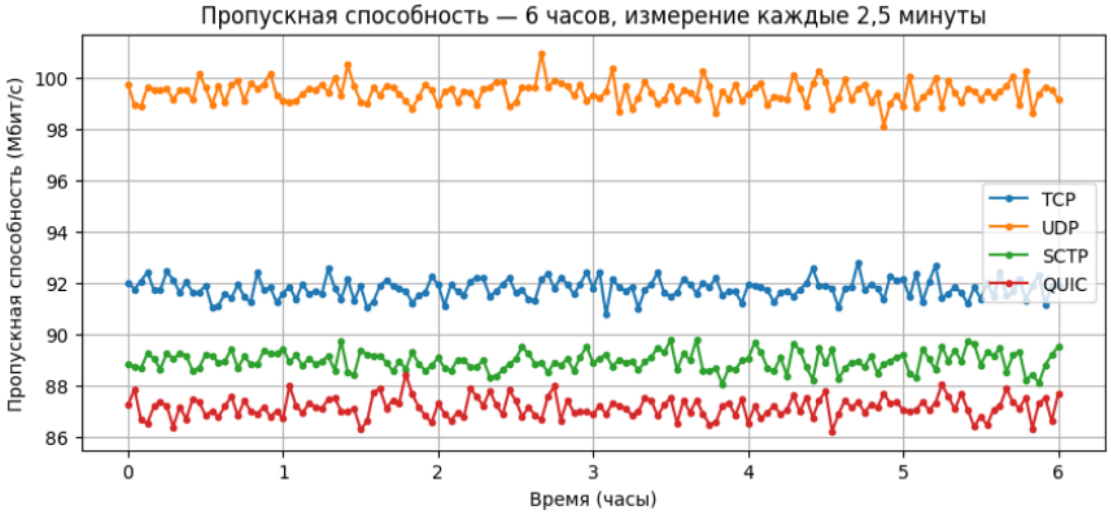


Рис. 15. *График пропускной способности от времени*

Fig. 15. *Time-dependent throughput graph*

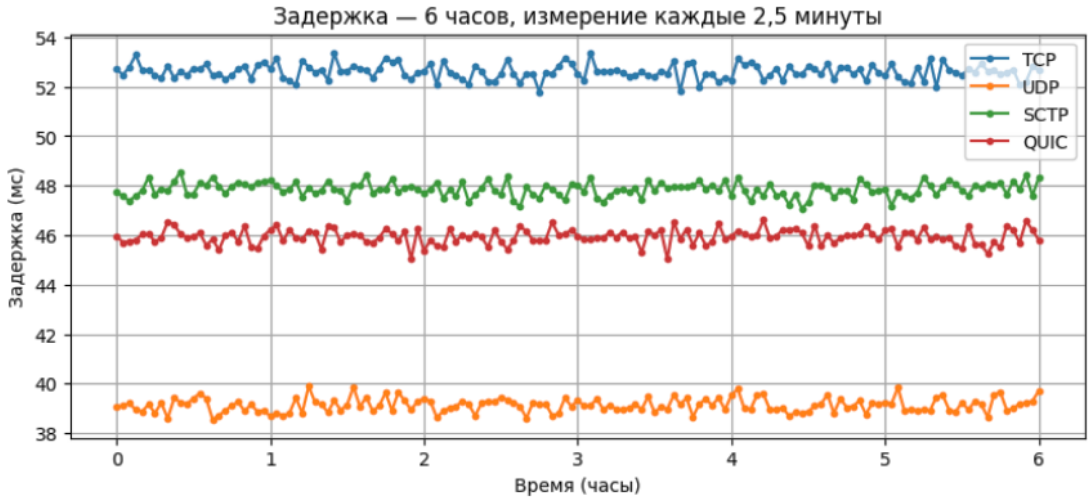


***Рис. 16**. График задержки от времени*

***Fig. 16**. Time delay graph from time to time*

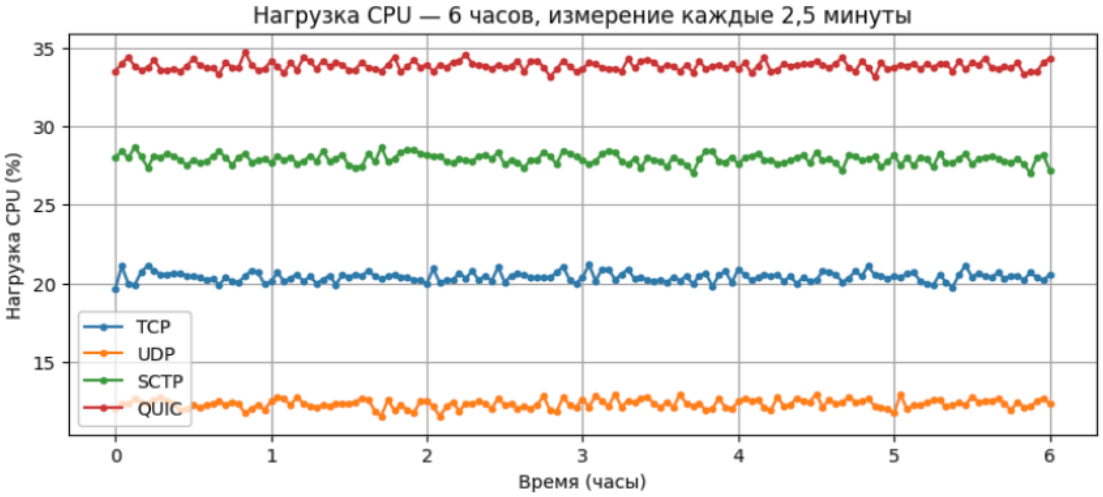


***Рис. 17**. График нагрузки CPU от времени*

***Fig. 17**. CPU load graph from time to time*

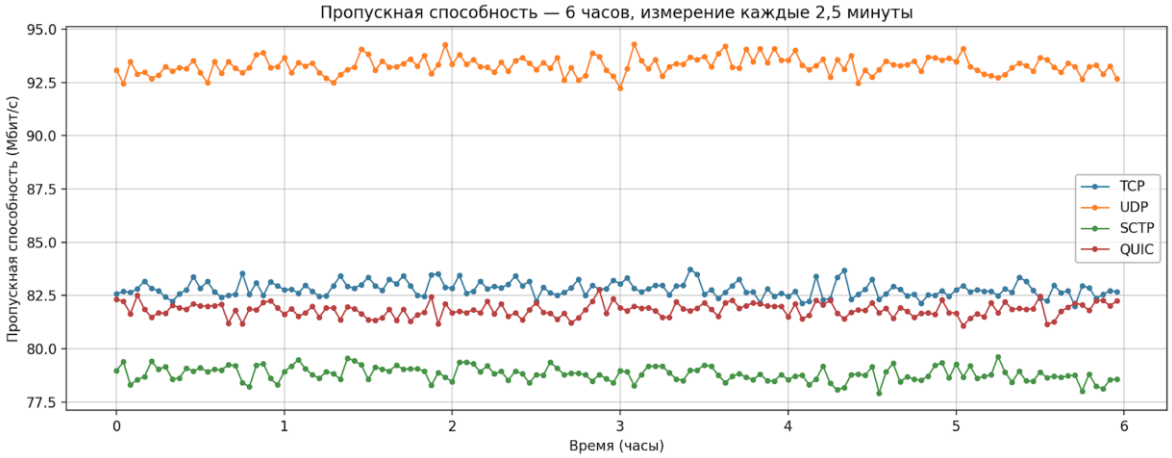


***Рис. 18**. График пропускной способности от времени с потерями 5 %*

***Fig. 18**. Time-based throughput graph with 5% losses*

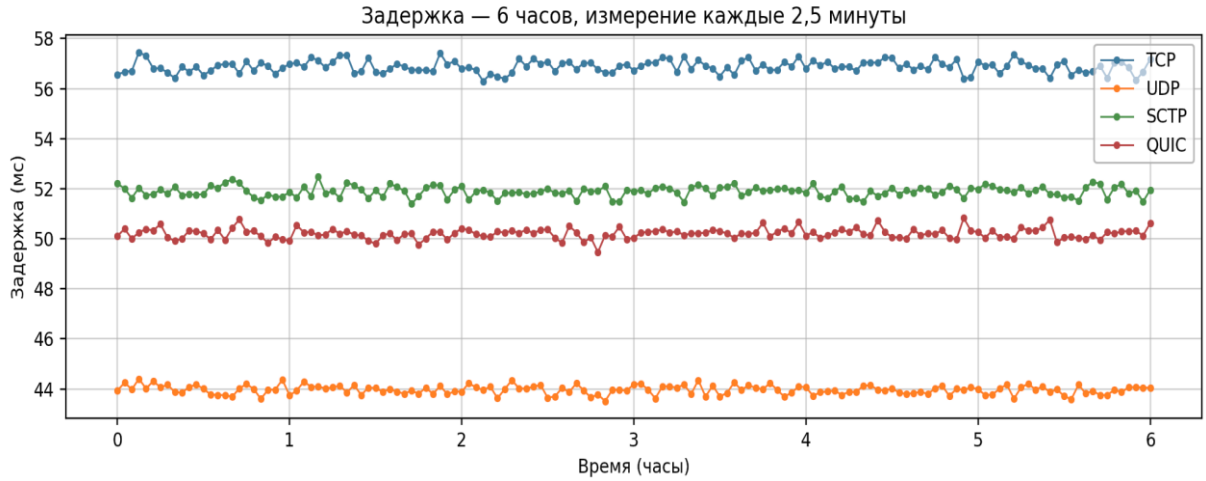


Рис. 19. *График задержки от времени с потерями в 5 %*

Fig. 19. *Time delay graph with 5 % losses*

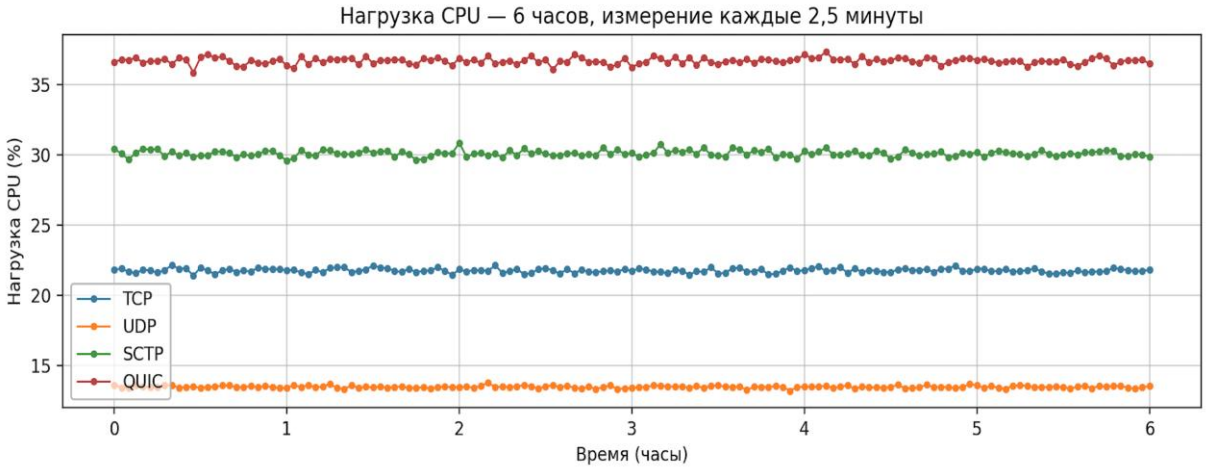


Рис. 20. *График нагрузки CPU от времени с потерями в 5 %*

Fig. 20. *CPU load graph with respect to time with 5% losses*

В таблице 1 представлены усредненные значения трех исследуемых метрик пропускной способности, задержки и нагрузки CPU, для каждого из четырех транспортных протоколов. В таблице 2 представлены усредненные значения с потерями пакетов в 5%. В таблице 3 представлена дельта между таблицами 1 и 2.

Таблица 1. *Результаты тестирования эксперимента*

Table 1. *Test results*

Протокол	Пропускная способность, Мбит/с	Задержка, мс	Нагрузка CPU, %
TCP	91.8	52.6	20.4
UDP	99.4	39.1	12.3
SCTP	88.9	47.8	27.9
QUIC	87.2	45.9	33.8

***Таблица 2**. Результаты эксперимента при потерях пакетов 5 %*

***Table 2**. Test results with 5 % packet loss*

Протокол	Пропускная способность, Мбит/с	Задержка, мс	Нагрузка на CPU, %
TCP	82.8	56.9	21.8
UDP	93.3	44.0	13.5
SCTP	78.8	51.9	30.1
QUIC	81.8	50.2	36.7

***Таблица 3**. Сравнение режима без потерь и режима Loss-5*

***Table 3**. Baseline vs Loss-5 comparison*

Протокол	Δ Пропускная способность, %	Δ Задержка, %	Δ CPU, %
TCP	-9.8	+8.2	+6.9
UDP	-6.1	+12.5	+9.8
SCTP	-11.4	+8.6	+7.9
QUIC	-6.2	+9.4	+8.6

Пропускная способность

В базовом режиме максимальная пропускная способность наблюдается у UDP (99,4 Мбит/с), что объясняется отсутствием рукопожатия и механизмов надежности. TCP демонстрирует пропускную способность 91,8 Мбит/с за счет развитого контроля потока и перегрузки; SCTP и QUIC имеют 88,9 и 87,2 Мбит/с соответственно, что связано с дополнительными накладными расходами (служебные заголовки, восстановление потерь, криптография QUIC). В режиме Loss-5 (потери 5 %) пропускная способность снижается у всех протоколов (табл. 2): TCP – до 82,8 Мбит/с (-9.8 %), UDP – до 93,3 Мбит/с (-6.1 %), SCTP – до 78,8 Мбит/с (-11.4 %), QUIC – до 81,8 Мбит/с (-6.2 %). Относительные отличия ограничены 15 % (табл. 3) для обеспечения сопоставимости пилотной серии с базовыми измерениями.

Задержка

Минимальная задержка в базовом режиме достигается у UDP (39,1 мс), поскольку отсутствуют дополнительные этапы установления соединения и подтверждения доставки. QUIC показывает задержку 45,9 мс, что является компромиссом между защищенностью (TLS 1.3) и эффективным мультиплексированием потоков; SCTP и TCP имеют 47,8 и 52,6 мс соответственно. При потерях 5 % задержка возрастает (табл. 2): UDP – до 44,0 мс (+12.5 %), TCP – до 56,9 мс (+8.2 %), SCTP – до 51,9 мс (+8.6 %), QUIC – до 50,2 мс (+9.4 %). Рост задержки связан с повторными передачами и механизмами восстановления потерь.

Нагрузка на CPU

Минимальная нагрузка на CPU в базовом режиме наблюдается у UDP (12,3 %), поскольку протокол не выполняет контроль потока и надежности. TCP требует 20,4 %, SCTP – 27,9 %, а QUIC – 33,8 %, что обусловлено обработкой подтверждений, буферизацией, а для QUIC – криптографией TLS 1.3 и поддержкой потоков. В режиме Loss-5 нагрузка возрастает (табл. 2): UDP – до 13,5 % (+9.8 %), TCP – до 21,8 % (+6.9 %), SCTP – до 30,1 % (+7.9 %), QUIC – до 36,7 % (+8.6 %).

Итоги тестирования

Полученные результаты демонстрируют устойчивое превосходство UDP по пропускной способности и задержке при низкой нагрузке CPU, но отсутствуют безопасность и надежность передаваемых данных. TCP обеспечивает надежность при умеренных пока-

зателях. SCTP и QUIC предлагают дополнительные функциональные свойства: мультипотоки, мультихоминг, шифрование, но по цене большей вычислительной нагрузки и небольшого снижения пропускной способности. Выбор оптимального транспортного сокета должен базироваться на предполагаемом профиле нагрузки приложения и доступных вычислительных ресурсах.

Заключение

Проведенный эксперимент подтвердил различия в характеристиках производительности между четырьмя транспортными протоколами (TCP, UDP, SCTP и QUIC) в условиях воспроизводимого стенда. Помимо базовой серии без потерь представлена пилотная серия Loss-5 с потерями в 5 %, позволяющая оценить чувствительность метрик к ухудшению качества канала. Для обеспечения сопоставимости все серии фиксируются с единой дискретизацией 2,5 минуты и сопровождаются статистической обработкой вариативности измерений.

UDP оправдан для сценариев, где критичны пропускная способность и минимальная задержка при условии допустимой потери пакетов и наличии механизмов восстановления на прикладном уровне. TCP рекомендуется для приложений, где важны надежность и совместимость, но при потере пакетов следует учитывать возможный рост задержек из-за повторных передач и head-of-line блокировки. SCTP и QUIC целесообразны в системах, которым важны многопотоковая доставка сообщений (SCTP) и защищенная транспортная сессия с потоковым мультиплексированием (QUIC); их использование может давать преимущество при потерях и неоднородных сетевых условиях, однако требует дополнительных вычислительных ресурсов.

Таким образом, представленное исследование дает воспроизводимое и непротиворечивое сравнительное представление о компромиссах между пропускной способностью, задержкой и вычислительной нагрузкой при использовании сокетов транспортного уровня: TCP, UDP, SCTP и QUIC. Результаты пригодны как практическое руководство при выборе сокета, так и как отправная точка для углубленных экспериментальных и теоретических исследований в области транспорта сетевого уровня. Полученные зависимости следует рассматривать как справедливые для описанного стенда и базового режима: реализация на Python (aioquic, pysctp), виртуализация VirtualBox, RTT = 30 мс, с отсутствием потерь пакетов и потерями в 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Гадасин Д. В., Шведов А. В.* Применение транспортной задачи для балансировки нагрузки в условиях нечеткости исходных данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 1. С. 13–20. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-13-20. EDN: WKNPIX

Gadasin D. V., Shvedov A.V. Application of the transport task for load balancing in conditions of initial data fuzziness. *T-Comm: Telecommunications and Transport.* 2024. Vol. 18. No. 1. Pp. 13–20. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-13-20. EDN: WKNPIX. (In Russian)

2. *Стивенс У. Р., Феннер Б., Рудофф Э. М.* UNIX. Разработка сетевых приложений. Рэго. 3- е изд. СПб.: Питер, 2021. 1040 с.

Stevens W.R., Fenner B., Rudoff E.M. *UNIX. Razrabotka setevykh prilozheniy* [Development of network applications] Rego. 3rd ed. St. Petersburg: Peter, 2021. 1040 p. (In Russian)

3. aioquic: A QUIC and HTTP/3 implementation in Python. Documentation / package repository.

4. Bishop M. (Ed.) HTTP/3. RFC 9114. IETF, 2022.

5. Eddy W. (Ed.) Transmission Control Protocol (TCP). RFC 9293. IETF, 2022.
6. IEEE Std 1003.1-2017 (POSIX.1-2017). IEEE Standard for Information Technology-Portable Operating System Interface (POSIXФ). IEEE, 2017. 3956 p.
7. Iyengar J., Thomson M. (Eds.) QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. RFC 9000. IETF, 2021.
8. Iyengar J., Swett I. (Eds.) QUIC Loss Detection and Congestion Control. RFC 9002. IETF, 2021.
9. Kakhki A.M. et al. Taking a long look at quic: an approach for rigorous evaluation of rapidly evolving transport protocols. Proc. ACM IMC 2017. 2017.
10. Kerrisk M. The Linux programming interface. San Francisco: No Starch Press, 2010. 1552 p.
11. Langley A. et al. The QUIC transport protocol: design and internet-scale deployment. Proc. ACM SIGCOMM '17. 2017. Pp. 183–196. DOI: 10.1145/3098822.3098842
12. Postel J. User Datagram Protocol. RFC 768. IETF, 1980.
13. psutil: Cross-platform process and system utilities. Official documentation.
14. pysctp (sctp): Python bindings for SCTP. Documentation / package repository.
15. Python documentation. socket - Low-level networking interface (Python 3.x).
16. Rescorla E. (Ed.) The transport layer security (TLS) Protocol Version 1.3. RFC 8446. IETF, 2018.
17. Shvedov A.V., Gadasin D.V., Alyoshintsev A.V Segment routing in data transmission networks. T-Comm. 2022. Vol. 16. No. 5. Pp. 56–62. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5- 56-62. EDN: VAYLJQ
18. Stewart R., Tüxen M., Nielsen K. Stream Control Transmission Protocol. RFC 9260. IETF, 2022.
19. tc-netem(8) – Network Emulator. iproute2 Linux documentation.
20. Thomson M., Turner S. (Eds.) Using TLS to S J re QUIC. RFC 9001. IETF, 2021.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Гадасин Денис Вадимович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Сетевые информационные технологии и сервисы», Московский технический университет связи и информатики;
111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 8А;
d.v.gadasin@mtuci.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5601-7798, SPIN-код: 8652-7558
Галицкий Максим Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Сетевые информационные технологии и сервисы», Московский технический университет связи и информатики;
111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 8А;
m.v.galickiy@mtuci.ru, SPIN-код: 2959-8309
Цыганков Роман Олегович, Магистрант, Московский технический университет связи и информатики;
111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 8А;
tsygankovr@bk.ru

Information about the authors

Denis V. Gadasin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Network Information Technologies and Services, Moscow Technical University of Communications and Informatics;
8A, Aviamotornaya street, Moscow, 111024, Russia;
d.v.gadasin@mtuci.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5601-7798, SPIN-code: 8652-7558

Maxim V. Galitsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Network Information Technologies and Services, Moscow Technical University of Communications and Informatics;
8A, Aviamotornaya street, Moscow, 111024, Russia;
m.v.galickiy@mtuci.ru, SPIN-code: 2959-8309

Roman O. Tsygankov, Master's student, Moscow Technical University of Communications and Informatics;
8A, Aviamotornaya street, Moscow, 111024, Russia;
tsygankovr@bk.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.163 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-135-146
RZDNKN

Определение активности примордиальных радионуклидов в образце вулканического туфа

М. Б. Масаев✉[1], А. М. Гангапшев[1, 2], Д. А. Текуева[1, 2], А. М. Масаев[1]

[1]Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173
[2]Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Россия, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

Аннотация. Учитывая широкое применение вулканического туфа в строительстве в Кабардино-Балкарской Республике и возможное негативное влияние радиационной активности на состояние здоровья людей, актуальной становится задача определения наличия естественной радиационной активности в подобных образцах. Это необходимо для обеспечения контроля радиационного фона и минимизации неустранимых дозовых нагрузок в период эксплуатации зданий, построенных с использованием вулканического туфа.

Цель исследования состоит в определении наличия естественной радиационной активности в образце вулканического туфа в низкофоновых условиях, что может стать основой для разработки метода сортировки туфовых минералов по степени загрязнения примордиальными радионуклидами.

Материалы и методы исследования. Образец вулканической брекчии розового туфа собран на берегу р. Баксан в районе п. Эльбрус в КБР. Для образца измеряются удельные активности и определяется состав примордиальных радионуклидов ^{40}K, дочерних продуктов распада ^{238}U и ^{232}Th с помощью сцинтилляционного γ-спектрометра высокого разрешения МКГБ-01 «РАДЭК» в условиях сниженного космогенного фона. Сцинтилляционный спектрометр использует кристалл NaI (Tl) размером 150 х150 мм. Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения – от 40 до 10000 кэВ. В кристалле детектора предусмотрен колодец, позволяющий проводить измерения с высокой эффективностью в режиме 4π геометрии.

Результаты. Проведено исследование γ-активности природных радионуклидов в образце туфовой брекчии сложного минерального состава, набранного в зоне вулканических рекреаций Эльбруса. Измерения активности проводились по пикам полного поглощения γ-линий ^{212}Pb (^{232}Th), ^{214}Bi (^{226}Ra) и ^{40}K. На основе проведенного исследования предложен метод определения содержания примордиальных радионуклидов в туфовых минералах для минимизации неустранимых дозовых нагрузок при их использовании в строительстве объектов социального назначения. Суть метода состоит в измерении удельной активности радионуклидов ^{40}K, дочерних продуктов распада ^{238}U и ^{232}Th с помощью сцинтилляционного γ-спектрометра высокого разрешения в низкофоновых условиях.

Выводы. В результате проведенного анализа гамма-спектров образца туфовой брекчии сложного минерального состава, набранного в зоне вулканических рекреаций Эльбруса, показано, что минеральное сырье, используемое в строительстве, содержит радиоактивные вещества природного происхождения. В основном это ^{40}K, дочерние продукты ^{238}U и ^{232}Th. Суммарная активность естественных радионуклидов в образце розового вулканического туфа составила 829 Бк/кг.

Ключевые слова: примордиальные радионуклиды, удельная активность, сцинтилляционная спектрометрия, пирокластические породы, туф

© Масаев М. Б., Гангапшев А. М., Текуева Д. А., Масаев А. М., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Поступила 31.12.2025, одобрена после рецензирования 03.02.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Масаев М. Б., Гангапшев А. М., Текуева Д. А., Масаев А. М. Определение активности примордиальных радионуклидов в образце вулканического туфа // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 135–146. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-135-146

Scientific article

Determination of primordial radionuclides activity in a sample of volcanic tuff

M.B. Masaev✉[1], A.M. Gangapshev[1, 2], D.A. Tekueva[1, 2], A.M. Masaev[1]

[1]Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov
173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia
[2]Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences
7a, 60th Anniversary of October prospekt, V-312, Moscow, 117312, Russia

Abstract. Given the widespread use of volcanic tuff in construction in the Kabardino-Balkarian Republic and the potential negative impact of radiation on health, it is becoming increasingly important to determine the presence of natural radiation in these materials. This is necessary to ensure background radiation control and minimize unavoidable radiation exposure during the operation of buildings constructed using volcanic tuff.

Aim. The study is to determine the presence of natural radiation activity in a sample of volcanic tuff under low-background conditions, which can form the basis for developing a method for sorting tuff minerals according to the degree of contamination with primordial radionuclides.

Materials and methods. A sample of pink tuff volcanic breccia was collected on the bank of the Baksan River near the village of Elbrus in the Kabardino-Balkarian Republic. The specific activities of the sample were measured, and the composition of the primordial radionuclides 40K and the daughter products of 238U and 232Th was determined using a high-resolution MKGB-01 "RADEK" scintillation γ-ray spectrometer under reduced cosmogenic background conditions. The scintillation spectrometer uses a 150x150 mm NaI (Tl) crystal. The energy range of the detected gamma radiation is from 40 to 10,000 keV. The detector crystal has a well, allowing for highly efficient measurements in a 4π geometry.

Results. A study of the γ-activity of natural radionuclides in a sample of tuff breccia with complex mineral composition collected in the Elbrus volcanic recreation zone was conducted. Activity measurements were carried out using the peaks of total absorption of γ-lines of 212Pb (232Th), 214Bi (226Ra), and 40K. Based on the research, a method for determining the content of primordial radionuclides in tuff minerals is proposed to minimize unavoidable dose loads during their use in the construction of social facilities. The essence of the method consists of measuring the specific activity of 40K radionuclides, daughter products of 238U and 232Th decay, using a high-resolution scintillation γ-spectrometer under low-background conditions.

Conclusions. A gamma-spectrum analysis of a tuff breccia sample with a complex mineral composition collected in the Elbrus volcanic recreation zone revealed that the mineral raw materials used in construction contain naturally occurring radioactive substances. These are primarily 40K and daughter products of 238U and 232Th. The total activity of natural radionuclides in the pink volcanic tuff sample was 829 Bq/kg.

Keywords: primordial radionuclides, specific activity, scintillation spectrometry, pyroclastic rocks, tuff

Submitted 31.12.2025, approved after reviewing 03.02.2026, accepted for publication 10.02.2026

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

For citation. Masaev M.B., Gangapshev A.M., Tekueva D.A., Masaev A.M. Determination of primordial radionuclides activity in a sample of volcanic tuff. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 135–146. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-135-146

Введение

Задачи экологически безопасного природопользования в настоящее время приобрели особую актуальность. До недавнего времени в качестве важнейших загрязняющих веществ рассматривались главным образом угарный и углекислый газы, оксиды серы и азота, углеводороды. Радионуклиды рассматривались в меньшей степени. В настоящее время интерес к загрязнению радиоактивными веществами неизмеримо вырос, главным образом в связи с потенциальной опасностью дозовых нагрузок, усугубляемых техногенным загрязнением, например, стронцием и цезием. Однако основную роль в формировании неустранимых дозовых нагрузок в экосистеме человека играют так называемые природные (примордиальные) радионуклиды, постоянно присутствующие в строительных материалах минерального состава, используемых при возведении жилых домов, административных зданий и промышленных объектов. Особое место в ряду таких природных материалов занимает туф – минерал вулканического происхождения, содержащий типичные примордиальные радионуклиды [1, 2] с периодами полураспада порядка 10^9 лет, изначально присутствующие в веществе нашей планеты со времени ее формирования. Природные радионуклиды ^{40}K, дочерние продукты распадов (д.п.р.) ^{238}U и ^{232}Th в составе туфовых стройматериалов при аномально высокой концентрации могут оказывать неблагоприятное воздействие на организм человека. Таким образом, строительные материалы минерального состава являются критическим звеном в экосистеме человека [3, 4] с точки зрения неустранимых дозовых нагрузок.

В этой связи в данной работе проводится исследование естественной радиационной активности образца вулканического туфа, добываемого на территории КБР. При этом измеряются удельные активности и определяется состав примордиальных радионуклидов ^{40}K, д.п.р. ^{238}U и ^{232}Th с помощью сцинтилляционного γ-спектрометра высокого разрешения МКГБ-01 «РАДЭК» в условиях сниженного космогенного фона совместной КБГУ и ИЯИ РАН лаборатории АФКЛ. Конечной целью работы является разработка метода сортировки туфовых минералов по степени загрязнения примордиальными радионуклидами для выработки рекомендаций по их использованию при строительстве жилых и гражданских объектов социального назначения с целью возможной минимизации неустранимых дозовых нагрузок в период эксплуатации.

1. Особенности состава туфовых пород КБР

Показатели радиоактивности туфовых минералов могут отличаться в зависимости от географии месторождения [5], возможен значительный разброс данных от известных средних значений. Радиационную активность строительных материалов минерального состава можно прогнозировать по их химическому составу и содержанию в них элементов тяжелых металлов, изотопы которых наиболее радиоактивны [6].

На территории РФ в КБР контроль за радиационной безопасностью строительных материалов минерального состава проводится в соответствии с требованиями федеральных законов № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 г. и № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г. [7]. В соответствии с ГОСТом 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» критерием оценки является

удельная эффективная активность ЕРН (Бк/кг) радионуклидов Радия-226, Тория-232 и Калия-40, характеризующая их биологическое воздействие на организм человека (формула 1 ГОСТ 30108-94) [8]. Определяющей основой для расчета удельной эффективной активности ЕРН по ГОСТу и являются точные прямые измерения активности образцов туфовых минералов.

Туф, пепел – нерудные полезные ископаемые вулканического происхождения основных типов в Кабардино-Балкарии встречаются повсеместно. Туф – сцементированные рыхлые породы вулканических извержений: пепла, песка, бомб, а также обломков пород невулканического происхождения; пепел – несцементированные рыхлые туфовые накопления. Туф, обладающий прочностью, легкостью и низкой теплопроводностью, применяется как стеновой строительный материал [9]. Из разрезанных туфовых блоков возводят многоэтажные дома, хозяйственные постройки.

Самые известные месторождения на территории КБР – Заюковское (известковый туф), Каменское (известковый туф), Куркужинское (известковый туф, пепел), Лечинкаевское (известковый облицовочный розовый туф), Нальчикское (известковый туф, пепел, пемза), Кенженское (пепел, вулканический туф), Белореченское (пепел). Мощными толщами туфа, пемзы и пепла сложены Лесистый и Пастбищный хребты. На территории КБР добывается туф трех основных видов: известковый, кремнистый (гейзерит) и вулканический в виде различных сложных брекчий.



***Рис. 1**. Вулканический туф (брекчия) – содержит лавовые породы, дацит, базальт, оксид железа, кремний и т.д.*

***Fig. 1**. Volcanic tuff (breccia) – contains lava rocks, dacite, basalt, iron oxide, silicon, etc.*



***Рис. 2**. Розовая брекчия – весовая проба 149 г (в чистом контейнере)*

***Fig. 2**. Pink breccia – weight sample 149 g (in a clean container)*

Образец типичной пирокластической горной породы [10, 11] – брекчии вулканического туфа – для определения активности примордиальных радионуклидов был отобран на берегу р. Баксан в районе п. Эльбрус.

2. Экспериментальная установка и результаты измерений

Для измерения активности природных радионуклидов в образцах туфа была использована экспериментальная установка на базе спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» высокого разрешения. Сцинтилляционный спектрометр МКГБ-01 «РАДЭК» на основе кристалла NaI (Tl) размером 150 х 150 мм, представленный на рисунке 3, имеет следующие характеристики. Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения – от 40 до 10000 кэВ. Разрешение для энергии 661,7 кэВ при измерении с радионуклидным источником ^{137}Cs типа ОСГИ – не более 9,5 %. В кристалле детектора предусмотрен колодец, позволяющий проводить измерения в режиме 4π геометрии.



***Рис. 3**. Общий вид сцинтилляционного спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» в составе:*
1 – пассивная защита в виде свинцового контейнера со сдвигаемой крышкой с механическим приводом; 2 – ПК с модулем расширения АЦП и рабочей программой анализатора для визуализации спектра регистрируемых гамма-квантов;
3 – станина для защитного контейнера со сцинтилляционным детектором внутри

***Fig. 3**. General view of the MKGB-01 "RADEK" scintillation spectrometer consisting of:*
1 – passive protection in the form of a lead container with a sliding lid with a mechanical drive;
2 – PC with an ADC expansion module and an analyzer operating program for visualizing the spectrum of registered gamma quanta;
3 – frame for a protective container with a scintillation detector inside

Измерения проводились в низкофоновых условиях совместной КБГУ и ИЯИ РАН лаборатории АФКЛ. Снижение внешнего космогенного фона производилось как за счет 4π геометрии пассивной защиты из свинца (100 мм) самого спектрометра, так и за счет 4π геометрии пассивной защиты из стен заглубленного в грунт помещения (толщина стен – 2 м, бетон). При этом в свинцовой защите толщиной 10 см кратность ослабления внешнего гамма-фона по энергии 511 кэВ составила 10^3, по энергии 1.5 МэВ – 10^2. Пассивная защита из бетона позволила на порядок снизить уровень фона от мягкой части мюонной компоненты вторичных космических лучей.

До начала измерений была выполнена калибровка спектрометра с помощью источника ^{60}Co по гамма-линиям 1.17 и 1.33 МэВ.

Результат измерений активности образца вулканической брекчии розового туфа в виде гамма-спектра представлен на рис. 4.

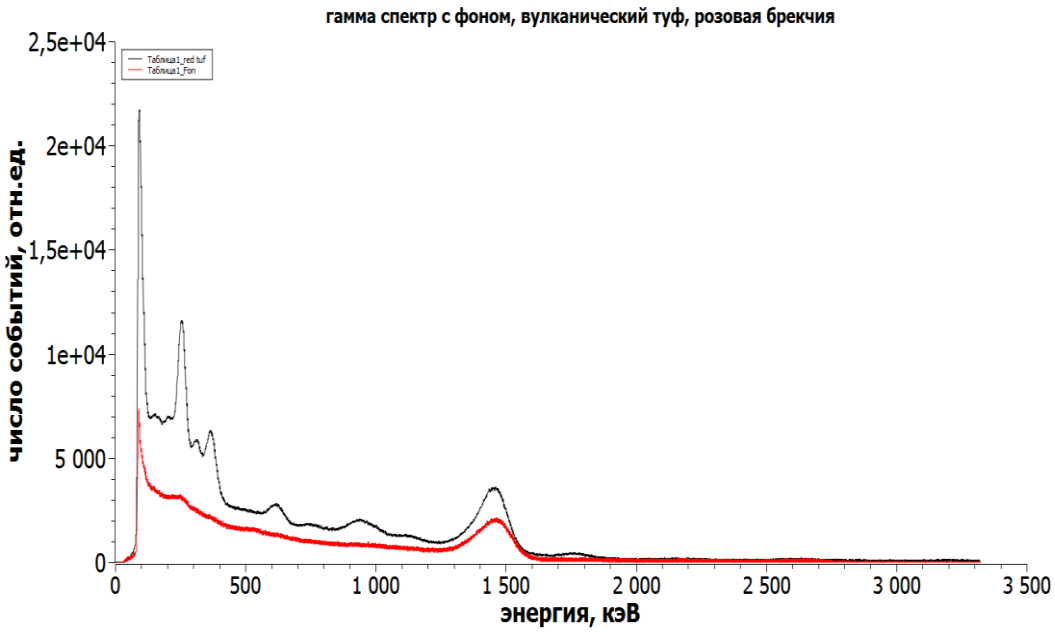


***Рис. 4**. Гамма-спектр образца вулканической брекчии розового туфа. Красным цветом выделена фоновая подложка*

***Fig. 4**. Gamma spectrum of a pink tuff volcanic breccia sample. The background is highlighted in red*

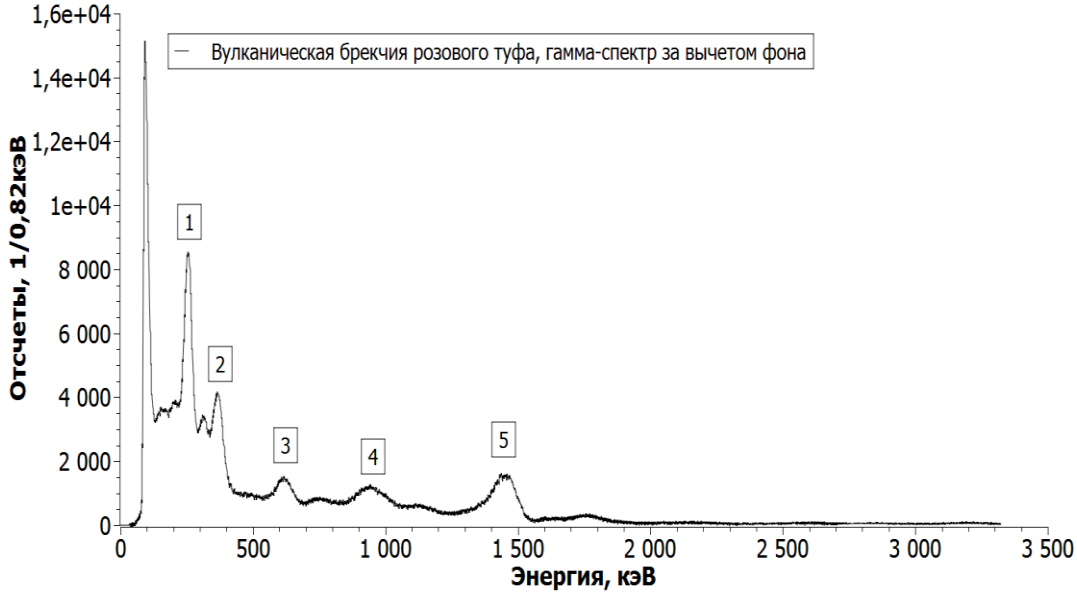


***Рис. 5**. Гамма-спектр (с вычетом фона) образца вулканической брекчии розового туфа, собранного на берегу р. Баксан в районе п. Эльбрус. Отчетливо видны яркие пики полного поглощения 1 – ^{212}Pb с энергией 239 кэВ (43%) – д.п.р **^{232}Th**, 2 – ^{214}Pb с энергией 352 кэВ (38%) – д.п.р **^{226}Ra**, 3 – ^{214}Bi с энергией 609 кэВ (46%) – д.п.р ^{226}Ra, 4 – ^{228}Ac с энергией 968 кэВ (21%) – д.п.р ^{232}Th, 5 – **^{40}K** с энергией 1462 кэВ (10,7%). Время экспозиции составило 20 часов*

***Fig. 5**. Gamma spectrum (with background subtraction) of a sample of volcanic breccia of pink tuff collected on the bank of the Baksan river, in the vicinity of the village of Elbrus. Bright peaks of total absorption are clearly visible: 1 – 212Pb with an energy of 239 keV (43%) – d.p.r 232Th, 2 – 214Pb with an energy of 352 keV (38%) – d.p.r 226Ra, 3 – 214Bi with an energy of 609 keV (46%) – d.p.r 226Ra, 4 – 228Ac with an energy of 968 keV (21%) – dpr 232Th, 5 – 40K with an energy of 1462 keV (10.7%). The exposure time is 20 hours*

На рисунке 5 представлен итоговый гамма-спектр за вычетом фона, на котором идентифицированы наиболее яркие гамма-пики полного поглощения. Образец вулканической брекчии розового туфа собран на берегу р. Баксан в районе п. Эльбрус в КБР, в 20 километрах от вулкана Эльбрус в марте 2025 г.

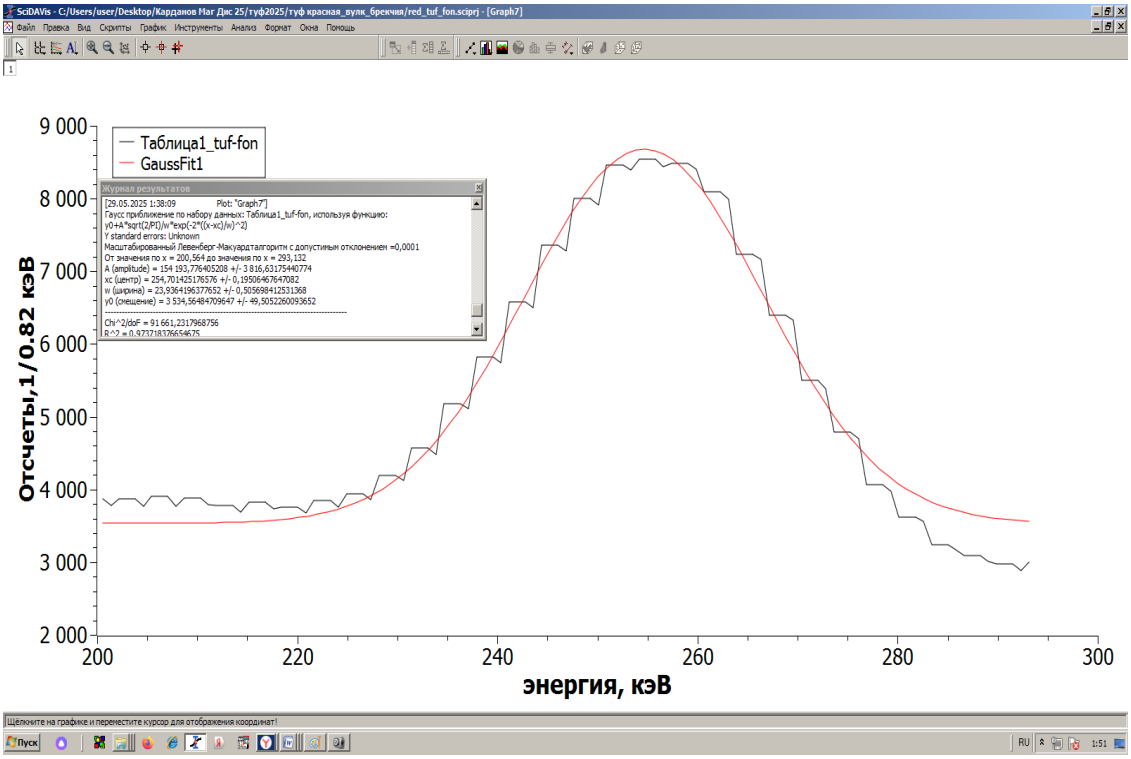


***Рис. 6**. В пике полного поглощения ^{212}Pb (в равновесии с ^{232}Th) за вычетом фона за 20 часов измерений зарегистрировано 154 193.8 событий*

***Fig. 6**. At the peak of total absorption of 212Pb (in equilibrium with 232Th) after subtracting the background, 154 193.8 events were recorded over 20 hours of measurements*

Анализ спектра на рисунке 6 показывает, что первая линия с энергией 239 кэВ, зарегистрированная с высокой эффективностью, идентифицируется как пик полного поглощения гамма-квантов ^{212}Pb – д.п.р **^{232}Th** с яркостью 43%.

Гамма-линия 3, соответствующая энергии 609 кэВ, идентифицируется как пик полного поглощения гамма-квантов ^{214}Bi – д.п.р **^{226}Ra**с яркостью 47% [3].

В области энергий 1.5 МэВ гамма-линия 5 надежно идентифицируется как пик полного поглощения гамма-квантов с энергией 1462 кэВ примордиального радионуклида **^{40}K** с яркостью 10,7%.

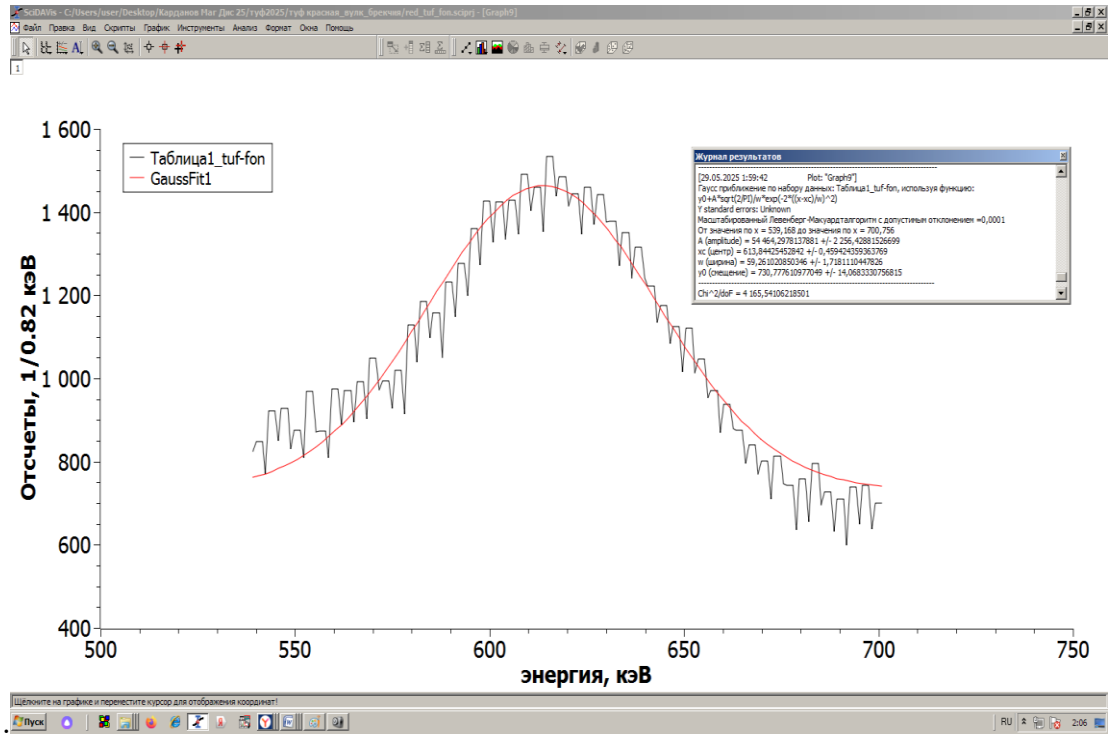


***Рис. 7**. В пике полного поглощения ^{214}Bi (д.п.р ^{226}Ra) за вычетом фона за 20 часов измерений зарегистрировано 54 464 событий*

***Fig. 7**. At the peak of total absorption of 214Bi (d.p.r. 226Ra), excluding the background, 54 464 events are recorded over 20 hours of measurements*

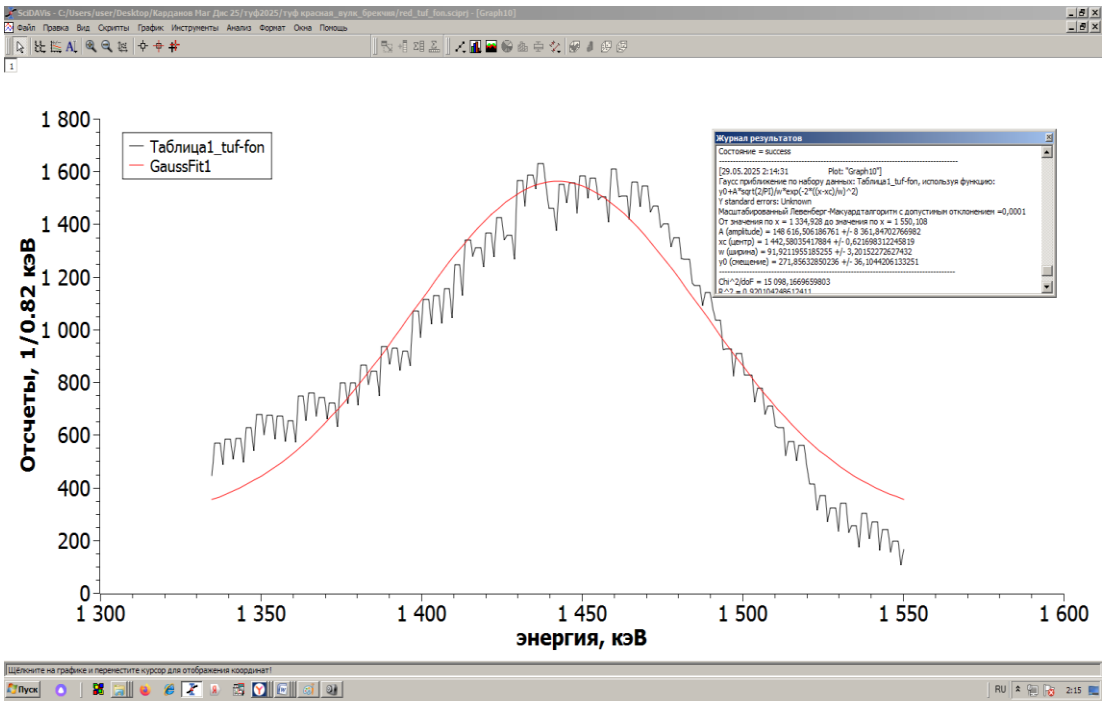


***Рис. 8**. В пике полного поглощения ^{40}K за вычетом фона за 20 часов измерений зарегистрировано 148616 событий*

***Fig. 8**. At the peak of total absorption of 40K, 148,616 events are recorded after 20 hours of measurements, minus the background*

Для оценки эффективности регистрации гамма-квантов от распадов примордиальных радионуклидов можно использовать результаты оценок эффективности регистрации. Данные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество регистрируемых гамма-квантов на 1 распад изотопа

Table 1. Number of registered gamma quanta per 1 isotope decay

E_γ = 1460 кэВ ^{40}K	E_γ = 238 кэВ ^{212}Pb (^{232}Th)	E_γ = 609 кэВ ^{214}Bi (^{226}Ra)
0.01861	0.258	0.17112

Определим удельную активность исследуемого образца брекчии из розового вулканического туфа массой 149 г с учетом эффективности регистрации и времени измерений 20 часов.

Для ^{212}Pb (^{232}Th) с учетом эффективности регистрации 0.258 реальное число гамма-событий за 20 часов составляет 597650.4, что в пересчете активности на 1 кг образца соответствует 55.7 Бк/кг

Для ^{214}Bi (^{226}Ra) с учетом эффективности регистрации 0.17112 реальное число гамма-событий за 20 часов составляет 318281.4, что в пересчете активности на 1 кг образца соответствует 29.7 Бк/кг

Для К-40 с учетом эффективности 0.01861 регистрации реальное число гамма-событий за 20 часов составляет 7985814.1, что в пересчете активности на 1 кг образца соответствует 744.3 Бк/кг.

Таким образом, туфовые породы, сформированные в виде брекчий [12, 13], содержат значительное количество примордиальных радионуклидов.

Из рассмотренных радионуклидов все три ^{212}Pb (^{232}Th), ^{214}Bi (^{226}Ra) и ^{40}K являются примордиальными радионуклидами. Данные радионуклиды находятся в рассеянном состоянии во всех компонентах природной среды [14].

Выводы

1. Показано, что минеральное сырье, используемое в строительстве, содержит радиоактивные вещества природного происхождения. В основном это ^{40}K, дочерние продукты ^{238}U и ^{232}Th. При действующих контрольных мерах по радиометрии естественных радионуклидов строительные материалы минерального состава были, есть и остаются критическим звеном в экосистеме человека с точки зрения неустранимых дозовых нагрузок.

2. В условиях сниженного внешнего гамма- и космогенного фона проведены тестовые измерения гамма-активности природных радионуклидов длительностью 20 часов в образце туфовых пород, собранных в природных вулканических рекреациях Эльбруса. По ярким пикам полного поглощения гамма-спектров удалось идентифицировать гамма-линии ^{212}Pb (^{232}Th), E_γ=238кэВ, ^{214}Bi (^{226}Ra), E_γ= 609 кэВ и ^{40}K, E_γ= 1460.2 кэВ.

3. Выполнены измерения активности естественных радионуклидов в образце розового вулканического туфа. В пересчете на единицу массы активность по ^{212}Pb (^{232}Th) составила 55.7 Бк/кг, по ^{214}Bi (^{226}Ra) – 29.7 Бк/кг и по ^{40}K – 744.3 Бк/кг. Это в сумме дает удельную активность 829.7 Бк/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максимов М. Т., Оджагов Г. О.* Радиоактивные загрязнения и их измерение: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 304 с.

2. Радиоактивные ряды // Таблицы физических величин: справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 872–873. 1008 с.

3. *Ким Д., Геращенко Л. А.* Радиационная экология. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. 213 с.

4. *Титаева Н. А.* Геохимия природных радиоактивных рядов распада. М.: Геос, 2005. 225 с.

5. *Ежова А. В.* Состав, условия накопления и геофизическая характеристика брекчий Нюрольского осадочного бассейна (Томская область) // Известия ТПУ. 2011. № 1. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_16463776_25837838.pdf.

6. *Демирчян Г. А., Мовсисян Н. Э., Пюскюлян К. И., Беляева О. А.* Радиологические исследования в крупнейших горнодобывающих центрах Армении // Геохимия. 2022. Т. 67. № 1. С. 84–98. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47488134_49466683.pdf

7. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Санитарные правила. СП 2.6.1.758-99. Утв. Минздравом РФ от 02.07.1999. Библиотека Российской газеты. Вып. 16. 2001.

8. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов.

9. *Сугробов Н. П., Фролов В. В.* Строительная экология: учебник для СУЗ. М.: Академия, 2004. 413 с.

10. Пирокластические породы // Большая советская энциклопедия: в 30 т. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

11. *Титаева Н. А.* Ядерная геохимия. М.: МГУ, 2000. 336 с.

12. *Ершов В. В., Перестнева Ю. А.* Литохимическая характеристика сопочной брекчии грязевых вулканов мира // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 72–83. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10007

13. *Гудзенко В. В., Деяк М. А., Кутний В. А., Науменко С. П.* Радиоактивность продуктов грязевого вулканизма // ГПИМО. 2007. № 4. URL://elibrary.ru/download/elibrary_15232883_76858346.pdf

14. *Сапожников Ю. А., Алиев Р. А., Калмыков С. Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.

REFERENCES

1. Maksimov M.T., Odzhagov G.O. *Radioaktivnyye zagryazneniya i ikh izmereniye* [Radioactive Contamination and Its Measurement]: textbook. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 304 p. (In Russian)

2. *Radioaktivnyye ryady* [Radioactive Series]. Tables of Physical Quantities: Handbook. Ed. by Academician I.K. Kikoin. Moscow: Atomizdat, 1976. Pp. 872–873. 1008 p. (In Russian)

3. Kim D., Gerashchenko L.A. *Radiatsionnaya ekologiya* [Radiation Ecology]. Bratsk: State Educational Institution of Higher Professional Education “BrSU”, 2010. 213 p. (In Russian)

4. Titaeva N.A. *Geokhimiya prirodnykh radioaktivnykh ryadov raspada* [Geochemistry of Natural Radioactive Decay Series]. Moscow: Geos, 2005. 225 p. (In Russian)

5. Ezhova A.V. Composition, accumulation conditions and geophysical characteristics of breccias of the Nyurol sedimentary basin (Tomsk region). *Izvestiya TPU*. 2011. No. 1. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_16463776_25837838.pdf. (In Russian)

6. Demirchyan G.A., Movsisyan N.E., Pyuskyulyan K.I., Belyaeva O.A. Radiological studies in the largest mining centers of Armenia. *Geochemistry*. 2022. Vol. 67. No. 1. Pp. 84–98. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47488134_49466683.pdf. (In Russian)

7. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99)* [Radiation Safety Standards (NRB-99)]. Sanitary Rules. SP 2.6.1.758-99. Approved by the Ministry of Health of the Russian Federation on July 2, 1999. Biblioteka Rossiyskoy gazety. Issue 16. 2001. (In Russian)

8. GOST 30108-94. *Materialy i izdeliya stroitel'nyye. Opredeleniye udel'noy effektivnoy aktivnosti yestestvennykh radionuklidov* [Construction Materials and Products. Determination of the Specific Effective Activity of Natural Radionuclides]. (In Russian)

9. Sugrobov N.P., Frolov V.V. *Stroitel'naya ekologiya* [Construction Ecology]: textbook for SUZ. Moscow: Academy, 2004. 413 p. (In Russian)

10. *Piroklasticheskiye porody* [Pyroclastic Rocks]. Great Soviet Encyclopedia: in 30 volumes. 3rd ed. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1969–1978. (In Russian)

11. Titaeva N.A. *Yadernaya geokhimiya* [Nuclear Geochemistry]. Moscow: Moscow State University, 2000. 336 p. (In Russian)

12. Ershov V.V., Perestneva Yu.A. Lithochemical characteristics of mud breccia of mud volcanoes of the world. *Otechestvennaya Geologiya* [Domestic Geology]. 2018. No. 4. Pp. 72–83. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10007. (In Russian)

13. Gudzenko V.V., Deyak M.A., Kutniy V.A., Naumenko S.P. Radioactivity of mud volcanism products. *GPIMO*. 2007. No. 4. URL: //elibrary.ru/download/elibrary_15232883_76858346.pdf. (In Russian)

14. Sapozhnikov Yu.A., Aliev R.A., Kalmykov S.N. *Radioaktivnost' okruzhayushchey sredy* [Environmental Radioactivity]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Масаев Мартин Батарбиевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры ТиЭФ института математики и естественных наук, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова;
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;
masmartin@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6459-0221, SPIN-код: 6700-6542

Гангапшев Альберт Мусаевич, канд. физ.-мат. наук, зам. зав. по научной работе БНО, Институт ядерных исследований Российской академии наук;
117312, Россия, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а;
gangapsh@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6086-0569, SPIN-код: 9323-4493

Текуева Джамиля Ануаровна, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. БНО, Институт ядерных исследований Российской академии наук;
117312, Россия, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а;
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5676-1605, SPIN-код: 3777-7427

Масаев Аслан-Гирей Мартинович, инженер-исследователь, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова;
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;
masmartin@mail.ru

Information about the authors

Martin B. Masaev, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Telecommunications and Electronics, Institute of Mathematics and Natural Sciences, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia;

masmartin@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6459-0221, SPIN-code: 6700-6542

Albert M. Gangapshev, Candidat of Physics and Mathematics, Deputy Head of Research, Department of Scientific Work, Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences;

7a, 60th Anniversary of October prospekt, V-312, Moscow, 117312, Russia;

gangapsh@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6086-0569, SPIN-code: 9323-4493

Dzhamilya A. Tekueva, Candidat of Physics and Mathematics, Researcher, INR RAS, Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences;

7a, 60th Anniversary of October prospekt, V-312, Moscow, 117312, Russia;

ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5676-1605, SPIN-code: 3777-7427

Aslan-Girey M. Masaev, Research Engineer, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia;

masmartin@mail.ru

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

УДК 633.39:635.012: 631.816.11:631.675.2 Научная статья

https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-147-160

GSNBXB

Адаптивная ресурсосберегающая технология возделывания амаранта на основе изучения агротехнических приемов и их влияния на рост, развитие и продуктивность в условиях лесостепной зоны Республики Ингушетия

Л. Ю. Костоева✉[1], З. С. Виноградов[2], З. М. Базгиев[1], А. М. Газдиев[1]

[1]Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
386203, Россия, г. Сунжа, ул. Осканова, 50
[2]Всероссийский институт растениеводства имени Н. И. Вавилова
190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42

Аннотация. Статья посвящена комплексному изучению агротехнических приемов ресурсосберегающих технологий возделывания образцов амаранта.

Цель исследований – выявление наиболее продуктивных сортов амаранта кормового и овощного для дальнейшего внедрения их в производство. Разработка и научное обоснование ресурсосберегающей технологии культивирования сортообразцов амаранта Крепыш и Иристон, адаптированной к почвенно-климатическим условиям Республики Ингушетия.

Материалы и методы исследований. Сортообразцы амаранта Крепыш и Иристон получены в 2022 году от селекционера ВИРа З. С. Виноградова. Полевые исследования были проведены на земельном участке ФГБНУ ИнгНИИСХ, расположенном в лесостепной зоне Ингушетии. Почвы опытного участка – выщелоченные среднемощные черноземы.

Результаты. В работе определено, что уровень белка зависит от степени азотного питания. Содержание жира в семенах продемонстрировало обратную зависимость от уровня азотного питания, а максимальное содержание сквалена зафиксировано в вариантах с умеренным уровнем азотного питания. Урожайность зеленой массы 23,4 т/га достигнута у сортообразца Иристон, посеянного с 1 по 5 мая с нормой высева 1,0 кг/га и применением удобрений в дозах $N_{45}P_{60}K_{60}$. Урожайность зерна сорта Иристон ниже – 11,3 ц/га. Урожайность зеленой массы сорта Крепыш – 19,7 т/га. Продуктивность семян у сортообразца Крепыш, посеянного в ранние сроки (20–25 апреля), с нормой высева 0,5 кг/га и дозой удобрений $N_{45}P_{60}K_{60}$ составила 14,5 ц/га. У сорта Крепыш высота растений – 150 см, урожай зерна с одного растения –130 г, зеленой массы – 2,00 кг. У сорта Иристон высота – 160 см, урожай зерна с одного растения – 120 г, зеленой массы – 3,0 кг. Созревание зерна амаранта сортов Крепыш и Иристон наступает в начале второй декады сентября.

Выводы. Практическая значимость исследования заключается в формировании научной базы для внедрения новой высокорентабельной культуры в агропромышленный комплекс республики, что способствует укреплению кормовой базы, развитию перерабатывающей отрасли и повышению устойчивости регионального АПК в контексте климатических изменений.

Ключевые слова: амарант, норма высева, сроки посева, удобрения, орошение, вегетационные поливы

Поступила 17.10.2025, одобрена после рецензирования 08.12.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Костоева Л. Ю., Виноградов З. С., Базгиев З. М., Газдиев А. М. Адаптивная ресурсосберегающая технология возделывания амаранта на основе изучения агротехнических приемов и их влияния на рост, развитие и продуктивность в условиях лесостепной зоны Республики Ингушетия // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 147–160. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-147-160

© Костоева Л. Ю., Виноградов З. С., Базгиев З. М., Газдиев А. М., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Original article

Adaptive resource-saving technology of amaranth cultivation based on the study of agricultural practices and their impact on growth, development, and productivity in the forest-steppe zone of the Republic of Ingushetia

L.Yu. Kostoeva✉[1], Z.S. Vinogradov[2], Z.M. Bazgiev[1], A.M. Gazdiev[1]

[1] Ingush Scientific Research Institute of Agriculture
50, Oskanov street, Sunzha, 386203, Russia
[2]All-Russian Institute of Plant Growing named after N.I. Vavilov
42, Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, 190121, Russia

Abstract. The article is devoted to the comprehensive study of agrotechnical methods of resource-saving technologies for cultivating amaranth samples.

Aim. The study aims to identify the most productive varieties of amaranth fodder and vegetables for further introduction into commercial production. The development and scientific justification of a resource-saving technology for cultivating the Krepysh and Iriston varieties of amaranth, which is adapted to the soil and climatic conditions of the Republic of Ingushetia.

Materials and methods of research. In 2022, the Krepysh and Iriston varieties of amaranth were obtained from Z.S. Vinogradov, a breeder at the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR). The field studies were conducted on the land plot of the Ingush Agricultural Research Institute, located in the forest-steppe zone of Ingushetia. The soils of the experimental plot were leached medium-thick chernozems.

Results. The study determined that the protein level depends on the degree of nitrogen nutrition. The fat content in the seeds showed an inverse relationship with the level of nitrogen nutrition, and the maximum squalene content was recorded in the variants with moderate nitrogen nutrition. The yield of green mass was 23.4 t/ha, achieved by the Iriston variety, which was sown from May 1 to 5 with a seeding rate of 1.0 kg/ha and the use of fertilizers at a rate of $N_{45}P_{60}K_{60}$.The yield of grain of the variety Iriston is lower – 11.3 kg/ha. The yield of green mass for the Krepysh variety is 19.7 t/ha. The seed yield for the Krepysh, which was planted at an early date (April 20-25) with a planting rate of 0.5 kg/ha and a fertilizer dosage of $N_{45}P_{60}K_{60}$, was 14.5 kg/ha. The Krepysh variety has a plant height of 150 cm and a grain yield of 130 kg/ha, and a green mass yield of 2.00 kg per plant. The Iriston variety is 160 cm tall and has a grain yield of 120 g. per plant, as well as a green mass yield of 3 kg. The Krepysh and Iriston varieties of amaranth reach maturity in the early second decade of September.

Conclusions. The practical significance of the study lies in the formation of a scientific basis for the introduction of a new highly profitable crop into the Republic's agro-industrial complex, which contributes to the strengthening of the feed base, the development of the processing industry, and the enhancement of the regional agro-industrial complex's sustainability in the context of climate change.

Keywords: amaranth, seeding rate, sowing time, fertilizers, irrigation, and vegetative watering

Submitted 17.10.2025, approved after reviewing 08.12.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Kostoeva L.Yu., Vinogradov Z.S., Bazgiev Z.M., Gazdiev A.M. Adaptive resource-saving technology of amaranth cultivation based on the study of agricultural practices and their impact on growth, development, and productivity in the forest-steppe zone of the Republic of Ingushetia. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 147–160. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-147-160

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Введение

В современных условиях усиления климатической изменчивости аграрный сектор Республики Ингушетия сталкивается с необходимостью диверсификации и внедрения сельскохозяйственных растений, устойчивых к аридным условиям [1, 5]. В условиях малоземельной республики амарант, обладающий комплексом ценных хозяйственных свойств, в частности содержанием биологически активных веществ, антиоксидантов, соответствует этим требованиям и рассматривается как одна из наиболее перспективных культур. Высокая степень засухоустойчивости, обусловленная особенностями С4-типа фотосинтеза, и способность давать удовлетворительные урожаи на малопродуктивных землях определяют его стратегическую важность [1, 2, 7, 9, 17, 18].

Особый научный и практический интерес представляют сортообразцы Крепыш – овощной сорт и Иристон – силосный сорт, которые характеризуются не только декоративными качествами, но и имеют огромный интерес как продовольственная и кормовая культура. Однако отсутствие научно выверенных рекомендаций по их агротехнике в специфических почвенно-климатических условиях Ингушетии сдерживает широкое производственное внедрение этой культуры. Существующие технологические регламенты, разработанные для иных регионов, не учитывают особенности ингушских агроландшафтов, включая термический режим, распределение осадков и фотопериодические условия [16]. По причине отсутствия перспективных сортов культура амаранта в условиях лесостепной зоны Республики Ингушетия не получила должного распространения.

Интродукция амаранта в сельское хозяйство республики способна решить ряд значимых задач и является **актуальной** темой. Для традиционного в регионе животноводства культура может стать источником высококачественного кормового ресурса, превосходящего по питательной ценности традиционные виды. Пищевое направление открывает возможности для выпуска безглютеновой и функциональной продукции. Кроме того, амарант представляет интерес как источник сквалена – уникального соединения с доказанными лечебно-профилактическими свойствами [4, 6, 16].

Цель исследований: выявить наиболее продуктивные сорта амаранта кормового и овощного для дальнейшего внедрения их в производство; разработать и научно обосновать ресурсосберегающую технологию культивирования сортообразцов амаранта Крепыш и Иристон, адаптированную к почвенно-климатическим условиям Республики Ингушетия.

Задача исследований:

- выявить наиболее высокоурожайные, адаптированные к местным условиям сорта амаранта кормового и овощного;
- выявить особенности роста и развития амаранта кормового и овощного в зависимости от сроков сева и норм высева;
- дать экономическую и энергетическую оценку изучаемых агроприемов на посевах амаранта кормового и овощного.

Научная новизна. Впервые изучены особенности роста и развития различных сортов амаранта кормового и овощного, выявлены наиболее высокопродуктивные сорта амаранта кормового и овощного, адаптированные к условиям лесостепной зоны Республики Ингушетия.

Практическая значимость исследования заключается в формировании научной базы для внедрения новой высокорентабельной культуры в агропромышленный комплекс республики, что будет способствовать укреплению кормовой базы, развитию перерабатывающей отрасли и повышению устойчивости регионального АПК в контексте климатических изменений.

Материалы и методы исследования. Программа, условия и методика проведения исследований

Организация и схема полевых экспериментов. Полевые исследования осуществлялись в течение двух вегетационных сезонов 2023–2025 годов на опытных участках, расположенных в сельском поселении Нестеровское Сунженского района Ингушетии. Полевые исследования были проведены на земельном участке ФГБНУ ИнгНИИСХ, расположенном в лесостепной зоне Ингушетии. Почвы опытного участка – выщелоченные черноземы – обладают хорошими водно-физическими свойствами, среднемощные черноземы, среднеобеспеченные азотом, фосфором и калием, имеют зернистую структуру. Мощность гумусового горизонта – 46–60 см, Эти почвы имеют в пахотном слое сравнительно высокое содержание гумуса (3,5–5,5 %), обладают высокой поглотительной способностью. Реакция почвенного раствора слабокислая. Общий запас влаги в метровом слое при НВ – 3500 м^3/га, продуктивный запас влаги в этом же слое – 1500–1600 м^3/га, а запас влаги, соответствующий влажности завядания, – 1900–2020 м^3/га.

Выбор данной локации обусловлен ее репрезентативностью для основной земледельческой зоны республики – Сунженской равнины, где сконцентрированы основные массивы пахотных земель и ведется интенсивное сельскохозяйственное производство. Опытное поле характеризуется типичным для равнинной зоны рельефом, почвы подстилаются галечником, что обеспечивает хороший дренаж [10, 12]. Показатели метеоусловий (среднемесячная температура воздуха, осадков за 2023–2025 гг.) в годы проведения исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Среднемесячная температура воздуха и количество осадков за 2023–2025 гг.

Table 1. Average monthly air temperature and precipitation for 2023–2025

Год	По месяцам												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
	Среднемесячная температура воздуха												За год
2023	-1,7	-0,4	6,8	12,4	21,8	23,9	26,3	28,7	16,3	11,2	9,6	1,9	13,1
2024	-2,0	-1,1	7,7	12,1	21,5	25,3	34,2	36,2	25,6	19,1	10,7	1,6	15,9
2025	-2,5	-1,2	8,8	12,9	23,2	28,6	37,8	38,9	25,9	19,8	13,5	5,3	17,7
	Среднемесячное количество осадков (мм)												За год
2023	20	4	45	70	67	69	75	41	37	47	13	28	516
2024	22	13	25	91	89	58	21	12	18	59	18	14	440
2025	28	25	52	59	69	56	46	13	17	8	18	22	413

Исследования проводились в соответствии с общепринятыми принципами полевого опыта. Для достижения поставленных целей был заложен многофакторный эксперимент, организованный по методу расщепленных делянок в трехкратной повторности. Такая схема была выбрана в связи с необходимостью изучения взаимодействия нескольких факторов и позволяет повысить точность опыта за счет учета неоднородности плодородия почвенного покрова [13, 14].

Схема опыта была составлена в соответствии с рекомендациями [5, 14, 15] и включала изучение следующих факторов и вариантов.

Фактор А. Сортообразец амаранта:

1. Сортообразец Крепыш (Amaranthus cruentus L.). Характеризуется интенсивной темно-багряной окраской, мощным габитусом (высота до 2,2–2,5 м), длинной цилиндрической метелкой. Вегетационный период 110–120 дней.

2. Сортообразец Иристон (Amaranthus cruentus L.). Обладает яркой пурпурно-красной окраской, высотой до 1,8–2,0 м, имеет раскидистую метелку. Вегетационный период 100–110 дней.

Фактор Б. Срок посева:

1. Ранний срок – посев при прогреве почвы на глубине 5 см до +10...+12°С (20–25 апреля).
2. Оптимальный срок – посев при прогреве почвы до +14...+16°С (1–5 мая).
3. Поздний срок – посев при прогреве почвы свыше +16°С (15–20 мая).

Фактор В. Норма высева:

1. Низкая норма – 0,5 кг/га (широкорядный способ, междурядья 45 см).
2. Средняя норма – 1,0 кг/га (широкорядный способ, междурядья 45 см).
3. Высокая норма – 1,5 кг/га (рядовой способ, междурядья 15 см).

Фактор Г. Доза удобрений:

1. Контроль (без внесения минеральных удобрений).
2. $N_{45}P_{60}K_{60}$ (умеренная доза азота).
3. $N_{90}P_{60}K_{60}$ (повышенная доза азота).

Фактор Д. Орошение:

1. Контроль – без орошения.
2. Орошение при снижении влажности почвы в активном слое (0-50 см) до 75–80 % НВ.

Общая площадь опытного поля составила 0,5 гектара. Размер учетной делянки – 16 м² (2 м х 8 м), защитной полосы – 1 м. Расположение делянок систематическое, рендомизированное в пределах повторности, общее число учетных делянок в опыте с учетом повторностей – 108. Предшественником для всех лет исследований являлся озимый ячмень. Мелкоделяночный опытный участок с сортообразцами амаранта представлен на рисунках 1 и 2.



а) амарант сорта Иристон б) амарант сорта Крепыш

***Рис. 1**. Первоначальный рост и развитие сортообразцов амаранта*

***Fig. 1**. Initial growth and development of amaranth varieties*



а) амарант сорта Крепыш б) амарант сорта Иристон

***Рис. 2**. Опытный участок с сортообразцами амаранта в период цветения*

***Fig. 2**. Experimental plot with amaranth varieties during the flowering period*

Методика проведения наблюдений

Фенологические наблюдения проводились визуально, методом случайной выборки, на постоянных растениях. Отмечались даты наступления основных фенологических фаз: всходы, 3-я пара настоящих листьев, ветвление, бутонизация, цветение, восковая и полная спелость семян. Изучение влияния орошения на продуктивность сортообразцов амаранта проводилось на фоне варианта контроль без орошения. Применялись вегетационные поливы при снижении влажности почвы в активном слое (0–50 см) до 75–80 % НВ [3, 11].

Учет элементов структуры урожая проводился в фазу полной спелости. С каждой учетной делянки отбиралось по 10 модельных растений для морфометрического анализа: высота растения, длина соцветия, диаметр стебля, количество листьев, масса сырой и воздушно-сухой биомассы, масса семян с одного растения, масса 1000 семян.

Учет урожайности:

– урожайность зеленой массы (т/га) определялась методом сплошного укоса учетной площади делянки в фазе начала цветения с пересчетом на стандартную влажность;

– урожайность семян (ц/га) учитывалась в фазу полной спелости с отобранной площади с последующим пересчетом на гектар.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакетов AgroStat и Microsoft Excel. Вычислялись средние арифметические значения и ошибки среднего. Достоверность различий оценивалась с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). Использовались t-критерий Стьюдента, корреляционный и регрессионный анализы [13].

Результаты исследований

Проведенные исследования выявили существенное влияние агроприемов на скорость прохождения фенологических фаз и начальное развитие растений. Анализ данных за два контрастных года позволил установить общие закономерности и специфические реакции культуры на стрессовые условия. Полевая всхожесть семян находилась в прямой зависимости от температурного режима и влажности почвы в период посев – всходы. В 2023 году (влажная и прохладная весна) наивысшая всхожесть отмечена при раннем сроке посева – 81,6 %. Условия обеспечивали равномерное набухание семян, хотя и замедляли прорастание. Оптимальный

срок показал 81,9 % всхожести, а поздний – 76,3 % из-за иссушения верхнего горизонта почвы. В экстремально засушливых 2024 и 2025 годах картина была принципиально иной. В июне-августе была зафиксирована нетипично высокая температура воздуха, превышающая показатели предыдущих лет на 5–10,2°С, что обусловило более раннее наступление критических фаз развития амаранта. Ранний срок показал наихудший результат – 63,4 %. Наилучшие показатели продемонстрировал оптимальный срок посева – 73,8 %. Поздний срок показал результат, сопоставимый с ранним сроком (64,2 %).

Влияние на фенологию. Срок посева оказал значительное влияние на продолжительность межфазных периодов:

– при раннем сроке посева растения проходили все фазы развития с существенным запозданием;

– оптимальный срок обеспечил сбалансированное прохождение фенологических фаз;

– поздний срок привел к резкому ускорению развития растений.

Статистический анализ подтвердил высокую достоверность влияния фактора «срок посева» на показатель полевой всхожести.

Мониторинг фитосанитарного состояния посевов выявил комплекс взаимосвязанных факторов, определяющих здоровье агроценоза. Сорный компонент оказался наиболее значимым элементом. В 2023 году доминировали виды с коротким периодом вегетации (просо куриное, мокрица). В засушливые 2024 и 2025 годы состав сместился в сторону более ксерофитных видов сорняков (полынь белая, сорго сарептское, амброзия полыннолистная). Энтомологическая ситуация характеризовалась относительной стабильностью. Наиболее существенную угрозу представляла амарантовая листовертка. Обработка препаратом «Кинмикс» эффективно уничтожала вредителей. Развитие болезней имело четко выраженную сезонную динамику. В 2023 году отмечалось распространение корневых гнилей. В 2024 и 2025 годах отмечалось поражение соцветий серой гнилью.

Анализ структуры урожая выявил сложные реакции изучаемых сортообразцов на изменение площади питания (табл. 2).

Таблица 2. Морфометрические показатели изучаемых сортообразцов амаранта в зависимости от норм высева, среднее за три года, 2023–2025 гг.

Table 2. Morphometric parameters of the studied amaranth varieties depending on seeding rates, average for three years, 2023–2025.

Показатели	Крепыш	Иристон
Норма высева 0,5 кг/га		
Высота растений, см	148	150
Диаметр стебля, см	4,2	4,8
Длина соцветия, см	50	52
Масса семян с одного растения, г	136,5	145,2
Масса 1000 семян, г	0,61	0,70
Норма высева 1,0 кг/га		
Высота растений, см	145	148
Диаметр стебля, см	3,6	4,1
Длина соцветия, см	42,6	48
Масса семян с одного растения, г	128,1	134,6
Масса 1000 семян, г	0,51	0,62
Норма высева 1,5 кг/га		
Высота растений, см	139	142
Диаметр стебля, см	3,0	3,5
Длина соцветия, см	38	46
Масса семян с одного растения, г	119,4	121,8
Масса 1000 семян, г	0,46	0,55

Влияние на морфометрические показатели:

– Высота растений – оба сортообразца продемонстрировали выраженную реакцию на изменение нормы высева. На варианте с минимальной нормой высева (0,5 кг/га) растения реализовали свой ростовой потенциал в полной мере.

– Диаметр стебля – наиболее чувствительный к площади питания показатель. На широкорядных посевах с низкой нормой высева стебли были максимально мощными.

– Длина и характер соцветия – схема размещения растений оказала решающее влияние на этот важнейший элемент продуктивности.

Влияние на компоненты семенной продуктивности:

– Масса семян с одного растения – наиболее ярко отразила преимущества оптимальной площади питания.

– Масса 1000 семян – максимальные значения зафиксированы на варианте с нормой высева 0,5 кг/га.

Сортовые особенности реакции:

– Иристон продемонстрировал черты более пластичного и мощного генотипа.

– Крепыш оказался более толерантным к умеренному загущению.

В 2023 году наблюдалась достоверная отзывчивость на повышение доз питания (табл. 3). Применение умеренной дозы $N_{45}P_{60}K_{60}$ стимулировало более интенсивный рост на ранних этапах. Максимальный эффект по урожайности зерна и зеленой массы наблюдался при внесении повышенной дозы удобрений $N_{90}P_{60}K_{60}$.

Таблица 3. Урожайность зерна и зеленой массы сортов амаранта в зависимости от доз применяемых минеральных удобрений, среднее за 2023–2025 гг.

Table 3. Grain and green mass yield of amaranth varieties depending on the doses of mineral fertilizers applied, average for 2023–2025.

Сорт	Урожайность					
	без удобрений (контроль)		$N_{45}P_{60}K_{60}$		$N_{90}P_{60}K_{60}$	
	зеленая масса, т/га	зерно, ц/га	зеленая масса, т/га	зерно, ц/га	зеленая масса, т/га	зерно, ц/га
Иристон	23,4	11,3	25,6	13,7	26,0	13,9
Крепыш	19,7	14,5	22,5	16,2	23,1	17,0

В засушливых 2024 и 2025 годах динамика накопления биомассы принципиально изменилась. Применение высокой дозы азота $N_{90}P_{60}K_{60}$ незначительно увеличивало урожайность зерна и зеленой массы по сравнению с дозой $N_{45}P_{60}K_{60}$, что значительно снижает рентабельность производства амаранта.

В 2023 году применение умеренной дозы $N_{45}P_{60}K_{60}$ обеспечило увеличение урожайности семян. Дальнейшее увеличение дозы азота не давало значимого прироста.

В экстремальных условиях 2024–2025 годов эффект от применения удобрений был выражен слабее. Применение высокой дозы азота оказалось совершенно неэффективным.

Качество урожая зависело от уровня минерального питания (табл. 4):

– Содержание белка демонстрировало прямую зависимость от уровня азотного питания, увеличение доз увеличивало белковость.

– Содержание жира в семенах показало обратную зависимость от уровня азотного питания.

– Содержание сквалена – максимальное содержание отмечалось на вариантах с умеренным азотным питанием.

Таблица 4. Качество урожая амаранта в зависимости от уровня минерального питания, среднее за 2023–2025 гг.

Table 4. Amaranth crop quality depending on the level of mineral nutrition, average for 2023–2025.

Показатели	**Крепыш**	**Иристон**
без удобрений (контроль)		
Содержание белка, %	17,4	16,9
Содержание жира, %	7,9	7,3
Содержание сквалена, %	5,5	5,8
$N_{45}P_{60}K_{60}$		
Содержание белка, %	18,1	17,6
Содержание жира, %	7,5	6,3
Содержание сквалена, %	6,1	6,5
$N_{90}P_{60}K_{60}$		
Содержание белка, %	19,6	18,3
Содержание жира, %	6,5	5,8
Содержание сквалена, %	5,7	6,1

Комплексный анализ взаимодействия изучаемых агроприемов за 2023–2025 годы позволил выявить оптимальные сочетания факторов для различных направлений использования амаранта (табл. 5). Для получения зеленой массы максимальная урожайность достигалась при использовании сортообразца Иристон, посеянного в оптимальный срок посева (1–5 мая), с нормой высева 1,0 кг/га при широкорядном способе и дозе удобрений $N_{45}P_{60}K_{60}$, которая составила в среднем по трем годам исследований 23,4 т/га. Урожайность зеленой массы сорта Крепыш составила в среднем 19,7 т/га. Для семенных целей оптимальная продуктивность отмечена у сортообразца Крепыш, посеянного в ранний срок посева (20–25 апреля), с нормой высева 0,5 кг/га при широкорядном способе и дозе удобрений $N_{45}P_{60}K_{60}$, которая составила 14,5 ц/га. Урожайность зерна сорта Иристон во все годы исследований была ниже и составила в среднем 11,3 ц/га.

Таблица 5. Урожайность зерна и зеленой массы сортов амаранта, среднее за 2023–2025 гг.

Table 5. Grain and green mass yield of amaranth varieties, average for 2023–2025.

Сорта амаранта	Урожайность			
	без орошения		на орошении	
	зеленая масса, т/га	зерно, ц/га	зеленая масса, т/га	зерно, ц/га
Иристон	23,4	11,3	29,2	14,3
Крепыш	19,7	14,5	23,7	16,8

Несмотря на засухоустойчивость амаранта, обусловленную фотосинтезом и мощной корневой системой, дефицит продуктивной влаги в критические периоды онтогенеза остается основным лимитирующим фактором, сдерживающим реализацию его генетического потенциала продуктивности в засушливых условиях равнинной зоны Ингушетии [16]. Урожайность семян и зеленой массы обоих сортообразцов амаранта значительно увеличивалась на вариантах с орошением по сравнению с контролем. Наибольшее увеличение зеленой массы отмечено по сорту Иристон. По годам максимальная прибавка урожая от воздействия орошения отмечена в 2025 году. В связи с этим обоснование элементов режима орошения является необходимым компонентом адаптивной технологии. Можно выделить два критических периода в водопотреблении амаранта: фаза всходов – начало ветвления и фаза бутонизации – цветения [17]. На основании данных по влагоотдаче почвы и

биологическим особенностям культуры для условий региона предлагаются следующие параметры режима орошения:

– Предпосевной полив при влажности почвы в пахотном слое ниже 70–75 % от наименьшей влагоемкости (НВ). Оросительная норма полива – 1500–2000 м³/га, способствует получению дружных и выровненных всходов, особенно актуально в условиях засушливой весны.

– Вегетационные поливы при снижении влажности почвы в активном слое (0–50 см) до 75–80 % НВ. Для семенных посевов наиболее эффективным является проведение 2-3 вегетационных поливов с поливной нормой 500–600 м³/га. Суммарное водопотребление колеблется в пределах 3456–4256 м³/га.

Первый полив назначается в фазе ветвления, второй – в начале фазы бутонизации, третий (при необходимости) – в фазе цветения. При возделывании на зеленую массу, когда приоритетом является накопление вегетативной биомассы, количество поливов может быть увеличено до 3–4. Наиболее предпочтительным способом полива для амаранта, учитывая его высоту и плотность посева, является капельное орошение, которое позволяет подавать воду непосредственно в корнеобитаемую зону, минимизируя непродуктивные потери на испарение и сток, а также поддерживая оптимальный водно-воздушный режим почвы. Годы исследований выдались особенно засушливыми с высокой температурой воздуха до 26,3–38,9^{0}С, что способствовало применению капельного орошения. Таким образом, рациональный режим орошения, адаптированный к фенофазам развития амаранта, является не просто компенсаторным мероприятием, а мощным инструментом управления продукционным процессом, позволяющим раскрыть потенциал культуры и гарантировать рентабельность ее возделывания в регионе.

Экономическая эффективность оценивалась на основе детального калькулирования затрат и прогнозируемых доходов при различных направлениях использования урожая (на семена, зеленый корм). Наиболее рентабельным является семеноводческое направление возделывания амаранта, уровень рентабельности – 75–128 %. Наиболее рентабелен амарант сорта Крепыш, производство которого на семена на 150–200 % выше рентабельности озимой пшеницы. При кормовом использовании культура демонстрирует на 130–180 % более высокие экономические показатели по сравнению с производством кукурузы на силос. Наиболее подходящий сорт Иристон, незначительно отстает сорт Крепыш. Орошение оказывает значительное воздействие на увеличение урожайности зерна и зеленой массы обоих сортов.

Заключение

Проведенное комплексное исследование в течение трех контрастных по метеоусловиям вегетационных сезонов позволило разработать и научно обосновать технологию возделывания сортообразцов амаранта Крепыш и Иристон, адаптированную к специфическим почвенно-климатическим условиям Республики Ингушетия. Выполненная работа не только подтвердила принципиальную возможность успешной интродукции данной культуры в регионе, но и выявила механизмы ее адаптации к ключевому лимитирующему фактору – летней засухе, что имеет фундаментальное значение для развития адаптивного растениеводства в условиях нарастающей климатической изменчивости. Существенным практическим достижением является дифференциация технологических параметров в зависимости от целевого назначения посевов: для получения зерна – оптимальный сортообразец Крепыш, широкорядный посев с нормой высева 0,5–0,7 кг/га и умеренное азотное питание ($N_{45}P_{60}K_{60}$); для кормового направления – предпочтительнее использование

сортообразца Иристон с нормой высева 1,0–1,2 кг/га и усиленным азотным питанием. Оптимальный срок посева при прогреве почвы до +14...+16°С (1–5 мая). Более рентабельным является семеноводческое направление возделывания амаранта сорта Крепыш, уровень рентабельности – 75–128 %.

Внедрение амаранта в сельскохозяйственное производство Республики Ингушетия будет способствовать диверсификации растениеводства, укреплению кормовой базы животноводства, введению новой полезной овощной культуры на участках миллионов дачников и созданию новых рыночных ниш, оказывая позитивное влияние на социально-экономическое развитие региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гасиев В. И., Лущенко Г. В.* Влияние норм высева и способа посева на продуктивность амаранта // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51. № 4. С. 60–64. EDN: TCCYOD

2. *Офицеров Е. Н.* Амарант – перспективное сырье для пищевой и фармацевтической промышленности // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. Изд-во Казанского НИТУ, 2001. Т. 2. № 5. С. 1–4. EDN: WPGSZV

3. *Костоева Л. Ю., Леймоева А. Ю., Цокиев Ю. М.* Адаптивность выращивания амаранта в условиях Республики Ингушетия // Сборник научных трудов, ФГБОУ ВО Ингушский государственный университет. Магас-Махачкала, 2021. С. 101–111. EDN: JSQJKP

4. *Магомедов И. М., Чиркова Т. В.* Амарант – прошлое, настоящее и будущее // Успехи современного естествознания. 2015. № 1. С. 1108–1113. EDN: TWQHPP

5. *Саратовский Л. И., Ващенко Т. Г. и др.* Элементы сортовой технологии выращивания амаранта в степной зоне Центрального Черноземья // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 1(56). С. 22–31. DOI: 10.17238/issn 2071-2243.2018.1.22

6. *Офицеров Е. И., Калистратов А. В. и др.* Особенности гидролитического экстрагирования сквалена из масла амаранта // Бутлеровские сообщения. 2021. Т. 65. № 1. С. 120–128. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-65-1-120

7. *Чернов И. А., Гасимова Г. А., Дягтерёва И.А., Куликов Ю.А.* Специфика биосинтеза высоколизинового белка у растений рода *Amaranthus L.*, состав, свойства и технология его выделения из фитомассы амаранта // Ученые записки Казанского государственного университета. Естественные науки. 2007. Т. 149. № 4. С. 8–22. EDN: JJTQXX

8. *Чиркова Т. В.* Амарант – культура XXI века // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 22–27.

9. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск 1. М., 2019. С. 49–57.

10. *Баркинхоев М. М. и др.* Природно-климатические ресурсы Ингушетии. Нальчик: Эль-фа, 2002. 223 с.

11. *Журбицкий З. И.* Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 266 с.

12. *Адиньяев Э. Д.* Земледелие Северного Кавказа. М.: Агропрогресс, 1999. 518 с. EDN: ZAQWJR

13. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1985. 350 с.

14. *Васильев И. П., Туликов А. М., Баздырев Г. И.* Практикум по земледелию. М.: Колос, 2004. 424 с.

15. *Шеуджен А. Х., Громова Л. И., Онищенко Л. М.* Методы расчета доз удобрений: учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2010. 61 с.

16. *Келер В. В.* Технология производства продукции растениеводства. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2022. 266 с.

17. *Федотов В. А., Кадыров С. В., Щадрина Д. И., Столяров О. В.* Растениеводство. С.-Петербург: Лань, 2015. 336 с.

18. *Bressani R.* Composition and nutritional properties of Amaranth // Paredes-López O.(ed). Amaranth: Biology, Chemistry and Technology. Boca Ratón, US: CRC Press Inc., 1994. 185–205 p. DOI: 10.1201/9781351069601-10

REFERENCES

1. Gasiev V.I., Lushchenko G.V. Influence of seeding rates and sowing method on amaranth productivity. *Bulletin of the Gorsk State Agrarian University*. 2014. Vol. 51. No. 4. Pp. 60–64. EDN: TCCYOD. (In Russian)

2. Ofitserov E.N. Amaranth – a promising raw material for the food and pharmaceutical industries. *Chemistry and Computer Modeling.* Butlerov communications. Izd-vo Kazanskogo NITU. 2001. Vol. 2. No. 5. Pp. 1–4. EDN: WPGSZV. (In Russian)

3. Kostoeva L.Yu., Leymoeva A.Yu., Tsokiev Yu.M. Adaptability of amaranth cultivation in the conditions of the Republic of Ingushetia. *Collection of Scientific Papers, Ingush State University*. Magas-Makhachkala, 2021. Pp. 101–111. EDN: JSQJKP. (In Russian)

4. Magomedov I.M., Chirkova T.V. Amaranth – past, present, and future. *Advances in Modern Natural Science.* 2015. No. 1. Pp. 1108–1113. EDN: TWQHPP. (In Russian)

5. Saratovsky L.I., Vaschenko T.G. et al. Elements of varietal technology for growing amaranth in the steppe zone of the Central Black Earth Region. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2018. No. 1(56). Pp. 22–31. DOI: 10.17238/issn 2071-2243.2018.1.22. (In Russian)

6. Ofitserov E.I., Kalistratov A.V. et al. Features of hydrolytic extraction of squalene from amaranth oil. *Butlerov Communications.* 2021. Vol. 65. No. 1. Pp. 120–128. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-65-1-120. (In Russian)

7. Chernov I.A., Gasimova G.A., Dyagtereva I.A., Kulikov Yu.A. Specificity of high-lysine protein biosynthesis in plants of the genus Amaranthus L., composition, properties, and technology of its isolation from amaranth phytomass. *Scientific Notes of Kazan State University, Natural Sciences*. 2007. Vol. 149. No. 4. Pp. 8–22. EDN: JJTQXX. (In Russian)

8. Chirkova T.V. Amaranth – a crop of the 21st century. *Soros Educational Journal*. 1999. No. 10. Pp. 22–27. (In Russian)

9. *Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Methodology of State Variety Testing of Agricultural Crops]. Issue 1. Moscow, 2019. Pp. 49–57. (In Russian)

10. Barkinkhoev M.M. et al. *Prirodno-klimaticheskiye resursy Ingushetii* [Natural and Climatic Resources of Ingushetia]. Nalchik: El-fa, 2002. 223 p. (In Russian)

11. Zhurbitsky Z.I. *Teoriya i praktika vegetatsionnogo metoda* [Theory and Practice of the Vegetative Method]. Moscow: Nauka, 1968. 266 p. (In Russian)

12. Adinyaev E.D. *Zemledeliye Severnogo Kavkaza* [Agriculture of the Northern Caucasus]. Moscow: Agroprogress, 1999. 518 p. EDN: ZAQWJR. (In Russian)

13. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Field Experiment Methodology (with Basics of Statistical Processing of Research Results)]. 5th ed., revised and enlarged. Moscow: Agropromizdat, 1985. 350 p. (In Russian)

14. Vasiliev I.P., Tulikov A.M., Bazdyrev G.I. *Praktikum po zemledeliyu* [Practical Training in Agriculture]. Moscow: Kolos, 2004. 424 p. (In Russian)

15. Sheudzhen A.Kh., Gromova L.I., Onishchenko L.M. *Metody rascheta doz udobreniy: uchebnoye posobiye* [Methods for Calculating Fertilizer Doses: a Tutorial]. Krasnodar: KubSAU, 2010. 61 p. (In Russian)

16. Keller V.V. *Tekhnologiya proizvodstva produktsii rasteniyevodstva* [Technology of plant production]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Yurait, 2022. 266 p. (In Russian)

17. Fedotov V.A., Kadyrov S.V., Shchadrina D.I., Stolyarov O.V. *Rasteniyevodstvo* [Plant growing]. St. Petersburg: Lan, 2015. 336 p. (In Russian)

18. Bressani R. Composition and nutritional properties of Amaranth. Paredes-López O. (ed). Amaranth: Biology, Chemistry and Technology. Boca Ratón, US: CRC Press Inc., 1994. 185–205 p. DOI: 10.1201/9781351069601-10

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Костоева Л. Ю. – разработка методологии, проведение исследований и обработка статистических данных, подготовка и редактирование текста;

Виноградов З. С. – разработка методологии, руководство в проведении исследований, обеспечение посевного материала;

Базгиев З. М. – проведение исследований;

Газдиев А. М. – проведение исследований.

Contribution of the authors:

Kostoeva L.Yu. – methodology development, research and statistical data processing, text preparation and editing;

Vinogradov Z.S. – methodology development, guidance in conducting research, providing seed material;

Bazgiev Z.M. – conducting research;

Gazdiev A.M. – conducting research.

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания (№ 075-01280-23-00)

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment, (No. 075-01280-23-00)

Информация об авторах

Костоева Лиза Юсуповна, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., зав. отделом «Мелиорация и орошаемое земледелие», Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства;

386203, Россия, г. Сунжа, ул. Осканова, 50;

kostoevaliz@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2258-3724, SPIN-код: 1900-5373

Виноградов Зосим Сергеевич, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., Всероссийский институт растениеводства имени Н. И. Вавилова;

190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42;

vinogradov.vir@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0821-9552, SPIN-код: 7798-1508

Базгиев Зураб Магомедович, мл. науч. сотр., Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства;

386203, Россия, г. Сунжа, ул. Осканова, 50;

zurab.bazgiev006@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0016-4366, SPIN-код: 7319-0091

Газдиев Алихан Муссаевич, науч. сотр., Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства;
386203, Россия, г. Сунжа, ул. Осканова, 50;
alikhangazdiev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9462-8809, SPIN-код: 8860-4528

Information about the authors

Lisa Yu. Kostoeva, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, Ingush Scientific Research Institute of Agriculture;
50, Oskanov street, Sunzha, 386203, Russia;
kostoevaliz@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2258-3724, SPIN-code: 1900-5373
Zosim S. Vinogradov, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, All-Russian Institute of Plant Growing named after N.I. Vavilov;
42, Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, 190121, Russia;
vinogradov.vir@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0821-9552, SPIN-code: 7798-1508
Zurab M. Bazgiev, Junior Research, Ingush Scientific Research Institute of Agriculture;
50, Oskanov street, Sunzha, 386203, Russia.
zurab.bazgiev006@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0016-4366, SPIN-code: 7319-0091
Alikhan M. Gazdiev, Researcher, Ingush Scientific Research Institute of Agriculture;
50, Oskanov street, Sunzha, 386203, Russia;
alikhangazdiev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9462-8809, SPIN-code: 8860-4528

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЭКОНОМИКЕ

УДК 658.011.55 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-161-174
GLOLCH

Наборы данных маркетинговых исследований в цифровых экосистемах девелопмента: ITSM-подход Индустрии 5.0

А. И. Васильев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Аннотация. В условиях перехода от Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0 возрастает значимость цифровизации бизнес-моделей, основанных на доверенном доступе к данным и интеграции участников цифровых экосистем. Актуальность исследования обусловлена отсутствием у девелоперских компаний эффективных инструментов консолидации и анализа маркетинговой информации в едином цифровом пространстве. Научная новизна работы заключается в разработке модели цифровой экосистемы девелоперской компании, рассматриваемой как бизнес-модель доверенного доступа к данным, а также в формировании системы показателей и источников маркетинговой информации для поддержки управленческих решений.

Цель исследования – описание модели цифровой экосистемы компании-девелопера как бизнес-модели доверенного доступа к данным, разработке системы показателей и источников данных для цифровой экосистемы для девелоперских фирм.

Методы исследования. Методологической основой исследования послужили подходы ITSM, MBSE и концепция управления корпоративной информацией (EIM), позволяющие интегрировать структурированные и неструктурированные данные, включая Big Data, AI и IoT-технологии.

Результаты. В статье предложена классификация релевантных наборов данных, проведена их экспертная оценка по степени значимости и частоте использования. На примере бизнес-процесса девелоперской компании по определению стоимости квадратного метра обоснована необходимость применения комплексных наборов данных для принятия решений коммерческим директором. Результаты исследования демонстрируют возможность системной консолидации маркетинговой информации и построения единой модели данных для цифровой экосистемы девелопера.

Выводы. В работе сделан вывод о практической значимости предложенной модели для повышения эффективности управления, а также определены направления дальнейших исследований, связанных с разработкой сценарно-игровых и имитационных моделей взаимодействия участников экосистемы.

Ключевые слова: маркетинговые исследования, наборы данных (datasets), цифровая экосистема, ITSM, управленческие решения

Поступила 30.09.2025, одобрена после рецензирования 14.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Васильев А. И. Наборы данных маркетинговых исследований в цифровых экосистемах девелопмента: ITSM-подход Индустрии 5.0 // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 161–174. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-161-174

© Васильев А. И., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

MSC: 91B60 Original article

Marketing research datasets in digital development ecosystems: an Industry 5.0 ITSM approach

A.I. Vasilyev

Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197022, Russia

Abstract. In the context of the transition from Industry 4.0 to Industry 5.0, the importance of digitalizing business models based on trusted access to data and the integration of digital ecosystem participants is growing. The relevance of this study stems from the lack of effective tools for development companies to consolidate and analyze marketing information in a single digital space. The scientific novelty of this work lies in the development of a model of a development company's digital ecosystem, considered as a business model for trusted access to data, as well as in the formation of a system of metrics and sources of marketing information to support management decisions.

Aim. This study is to describe a digital ecosystem model for a development company as a business model for trusted access to data, and to develop a system of metrics and data sources for a digital ecosystem for development firms.

Research methods. The methodological basis of the study are ITSM, MBSE, and enterprise information management (EIM) approaches, which enable the integration of structured and unstructured data, including Big Data, AI, and IoT technologies.

Results. The article proposes a classification of relevant data sets and conducts an expert assessment of their significance and frequency of application. Using the example of a development company's business process for determining the cost per square meter, the need to use integrated data sets for decision-making by the commercial director is substantiated. The results of the study demonstrate the feasibility of systematically consolidating marketing information and building a unified data model for a developer's digital ecosystem.

Conclusions. The paper concludes that the proposed model is of practical importance for improving management efficiency, and identifies areas for further research related to the development of scenario-based game and simulation models of interaction between ecosystem participants.

Keywords: marketing research, datasets, digital ecosystem, ITSM, management decisions

Submitted 30.09.2025, approved after reviewing 14.01.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Vasilyev A.I. Marketing research datasets in digital development ecosystems: an Industry 5.0 ITSM approach. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 161–174. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-161-174

Введение

В условиях перехода от технологических укладов Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0 появляются новые бизнес-модели хозяйствующих субъектов, основной отличительной особенностью которых является удобство работы с многомерными, взаимосвязанными данными о множестве участников цифровых экосистем. Технологии анализа данных, извлечения данных, бизнес-аналитики приобретают особую значимость. Для Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 характерно использование принципиально новых бизнес-моделей – моделей доверенного доступа к данным, моделей торговых площадок, моделей услуг в цепочке создания стоимости, моделей Интернета вещей.

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Технологии формирования наборов данных (DATA SETS) применяются на всех этапах жизненного цикла управления данными: идентификации, приобретения, обработки, анализа, интерпретации, предсказания данных для формирования управленческих решений. ITSM-подход как комплекс технологий по управлению ИТ-сервисами позволяет реализовать сквозную интеграцию данных.

В статье приведена модель и представлены особенности маркетинговых данных применительно к новым бизнес-моделям Индустрии 5.0. Приведен пример формирования набора данных в рамках деятельности девелоперской компании. Представлены система показателей маркетинговой информации для девелоперской компании и источники данных.

Цель исследования состоит в описании модели цифровой экосистемы компании-девелопера как бизнес-модели доверенного доступа к данным, разработке системы показателей и источников данных для цифровой экосистемы для девелоперских фирм.

Задачами исследования являются:

- определение роли маркетинговых исследований для управления цифровой экосистемой девелоперских фирм в условиях ITSM-подхода;
- разработка системы показателей и источников данных маркетинговых исследований для управления цифровой экосистемой для девелоперских фирм для лица, принимающего решение (коммерческий директор).

Актуальность анализа маркетинговой информации цифровых экосистем девелоперских компаний в условиях Индустрии 5.0.

Актуальность разработки математических, статистических и инструментальных средств для задач цифровой экономики строительной отрасли высока в условиях Индустрии 5.0. Внедрение на предприятиях строительной отрасли технологий BIM позволяет собрать на единой цифровой платформе всех участников девелоперской компании. В настоящее время не существует цифровых решений по формированию и эксплуатации цифровых экосистем в девелопменте как одной из ведущих сфер деятельности в любой экономической системе. Отсутствуют механизмы сквозной интеграции и консолидации маркетинговой информации.

В условиях обеспечения требований системного описания и использования наборов данных маркетинговой информации при проектировании программных систем автоматизации процессов управления цифровыми экосистемами внедряются принципы MBSE (системный инжиниринг на основе моделей – Model Based Systems Engineering), который позволяет обеспечить новый уровень состыковки всех процессов управления, изделий, услуг уже на ранних этапах разработки.

Объектом исследования в статье является цифровая экосистема, предметом исследования – процессы подготовки наборов данных маркетинговых исследований для предиктивной аналитики в условиях применения ITSM-технологий.

Индустрия 5.0 как новый технологический уклад привносит серьезные изменения в организационную и информационную архитектуры предприятий. Для обеспечения таких процессов требуются цифровые технологии в сфере сбора, обработки и хранения информации. Анализ маркетинговой информации должен производиться с применением технологий Big Data, AI, IoT.

Представление цифрового предприятия, цифровой экосистемы как сложной динамической киберфизической системы в условиях новых бизнес-моделей Индустрии 5.0 позволяет рассматривать экосистему как систему систем (System of Systems или SoS). Новые

бизнес-модели поддерживают современные тренды технологического развития: обеспечение платформенности цифровых решений, возможность применения Big Data-технологий для консолидации разноформатной информации. Под новыми бизнес-моделями понимаются модели: платформы Интернета вещей, модель услуг в цепочке создания стоимости, модель торговой площадки, модель доверенного доступа к данным [1–5].

Необходимость цифровизации маркетинговых данных освещалась в литературе уже достаточно давно. Например, авторы [6] описывали этапы проведения маркетинговых исследований, трансформацию инструментов проведения исследований в цифровые. К цифровым инструментам отнесли, в частности, проведение опросов в социальных сетях.

Использование инструментов для проведения цифрового маркетинга, таких как Google Analytics, Яндекс.Метрика, позволяют авторам [7, 8, 9] утверждать, что цифровая трансформация основных методов маркетинговых исследований связана в первую очередь с повсеместным применением различных онлайн-платформ для взаимодействия с потребителем.

Группа статей [10–12] посвящена разработке новых методов решения ключевых математических задач, возникающих в контексте анализа Big Data для задач повышения эффективности продаж производимых продуктов. Эти методы, основанные на применении современных аналитических инструментов, способны существенно трансформировать традиционные функции маркетинга и повысить эффективность их реализации. Авторы подчеркивают, что маркетологи используют данные, собранные при онлайн-взаимодействии с клиентами для построения комплексной модели поведения каждого отдельного клиента. К аналитическим инструментам относят искусственный интеллект и различные системы бизнес-анализа (BI). Утверждается, что использование комплексной модели поведения клиента позволяет увеличить количество продаж, адаптировать продукт под потребности клиента, сформировать специфический контент поиска и четко таргетировать сообщения. По сути, благодаря использованию больших массивов данных происходит обучение моделей для дальнейшего их использования в процессе поддержки принятия решений.

Статьи [13, 14] посвящены процессу принятия решений на основании маркетинговых данных и использованию различных математических и статистических методов с целью сокращения влияния человеческого фактора и снижения рисков принятия неправильных решений. Публикации рассматривают также аспекты создания системы аналитики, направленной на преобразование стратегии компании в области маркетинга. В публикациях указывается, что маркетинговые кампании, основанные на анализе данных, более эффективны. Однако авторы статей также делают акцент на продвижении продукции, увеличении конверсий и продаж. В статьях не указывается роль экосистемы при формировании и обработке данных.

В [15] автор размышляет о необходимости внедрения новых цифровых технологий в строительстве. Целесообразность внедрения технологий Индустрии 4.0 в строительную отрасль автор связывает с автоматизацией процессов управления строительством – от нулевого цикла до управления производством и документооборотом.

Статьи [16–29] посвящены вопросам выбора программного обеспечения для проектирования ИТ-сервисов процессов управления маркетинговой информацией, необходимости формирования библиотек ITIL. Однако ни в одной статье не описывается возможность управления взаимосвязанной маркетинговой информацией в рамках экосистемного подхода.

Исследование литературы показало, что в настоящее время отсутствует инструментарий для анализа маркетинговой информации цифровых экосистем в условиях новых бизнес-моделей Индустрии 5.0, не представлена связь между архитектурой экосистемы и теми данными, которые используются для формирования и анализа наборов данных маркетинговой информации.

Модель цифровой экосистемы компании-девелопера

В современных условиях развития бизнеса все процессы, инфраструктура бизнеса, архитектура предприятий претерпевают цифровые трансформации. Под цифровой трансформацией понимается система мероприятий по созданию конкурентоспособной информационной среды, существенно повышающей инновационную активность участников процессов. Под цифровой экосистемой понимается группа взаимосвязанных ИТ-ресурсов, которые могут функционировать как единое целое [25]. Например, цифровые экосистемы для девелоперских компаний могут состоять из внутренних участников процессов управления: поставщиков, клиентов, торговых партнеров, финансовых служб, государственных учреждений и т.д.

На рисунке 1 представлена информационная модель архитектуры цифровой экосистемы компании-девелопера, для которой предполагается выявить особенности формирования наборов данных для дальнейшего анализа коммерческим директором [26].

На рисунке 1 представлены составляющие экосистемы девелопера:

- сама компания девелопера, которая является ее центром и аккумулирует внутри себя все данные для принятия решения;
- два контура управления – строительный и маркетинговый с соответствующими функционалами управления;
- эксплуатирующая организация и подрядчики.

Внешней средой для экосистемы являются:

- государство и монополисты как представители контролирующих органов;
- собственники участков земли и банки как основные ключевые поставщики;
- конкуренты – прочие девелоперские компании.

Стрелками обозначены пути обмена потоками данных маркетинговой информации.

Для анализа особенностей наборов данных для маркетинговых исследований необходимо задать вид бизнес-модели для цифровой экосистемы. Одной из необходимых их составляющих являются сведения об архитектуре предприятия. Именно архитектура предприятия и подход к ее определению оказывают существенное влияние на все бизнес-процессы компании.

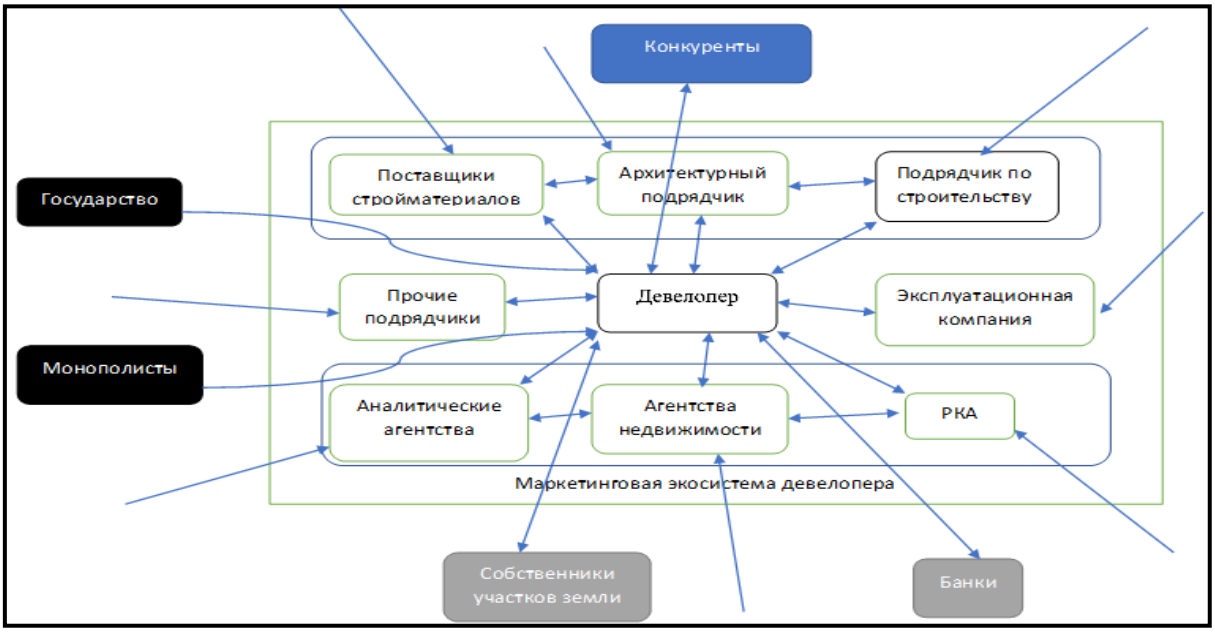


***Рис. 1**. Модель цифровой экосистемы компании-девелопера*

***Fig. 1**. Model of the digital ecosystem of a development company*

В условиях концепции Индустрии 5.0 появились новые бизнес-модели [27], включающие особенности выстраивания взаимосвязей между участниками бизнеса и внешней средой.

Выберем для модели, представленной на рисунке 1, бизнес-модель доверенного доступа к данным, т.к. она в наибольшей степени отвечает требованиям по консолидации данных.

Все функциональные требования к новым бизнес-моделям и бизнес-процессам необходимо реализовать в едином информационном пространстве. Возможность организации единого подхода к управлению структурированной и неструктурированной информацией (наборами данных) предоставляет концепция EIM (Enterprise Information Management). Для работы в технологиях Индустрии 4.0 и 5.0 необходимо располагать наборами данных по всем перспективам повышения эффективности деятельности.

ITSM-подход базируется на следующих постулатах:

- услуга – это основная форма ценности, которую привносят внедренные информационные технологии, и созданная информационная среда;
- ИТ-услуги удобно разбивать на комплекс процессов с измеримыми целями и заранее прописанными обязанностями.

Наборы данных (DATA SETS) в контексте BI-решений для управления эффективностью цифрового предприятия представляют собой кортеж взаимосвязанной информации, собранной из источников структурированных и неструктурированных данных, а также из внешней и внутренней среды компании. Сюда включены показатели бизнес-процессов (ключевых, вспомогательных, сквозных), неструктурированная информация из корпоративных, социальных и других каналов коммуникации, данные о нематериальных активах компании.

Наборы данных формируются в процессе применения SQL и NOSQL-подходов к формализации, структурированию исходной информации при использовании ECM-технологий (Enterprise Content Management). Маркетинговые исследования для подготовки DATA SETS (наборов данных) направлены на получение удобного к использованию управленческого контента.

ITSM-подход позволяет наладить сквозную интеграцию информационных потоков. Для этого требуется использование наборов информации на всех этапах управления. Специалисты компании Bright data определяют набор данных как коллекцию сведений, относящихся к определенной тематике или сфере бизнеса. Наборы могут иметь разные форматы: в SQL-технологиях это структурированные данные, представленные в виде взаимосвязанных реляционных моделей. В то же время возможности NOSQL позволяют работать и с неструктурированными данными.

Формирование наборов данных маркетинговых исследований на примере девелоперской компании

Проанализируем элементы информационной модели применения наборов данных в контексте концепции Индустрии 5.0 для строительства и девелопмента. Технологии Индустрии 5.0 в строительстве должны позволять создавать цифровые представления физических и функциональных характеристик любых проектов. Такие модели данных включают не только геометрические и пространственные параметры, содержащиеся в 3D-модели, но и данные по планированию и затратам. Технология информационного моделирования дает возможность определять, анализировать и контролировать влияние изменений на стоимость и сроки реализации проекта.

Рассмотрим пример формирования набора данных, актуальных для девелоперской компании для представления управленческого решения коммерческого директора по оценке темпов строительства, темпов продаж. Автором самостоятельно произведена классификация видов набора данных, показаны возможности применения в девелопменте для коммерческого директора, экспертно оценены релевантность и частота использования (табл. 1).

Таблица 1. Релевантные для девелоперской компании наборы данных и источники данных

Table 1. Data sets and data sources relevant to the development company

Вид описания набора данных	**Возможность применения в девелопменте**	**Релевантность и частота использования**
Числовые (количественные измерительные шкалы)	Информация о ценах Информация о площадях под застройку Количественная информация о клиентах Количественная информация о входящих обращениях Количественная информация о цепочке продаж Информация о площадях реализуемых объектов Информация о сделках (количество, сумма) Информация о структурах затрат в денежном выражении	Максимальная
Текстовые (номинальные измерительные шкалы)	Качественная информация о клиентах Информация о запросах потенциальных клиентов Текстовое описание объектов строительства Отзывы о деятельности компании	Высокая
Мультимедийные (номинальные измерительные шкалы)	Визуальные изображения объектов строительства (рендеры) Фото и видео построенных объектов Изображения участков под застройку Визуализация интерьеров помещений	Высокая
Временные (количественные измерительные шкалы)	Темпы строительства Распределение продаж по годам, месяцам, дням недели Динамика длительности совершения сделок	Средняя
Пространственные (номинальные измерительные шкалы)	Картографическая и GPS-привязка строящихся объектов к местности Карта расположения объектов конкурентов	Средняя
Структурированные (источники данных)	Базы данных Отчеты по продажам Финансовые документы	Максимальная
Неструктурированные (источники данных)	Каталоги Данные сайтов Коммерческие предложения	Высокая
Гибридные (источники данных)	Отчеты менеджмента	Высокая
Внешние (смешанные измерительные шкалы)	Данные маркетинговых исследований Анализ конкурентов Анализ законодательного окружения	Высокая
Внутренние (смешанные измерительные шкалы)	Весь массив внутренних данных компании	Высокая
Статичные (информация о данных в предыдущие периоды времени)	Исторические данные о продажах Данные по построенным объектам География улиц	Низкая
Периодически обновляемые (смешанные измерительные шкалы)	Данные по конкурентам Данные по законодательству Данные по стоимости строительных материалов	Средняя
Постоянно обновляемые	Данные по продажам Данные по клиентам Данные по процессу строительства Данные по динамике обращений	Высокая

Разберем практический пример извлечения наборов данных в рамках деятельности девелоперской компании для построения управленческих решений коммерческого директора в условиях ITSM-подхода. Дано: девелоперская компания запускает бизнес-процесс по определению стоимости квадратного метра в новом доме комфорт-класса. Для управления процессом принятия решений коммерческим директором необходима следующая информация:

- финансовые ожидания компании;
- реакция со стороны потенциальных покупателей объекта;
- информация о конкурентном окружении;
- себестоимость строительства;
- информация о динамике реализации предыдущих проектов компании;
- информация о внешней среде косвенного воздействия.

В таблице 2 приведены системы показателей и источники данных, характеризующие каждый из вышеперечисленных пунктов.

Таблица 2. Система показателей информации для девелоперской компании

Table 2. Information indicator system for a development company

Источник информации	**Система показателей**
Финансовые ожидания компании	Количественные показатели по желаемому уровню дохода от проекта в целом с допустимой дельтой и распределением по времени
Реакция со стороны потенциальных покупателей объекта	Прогнозируемые количественные показатели уровня спроса со стороны потенциальных покупателей объекта
Информация о конкурентном окружении	Количественные показатели стоимости продажи схожих объектов с распределением по конкурентам в зависимости от их особенностей
Себестоимость строительства	Прогнозируемая затратная часть проекта с учетом фактора времени и временной стоимости денег
Информация о динамике реализации предыдущих проектов компании	Количественные данные о скорости реализации предыдущих проектов компании в зависимости от темпов строительства и изменения стоимости
Информация о внешней среде косвенного воздействия	Качественная информация о текущем законодательстве, планируемых к принятию или рассмотрению законах

В данном случае видно, что информация может состоять из различных наборов данных. В таблице 3 представлены наборы данных девелоперской компании, которые необходимы для принятия управленческих решений в области ценообразования.

Таблица 3. Извлекаемые наборы данных для девелоперской компании

Table 3. Extracted datasets for a development company

Информация	Набор данных	Источник
Финансовые ожидания компании	Информация о ценовой политике компании	Извлечение внутренних данных в виде текстовых документов
	Информация о внутренних нормах доходности проектов	Извлечение внутренних данных в виде табличных документов
	Экспертная оценка	Получение информации по ожиданиям руководства компании (к наборам данных не относятся, но должны быть учтены)
Реакция со стороны потенциальных покупателей объекта	Портрет потребителя	Качественная информация о потенциальных покупателях объектов недвижимости на основании внутренних данных компании
	Ценовые ожидания потребителя	Данные маркетинговых исследований в виде количественных показателей
Информация о конкурентном окружении	Качественная информация о конкурентном окружении	Данные маркетинговых исследований в виде текстового описания объектов конкурентов
	Количественная информация о ценах конкурентов	Данные маркетинговых исследований в виде цифрового описания цен объектов конкурентов
	Уровень востребованности объектов конкурентов	Данные маркетинговых исследований в виде цифрового описания процента реализованных объектов конкурентов
Себестоимость строительства	Статьи себестоимости строительства в натуральном выражении	Внутренние данные компании в виде текстового документа
	Количественные значения статей себестоимости строительства	Маркетинговое изучение рынка в виде табличного документа
	Динамика количественных показателей статей себестоимости строительства	Маркетинговое изучение рынка в виде табличного документа
Информация о динамике реализации предыдущих проектов компании	Информация о динамике стоимости предыдущих проектов компании	Внутренняя информация компании в виде табличного документа
	Информация о динамике продаж предыдущих объектов компании	Внутренняя информация компании в виде табличного документа
	Информация о динамике входящих обращений в компанию	Внутренняя информация компании в виде табличного документа
Информация о внешней среде косвенного воздействия	Информация о текущем состоянии рынка	Данные маркетинговых исследований в виде текстового описания объектов конкурентов
	Информация о законодательных нормах	Данные маркетинговых исследований в виде текстового описания объектов конкурентов

На рисунке 2 приведены взаимосвязи системы показателей и источников данных для девелоперской компании.

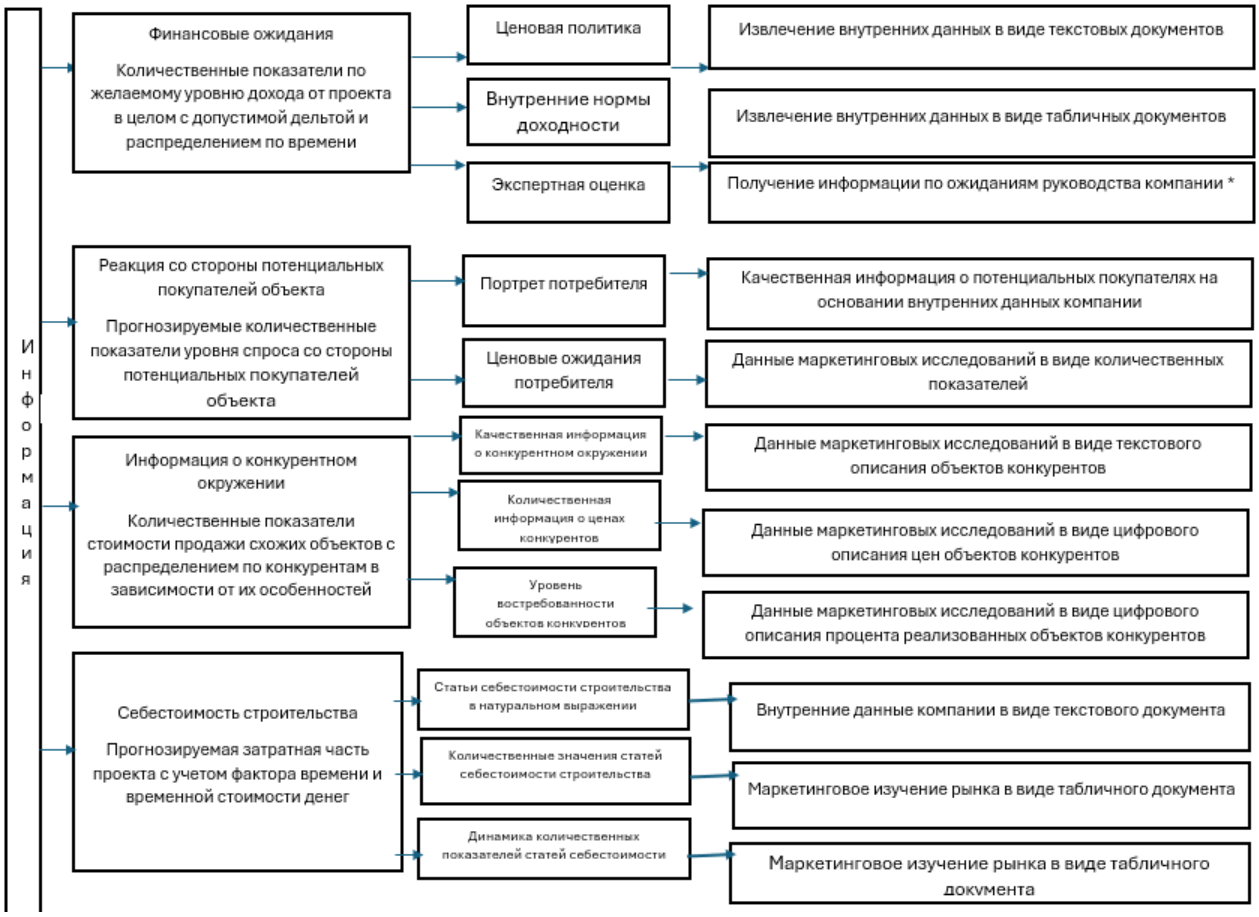


***Рис. 2**. Взаимосвязь системы показателей и источников данных для девелоперских компаний*

***Fig. 2**. The relationship between the system of indicators and data sources for development companies*

Следующим этапом формализации анализа маркетинговой информации являются построение моделей представления данных и формирование механизмов формирования единой модели данных девелоперской компании.

Заключение

В статье рассматриваются особенности формирования наборов данных для маркетинговых исследований, на основании которых формируются управленческие решения в цифровых экосистемах девелоперских компаний. Представлена модель управления маркетинговой информацией, разработанная в рамках цифровой экосистемы. Данные исследования играют важную роль в подготовке и консолидации данных внутри экосистемы.

Научный результат статьи заключается в комплексном подходе к созданию системы показателей и источников маркетинговой информации для формирования данных девелоперских компаний. Практическая ценность статьи – в разработке примера такой экосистемы, включая показатели и источники данных для компании в сфере девелопмента.

Будущие исследования в этой области будут направлены на использование маркетинговой информации, разработку сценарно-игровой и имитационной модели для взаимодействия участников цифровой экосистемы с целью принятия управленческих решений об эффективности управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maier M. W.* Architecting principles for systems-of-systems // Systems Engineering. 1998. Vol. 1. № 4. Pp. 267–284.

2. *Зиндер Е. З.* Расширяющаяся парадигма инжиниринга предприятия // Бизнес-информатика. 2017. С. 7–18. DOI: 10.17323/1998-0663.2016.4.7.18

3. *Axelsson Ja.* A Refined terminology on system-of-systems substructure and constituent system states // 2019 14th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). July 2019. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/SYSOSE.2019.8753846

4. *Кайла Мэтьюс.* 5 способов влияния Индустрии 4.0 на станки. Системный инжиниринг Dassault // Планета CAM. Информационно-аналитический электронный журнал. URL: https://www.planetacam.ru/articles/tekhnologii/5_Ways_Machine_Tools_Are_Impacted_by_Industry_4.0/?sphrase_id=65470 (дата обращения: 16.08.2025).

5. *Тельнов Ю. Ф., Мартышенко С. Н., Мартышенко Н. С., Кустов Д. А.* Выбор типа бизнес-модели для реализации стратегии цифровой трансформации сетевого предприятия // Бизнес-информатика. 2022. Т. 16. № 4. С. 50–66. DOI: 10.17323/2587-814X.2022.4.50.67

6. *Куликова О. М., Тропынина Н. Е.* Трансформация инструментов маркетинговых исследований в условиях цифровой экономики // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2020. № 2(44). С. 112–118.

7. *Фурманов П. А.* Цифровая маркетинговая аналитика данных как основа формирования стратегии цифрового маркетинга // Вестник науки. 2022. № 6(51). С. 25–32.

8. *Сафронов А. Ф.* Большие данные в маркетинговом исследовании // Теория и практика современной науки. 2019. № 8(50). С. 48–52.

9. *Арашев М.* Цифровые технологии в маркетинге: интеграция искусственного интеллекта и интернета вещей для улучшения эффективности кампаний // Вестник науки. 2023. № 10(67). С. 33–41.

10. *Новотна И. А., Иванчук О. В.* BI-системы: анализ понятия и функциональных возможностей // Теория и практика общественного развития. 2023. № 2(180). С. 57–62. DOI: 10.24158/tipor.2023.2.12

11. *Закускин С. В.* К вопросу о правомерности применения математико-статистических методов к исследовательским данным «неправильного» типа // Практический маркетинг. 2022. № 9(306). С. 14–20. DOI: 10.24412/2071-3762-2022-9306-3-23

12. *Левкин А. Г.* Роль системы маркетинговой аналитики в процессе построения клиентоориентированной стратегии компании // КЭ. 2021. № 1. С. 23–28. DOI: 10.18334/ce.15.1.111525

13. Exploring the Current Use of Data Analytics in Digital Marketing // Maryville University. URL: https://online.maryville.edu/blog/data-analytics-in-digital-marketing/ (дата обращения: 02.09.2025).

14. *Эрханов Ш.* Маркетинговые информационные системы и описание их содержания // Вестник науки. 2023. № 4(61). С. 29–35.

15. *Куневич С. Н.* Четвертая промышленная революция или BIM-технологии индустрии 4.0 в строительстве // Colloquium-journal. 2023. № 4(163). С. 45–52. DOI: 10.24412/2520-6990-2023-4163-6-9

16. *Маматкулова Ш. Ж.* Место и роль маркетинговых исследований в маркетинговой деятельности промышленных предприятий // Архивариус. 2020. № 8. С. 48–51.

17. *Прокофьев А. П.* Оценка уровня зрелости процессов ITSM // Глобус. 2020. № 4(50). С. 37–42.

18. *Сорока Е. Г.* К вопросу о внедрении концепции ITIL/ITSM в российской IT-отрасли // Вестник СИБИТа. 2014. № 4(12). С. 15–20.

19. *Шавлюга О. А.* Методика моделирования поведения предприятия в конкурентной среде // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D: Экономические и юридические науки. 2021. № 13. С. 63–70. DOI: 10.52928/2070-1632-2021-58-13-97-10

20. *Розанова Н. М.* Индустрия 5.0: золотой век или прыжок в темноту? // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. № 6. С. 105–115. DOI: 10.52180/2073-6487_2023_6_61_77

21. *Бабкин А. В., Корягин С. И., Либерман И. В. и др.* Индустрия 5.0: нейро-цифровой инструментарий стратегического целеполагания и планирования // ТТПС. 2022. № 3(61). С. 77–84.

22. *Бабкин А. В., Шкарупета Е. В., Плотников В. А.* Интеллектуальная киберсоциальная экосистема Индустрии 5.0: понятие, сущность, модель // ЭВР. 2021. № 4(70). С. 91–99.

23. *Vinitha K., Prabhu R.A., Bhaskar R., Hariharan R.* Review on industrial mathematics and materials at Industry 1.0 to Industry 4.0 // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. Pp. 3956–3960. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.331

24. *Rahim S.A., Fernando M.* Digitalization and leapfrogging strategy among the supply chain member: facing GIG economy and why should logistics players care? // International Journal of Supply Chain Management. 2019. Vol. 8. Pp. 1042–1048. DOI: 10.59160/ijscm.v8i2.3085

25. *Lu Y.* Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. 2017. Vol. 6. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005

26. *Sachsenmeier P.* Industry 5.0: the relevance and implications of bionics and synthetic biology // Engineering. 2016. Vol. 2. № 2. Pp. 225–229. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.02.015

27. *Fukuda K.* Science, technology and innovation ecosystem transformation toward Society 5.0 // International Journal of Production Economics. 2020. Vol. 220. Article 107460. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.07.033

28. *Брусакова И. А.* Информационный менеджмент цифровых трансформаций. 2024. С. 290–297. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-52

29. *Брусакова И. А., Васильев А. И.* Задачи бизнес-аналитики для зеленой экономики // Green economy – the economy of the future: innovations, investments and prospects: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ташкент, 24 апреля 2024 г. Ч. 1. С. 292–297. DOI: 10.5281/zenodo.11001634

REFERENCES

1. Maier M.W. Architecting principles for systems-of-systems. *Systems Engineering.* 1998. Vol. 1. No. 4. Pp. 267–284.

2. Zinder E.Z. The expanding paradigm of enterprise engineering. *Business Informatics.* 2017. Pp. 7–18. DOI: 10.17323/1998-0663.2016.4.7.18 (in Russian)

3. Axelsson Ja. A Refined terminology on system-of-systems substructure and constituent system states. In: 2019 14th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE), July 2019. DOI: 10.1109/SYSOSE.2019.8753846

4. System Engineering Dassault. PlanetCAM. *Information-Analytical Electronic Journal.* Available at: https://www.planetacam.ru/articles/tekhnologii/sistemnyy_inzhiniring_dassault/ (In Russian)

5. Telnov Yu.F., Martyshenko S.N., Martyshenko N.S., Kustov D.A. Selecting a business model type for implementing a digital transformation strategy for a network enterprise. *Business Informatics.* 2022. Vol. 16. No. 4. Pp. 50–66. DOI: 10.17323/2587-814X.2022.4.50.67 (In Russian)

6. Kulikova O.M., Tropynina N.E. Transformation of marketing research tools in the digital economy. *Innovative Economy: Prospects for Development and Improvement.* 2020. No. 2(44). Pp. 112–117. (In Russian)

7. Furmanov P.A. Digital marketing data analytics as the basis for developing a digital marketing strategy. *Bulletin of Science.* 2022. No. 6(51). Pp. 27–34. (In Russian)

8. Safronov A.F. Big data in marketing research. *Theory and Practice of Modern Science.* 2019. No. 8(50). Pp. 41–47. (In Russian)

9. Arashev M. Digital technologies in marketing: integration of artificial intelligence and the internet of things to improve campaign efficiency. *Bulletin of Science.* 2023. No. 10(67). Pp. 59–65. (In Russian)

10. Novotna I.A., Ivanchuk O.V. BI systems: concept and functional capabilities. *Theory and Practice of Social Development*. 2023. No. 2(180). Pp. 121–127. DOI: 10.24158/tipor.2023.2.12. (In Russian)

11. Zakuskin S.V. On the legitimacy of applying mathematical and statistical methods to research data of the "Incorrect" type. *Practical Marketing.* 2022. No. 9(306). Pp. 18–23. DOI: 10.24412/2071376220229306323. (In Russian)

12. Lyovkin A.G. The role of a marketing analytics system in building a customer-oriented company strategy. *KE*. 2021. No. 1. Pp. 33–38. DOI: 10.18334/ce.15.1.111525. (in Russian)

13. Exploring the current use of data analytics in digital marketing. *Maryville University.* Available at: https://online.maryville.edu/blog/data-analytics-in-digitalmarketing/ (accessed 16.08.2025).

14. Erkhanov Sh. Marketing information systems and their content description. *Bulletin of Science*. 2023. No. 4(61). Pp. 77–83. (In Russian)

15. Kunevich S.N. The fourth industrial revolution or BIM technologies of Industry 4.0 in construction. *Colloquium Journal*. 2023. No. 4(163). Pp. 90–94. DOI: 10.24412/2520-6990-2023-4163-6-9. (In Russian)

16. Mamatkulova Sh.Zh. The place and role of marketing research in the marketing activities of industrial enterprises. *Archivarius.* 2020. No. 8. Pp. 48–51. (in Russian)

17. Prokofiev A.P. Assessment of ITSM process maturity levels. *Globus.* 2020. No. 4(50). Pp. 66–71. (In Russian)

18. Soroka E.G. On the implementation of ITIL/ITSM concepts in the Russian IT industry. *Vestnik SIBITa*. 2014. No. 4(12). Pp. 57–61. (In Russian)

19. Shavlyuga O.A. Methodology for modeling enterprise behavior in a competitive environment. *Bulletin of Polotsk State University.* Series D: *Economics and Law.* 2021. No. 13. Pp. 142–148. DOI: 10.52928/2070-1632-2021-58-13-97-10. (In Russian)

20. Rozanova N.M. Industry 5.0: golden age or leap into Darkness? *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2023. No. 6. Pp. 88–95. DOI: 10.52180/2073-6487_2023_6_61_77. (In Russian)

21. Babkin A.V., Koryagin S.I., Liberman I.V. et al. Industry 5.0: neuro-digital tools for strategic goal-setting and planning. *TTPS.* 2022. No. 3(61). Pp. 54–60. (In Russian)

22. Babkin A.V., Shkarupeta, E.V., Plotnikov V.A. Intellectual cyber-social ecosystem of industry 5.0: concept, essence, model. *EVR.* 2021. No. 4(70). Pp. 101–108. (In Russian)

23. Vinitha K., Prabhu R.A., Bhaskar R., Hariharan R. Review on industrial mathematics and materials at industry 1.0 to Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 33. Pp. 3956–3960. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.331

24. Rahim S.A., Fernando M. Digitalization and leapfrogging strategy among supply chain members: facing the gig economy and why logistics players should care. *International Journal of Supply Chain Management*. 2019. Vol. 8. Pp. 1042–1048. DOI: 10.59160/ijscm.v8i2.3085

25. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*. 2017. Vol. 6. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005

26. Sachsenmeier P. Industry 5.0: the relevance and implications of bionics and synthetic biology. *Engineering.* 2016. Vol. 2. No. 2. Pp. 225–229. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.02.015

27. Fukuda K. Science, technology and innovation ecosystem transformation toward society 5.0. *International Journal of Production Economics.* 2020. Vol. 220. article 107460. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.07.033

28. Brusakova I.A. Information management of digital transformations. 2024. Pp. 290–297. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-52. (In Russian)

29. Brusakova I.A., Vasiliev A.I. Business analytics tasks for the green economy. In: *Proc. of the International Scientific and Practical Conference "Green Economy – The Economy of the Future: Innovations, Investments and Prospects"*, Tashkent, April 24. 2024. Part 1. Pp. 292–297. DOI: 10.5281/zenodo.11001634. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Васильев Алексей Игоревич, аспирант кафедры «Инновационный менеджмент», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»;
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5;
avasilyev@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3548-2162

Information about the author

Alexey I. Vasilyev, Postgraduate Student, Department of Innovative Management, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI";
5, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197022, Russia;
avasilyev@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3548-2162

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЭКОНОМИКЕ

УДК 004.89 Научная статья

https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-175-187

GNOIMN

Нечеткий метаэвристический метод распределения сотрудников по задачам проекта

Д. Д. Ярцев[1], М. Ю. Воротилова✉[2], С. В. Мордвин[2]

[1]Росинформагротех
141261, Россия, Московская область, Пушкинский г.о., р.п. Правдинский, Лесная улица, 60
[2]Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске
214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1

Аннотация. Планирование реализации проекта играет ключевую роль в проектном управлении, особенно в условиях стремительного усложнения современных проектов и ограниченности ресурсов.

Цель исследования – разработка метода оптимального распределения сотрудников по задачам проекта, минимизирующего перегрузку персонала и обеспечивающего соблюдение временных и бюджетных ограничений.

Материалы и методы. Для решения задачи предложен гибридный метод, объединяющий алгоритм Worm Optimization, моделирующий поведение червей Caenorhabditis elegans в процессе поиска пищи, и нечеткий метод кластеризации FCM, применяемый для сужения пространства возможных решений. В работе для реализации предложенного метода использовались библиотеки NetworkX, Scikit-Fuzzy, Matplotlib и Plotly языка Python. Для снижения размерности пространства поиска применена нечеткая кластеризация FCM, которая позволила выделить кластер решений, характеризующий наиболее подходящих сотрудников с точки зрения командных характеристик.

Результаты. В рамках исследования был реализован программный инструмент на языке Python, который позволяет в автоматизированном режиме распределять задачи между исполнителями. Также был проведен вычислительный эксперимент для оценки эффективности предложенного метода и сравнения результатов его работы с популярным биоинспирированным алгоритмом Ant Colony Optimization, характеризующимся схожими моделями поведения агентов в процессе поиска решений.

Выводы. Результаты валидации показали преимущество гибридного метода по сравнению с базовым алгоритмом Worm Optimization и алгоритмом Ant Colony Optimization, о чем свидетельствуют более низкие значения целевой функции и сокращение перегрузок сотрудников, подтверждающие эффективность применения метода в задачах распределения исполнителей по задачам проекта.

Ключевые слова: управление персоналом, условная многокритериальная оптимизация, метаэвристики, алгоритм оптимизации «червя», нечеткая кластеризация

Поступила 23.10.2025, одобрена после рецензирования 17.11.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Ярцев Д. Д., Воротилова М. Ю., Мордвин С. В. Нечеткий метаэвристический метод распределения сотрудников по задачам проекта // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 175–187. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-175-187

© Ярцев Д. Д., Воротилова М. Ю., Мордвин С. В., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

MSC: 90C59 Original article

Fuzzy metaheuristic method for allocating employees to project tasks

D.D. Yartsev[1], M.Yu. Vorotilova✉[2], S.V. Mordvin[2]

[1]Rosinformagrotech
60, Lesnaya street, Pushkinsky Urban District, Pravdinsky Urban Settlement, Moscow Region, 141261, Russia
[2]Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk
1, Energetichesky proezd, Smolensk, 214013, Russia

Abstract. Project implementation planning plays a key role in project management, especially in the context of rapidly increasing project complexity and resource constraints.

Aim. This study was to develop a method for optimally distributing project staff across tasks, minimizing staff overload and ensuring adherence to time and budget constraints.

Materials and methods. To solve this problem, we proposed a hybrid method combining the Worm Optimization algorithm, which models the foraging behavior of Caenorhabditis elegans worms, and the fuzzy clustering method FCM, which is used to narrow the solution space. The Python libraries NetworkX, Scikit-Fuzzy, Matplotlib, and Plotly were used to implement the proposed method. To reduce the search space dimensionality, fuzzy clustering FCM was used, enabling the identification of a solution cluster characterizing the most suitable employees in terms of team characteristics.

Results. As part of the study, a software tool in Python has been implemented that enables automated task distribution among performers. A computational experiment has also been conducted to evaluate the effectiveness of the proposed method and compare its results with those of the popular bioinspired Ant Colony Optimization algorithm, which is characterized by similar agent behavior patterns during solution search.

Conclusions. The validation results demonstrate the advantage of the hybrid method over the basic Worm Optimization algorithm and Ant Colony Optimization, as evidenced by lower objective function values and reduced employee overload, confirming the method's effectiveness in assigning project performers to tasks.

Keywords: human resource management, conditional multicriteria optimization, metaheuristics, “Worm Optimization”, fuzzy clustering

Submitted 23.10.2025, approved after reviewing 17.11.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Yartsev D.D., Vorotilova M.Yu., Mordvin S.V. Fuzzy metaheuristic method for allocating employees to project tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 175–187. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-175-187

Введение

Планирование является одной из ключевых функций проектного управления, от качества которого зависят сроки завершения проекта, эффективность использования ресурсов и достижение конечных целей [1]. Современные проекты характеризуются нарастанием степени их сложности, что связано с рядом факторов:

- рост масштабов и этапности за счет увеличения количества задач;
- ужесточение требований к срокам и бюджету проектов, ограничениям по использованию ресурсов вследствие повышения конкуренции, ускорения технологического развития и ограниченности ресурсов;

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

• нарастание сложности зависимостей между отдельными задачами из-за необходимости синхронизации действий разных участников проекта;

• необходимость оперативного внесения изменений из-за высокой изменчивости внешних условий, оказывающих влияние на проекты.

Усложнение факторов реализации современных проектов оказывает значительное влияние на процессы проектного управления, повышая трудоемкость их выполнения. Особенно это проявляется в наукоемких и высокотехнологичных отраслях (например, в инженерных, производственных, исследовательских и ИТ-проектах), где ошибки при планировании оказывают сильное негативное влияние на сроки достижения конечного результата, качество работ и величину издержек [2].

Важным фактором, усложняющим процессы проектного планирования, является необходимость рационального распределения человеческих ресурсов. В условиях ограниченности квалифицированных специалистов, высокой загрузки персонала и их параллельного участия в нескольких проектах становится критически важным оптимально распределять задачи между сотрудниками с учетом их занятости [3, 4]. Ручная реализация данной задачи в условиях высокой сложности проектов является трудоемкой из-за необходимости учета большого количества аспектов (характеристики исполнителей, временные и бюджетные ограничения и пр.) и подверженной субъективным ошибкам [5, 6]. Вышесказанное обусловливает необходимость использования программных средств, позволяющих в автоматизированном режиме определять оптимальное распределение сотрудников по задачам проекта с учетом ограничений, а также своевременно адаптировать решение при изменении условий реализации проекта.

Формализация задачи распределения человеческих ресурсов по задачам проекта

При планировании проекта необходимо учитывать не только последовательность и сроки выполнения задач, но и распределение человеческих ресурсов, от которого зависит эффективность использования рабочего времени исполнителей. В задаче требуется определить назначение сотрудников на конкретные задачи проекта с учетом их доступности и ресурсных ограничений.

Рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач оптимизации, поскольку включает несколько критериев (минимизацию общего времени выполнения проекта, максимизацию соответствия сотрудников требованиям задач, минимизацию перегрузки персонала). Для решения таких задач применяются два метода [7]:

• сведение к одному основному критерию эффективности;

• поиск решения при равной значимости всех критериев оптимизации.

В задаче используется метод выделения главного критерия, который позволяет свести задачу к однокритериальной форме [8]. В качестве основного критерия оптимизации выбрана минимизация неравномерности загрузки исполнителей, тогда как временные и бюджетные рамки рассматриваются в качестве пороговых ограничений задачи. Использование такого метода корректно только при условии, что для критериев, принимаемых в качестве ограничений, заданы допустимые пороговые значения, что означает необходимость предварительного выбора допустимых диапазонов значений, определяемых на основе выделенного бюджета и установленных временных рамок проекта. Такие ограничения предполагают, что лицо, принимающее решения, заранее устанавливает значения порогов для всех второстепенных критериев. Однако слишком строгие

пороговые значения могут привести к пустой области допустимых решений и, соответственно, невозможности найти оптимальное распределение сотрудников, удовлетворяющее всем ограничениям одновременно. Для решения проблемы возникновения пустой области решений на первом этапе производится проверка допустимости заданного набора ограничений с применением быстрого предварительного поиска решений. Если в его результате выявляется отсутствие допустимых решений, значения порогов автоматически ослабляются в контролируемых пределах (увеличиваются на 5–7 %). После этого производится повторная проверка разрешимости задачи. Такой итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет найден набор порогов, при котором задача становится выполнимой. При этом корректировка порогов производится в рамках существующих резервов, при достижении лимита резервов данный итерационный процесс корректировки пороговых значений останавливается. Таким образом, среди множества возможных распределений сотрудников по задачам проекта необходимо найти такое решение, которое обеспечит минимум целевой функции Z:

$$Z(t) \to \min_{z \in Z},$$

$$Z = \sum_{j=1}^{N} \max(0, \sum_{i=1}^{M} r_{ij} \cdot t_{ij} - t_j^{norm}),$$

где j – номер сотрудника; N – общее количество сотрудников; t_j^{norm} – максимальная загрузка j-го сотрудника; M – общее количество задач; $r_{ij}=\{0,1\}$ – назначение j-го сотрудника на i-ю задачу ($r_{ij}=1$ – если j-й сотрудник назначен на i-ю задачу; $r_{ij}=0$ – если не назначен); t_{ij} – время выполнения i-й задачи j-м сотрудником.

При этом важно соблюдение следующих ограничений:

$$T \le T_{\max}, \text{ где } T = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{M} t_{ij},$$

$$\sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{M} (t_{ij} \cdot c_j) \le S_{\max},$$

где T – общее время выполнения проекта; T_{max} – максимальная длительность проекта; c_j – стоимость часа работы j-го сотрудника; S_{max} – максимально допустимый бюджет проекта.

Использование метода выделения главного критерия упрощает поиск решений и снижает вычислительную сложность, позволяя получить оптимальное распределение сотрудников, так целевая функция минимизирует и перегрузку персонала, и общий срок реализации проекта.

Математические методы решения задач условной оптимизации

Традиционные автоматизированные платформы управления проектами *PMIS* (*Project Management Information Systems*), такие как *Microsoft Project*, *Primavera* и аналогичные, ориентированы на реализацию базовых функций планирования. Они позволяют формировать графики задач, учитывать сложные взаимосвязи и ресурсы, но не обеспечивают автоматизированный поиск оптимального распределения сотрудников с учетом их загрузки и бюджетных ограничений. Изменение условий проекта требует ручного

пересмотра назначений, что увеличивает трудозатраты и снижает оперативность управления ресурсами. В таких условиях поиск эффективного метода распределения сотрудников по задачам проекта является актуальной исследовательской задачей. Методы оптимизации позволяют в автоматизированном режиме формирование распределения персонала [9].

За последние годы исследования в области управления распределением человеческих ресурсов показали тенденцию: по мере роста сложности задач классические методы становятся неприменимы, и актуальность гибридных и стохастических методов возрастает. С точки зрения математической оптимизации выделяют либо точные детерминированные методы, либо стохастические при больших пространствах решений. Наибольшее развитие получили биоинспирированные методы, имитирующие коллективное поведение организмов и способные исследовать пространство решений локально и глобально, что позволяет находить решения, близкие к оптимальным. На основе обзора методов многокритериальной оптимизации распределения сотрудников [10], анализирующего 52 научные работы, выделены основные подходы для решения таких задач. Наиболее распространенными являются эволюционные алгоритмы, включая генетические алгоритмы (*NSGA-II, SPEA2, MOEA/D*) и их гибридные версии с локальным поиском и другими эвристиками (*Adachi N., Kobayashi S., Moz M., Respicio A., Drechsler N., Hamid M., Huang L.*); математическое программирование, включая MILP/ILP и goal programming, (*Burke E.K., Azaiez M.N., Al Sharif S.S., Ang B.Y., Topaloglu S., Rihm T., Baumann P., Ferland J.A.*). Обзоры последних лет подчеркивают следующие ключевые направления решений, которые сейчас активно изучаются: гибридизация с методами кластеризации для уменьшения пространства поиска, учет неопределенностей путем интеграции с элементами нечеткой логики и пр. [11]. Основные неразрешенные проблемы связаны с тем, что современные методы не полностью покрывают реальные потребности реальных задач распределения персонала. Среди ключевых проблем выделяют: проблему масштабируемости метода при росте объемов обрабатываемой информации, учет неопределенности и необходимости оперативного реагирования на изменения и пр. Для решения задачи распределения человеческих ресурсов предлагается использовать методы глобальной оптимизации, которые делятся на два класса. Первый класс применяется, когда связь между признаками жестко детерминирована, и исследование приводит к однозначному решению. Однако в условиях больших пространств возможных распределений такие методы применимы ограниченно, в таких ситуациях используются стохастические методы. Эта группа включает метаэвристики, методы основаны на алгоритмах, имитирующих природные явления или интеллектуальное поведение живых организмов в природе. Их поведение позволяет поисковым единицам обмениваться информацией о лучших вариантах, эффективно исследовать пространство решений и сходиться к глобально оптимальному распределению.

Гибридный алгоритм оптимизации «червя» для распределения сотрудников по задачам проекта

В рамках задачи рассматривается распределение сотрудников по задачам проекта. Для распределения сотрудников по задачам проекта предлагается гибридный метод, объединяющий нечеткий метод кластеризации *Fuzzy C-means* (*FCM*) и базовый биоинспирированный алгоритм *Worm Optimization* (*WO*). На первом этапе выполняется кластеризация сотрудников с использованием *FCM* с целью выделения кластеров, внутри которых

сотрудники обладают близкими характеристиками [12]. В рамках решаемой задачи кластеризация не является самостоятельной целью, а используется как вспомогательный этап, позволяющий уменьшить размер пространства решений. В связи с тем, что метод *FCM* довольно прост в настройке и реализован в стандартных библиотеках (например, Scikit-fuzzy), это делает его удобным для использования и интеграции с другими методами. При небольших выборках данных, характерных для проектных команд, более сложные модификации *FCM* (*AFCM*, *FPCM*, *RFCM* и др.) не обеспечивают существенный прирост качества и требуют более тщательной настройки параметров метода. Поэтому базовый *FCM* является наиболее рациональным вариантом.

Процесс кластеризации сотрудников включает несколько этапов. Изначально случайным образом инициализируются центры кластеров, после чего вычисляются степени принадлежности сотрудников к каждому кластеру на основе расчета евклидова расстояния до центров кластеров. Алгоритм кластеризации *FCM* является нечетким, поэтому каждая точка может принадлежать нескольким или всем кластерам с различной степенью принадлежности. На основе значений степеней принадлежности центры кластеров корректируются, для чего вычисляется взвешенное среднее всех сотрудников, где весами выступают степени принадлежности к определенному кластеру, возведенные в степень m – экспонента нечеткой матрицы разбиения (равна 2; объект может частично принадлежать нескольким кластерам, но более похожие объекты получают больший вес).

Параметры алгоритма *FCM* задаются экспертом на основе предварительного анализа данных. В этой задаче количество кластеров выбрано 3, поскольку при таком значении достигается оптимальный баланс между однородностью групп сотрудников и устойчивостью кластеризации; максимальное количество итераций установлено равным 100, что обеспечивает достаточный запас для стабильной сходимости без избыточных вычислений; минимальное улучшение целевой функции выбрано равным $\varepsilon = 10^{-5}$, что позволяет зафиксировать момент, когда изменение центров кластеров становится практически незначимым и дальнейшие итерации не улучшают качество разбиения. Для каждого сотрудника формируются нечеткие функции на основе его характеристик (навыки, опыт, коммуникативные качества), которые нормируются в диапазоне [0;1] и преобразуются в значения принадлежности с помощью гауссовых функций. Аналогично для каждой задачи формируются нечеткие требования к компетенциям исполнителей. В ситуации, когда на задачу назначено несколько сотрудников, нечеткие значения агрегируются путем усреднения, что позволяет получить интегральную оценку командной пригодности. После завершения кластеризации выбирается кластер, где ключевым свойством участников является способность эффективно взаимодействовать при выполнении совместных задач, что позволяет ограничить поиск решений внутри данной команды и тем самым сузить пространство возможных назначений [13]. На втором этапе применяется *WO*-алгоритм для поиска оптимального распределения сотрудников в пределах выбранного кластера по задачам проекта. Алгоритм имитирует поведение червя рода *Caenorhabditis elegans,* обладающего способностью находить пищу, избегать токсинов, вести поиск группами или индивидуально, перемещаться между локальными и глобальными зонами исследования и переключаться между стадиями активности и размножения [14]. Алгоритм работы предложенного нечеткого метода представлен на рисунке 1.



***Рис. 1**. Алгоритм работы предложенного метода*

***Fig. 1**. The proposed method algorithm*

В начале работы алгоритма формируется граф задач проекта, где узлы – задачи, а дуги – возможные пути перемещения червя. Для работы *WO*-алгоритма задаются следующие «свободные» параметры: количество червей, максимальное количество червей при размножении, соотношение между социальным и уединенным поведением червей, процент локального поиска, количество итераций локального поиска, количество решений без улучшений, интенсивность воспроизводства червей, фактор неудачного решения, коэффициент обновления феромонов, максимальное количество итераций выполнения алгоритма. *WO*-алгоритм моделирует аспекты поведения червей *C. elegans*. Так, в алгоритме реализован двойной стиль поиска, предполагающий, что в условиях «высокого качества пищи» (при улучшении текущего результата) червь выполняет локальный поиск вблизи найденной позиции, а при «низком качестве пищи» переключается на глобальный поиск, удаляясь для исследования новых областей (механизм избежания токсинов).

При длительном отсутствии улучшений червь впадает в стазис, его шаги уменьшаются, что снижает ненужные перемещения в бесперспективных зонах, и наоборот, при хороших условиях популяция может расширяться за счет добавления новых червей, усиливая исследование перспективной области. Работа алгоритма зависит от ряда параметров, отражающих биологические особенности червей: от качества пищи зависит ориентация

на локальный и глобальный поиск; концентрация червей определяет интенсивность коллективного поведения (при высокой концентрации усиливается социальный поиск, при низкой – индивидуальный); число итераций без улучшения используется как сигнал о неблагоприятных условиях (при превышении заданного порога активируется стадия стазиса или происходит переключение на глобальный поиск). Такое поведение позволяет алгоритму балансировать между разведкой пространства и эксплуатацией найденных перспективных решений, избегать стагнации и стабильно находить решения в задачах распределения сотрудников по задачам проекта. Работа алгоритма завершается, и выводится оптимальное распределение сотрудников по задачам, когда достигается условие останова (количество итераций достигло заданного значения). Критерием оценки полученного решения является значение неравномерности загрузки сотрудников, а также проверка на соответствие ограничениям задачи.

Программная реализация предложенного метода

Программная реализация предложенного гибридного метода распределения сотрудников по задачам проекта производилась на языке *Python*. Важным критерием его выбора являлось наличие готовых библиотек, упрощающих процессы работы с метаэвристиками, нечеткой логикой и графами, а также с визуализацией результатов работы алгоритма [15]. Так, в процессе разработки метода были использованы следующие библиотеки [16]:

- библиотека *NetworkX* для создания, изучения и работы с графами;
- библиотека *Scikit-Fuzzy* для работы с нечеткой логикой;
- библиотеки *Matplotlib* и *Plotly* для визуализации работы алгоритма.

Для подтверждения того, что улучшение распределения сотрудников по задачам проекта не является случайным, а обусловлено особенностями предложенного алгоритма, проведена оценка его статистической значимости (табл. 1), которая проводилась на 30 независимых запусках, и значения целевой функции сравнивались со значениями целевой функции, полученной в результате полного перебора. Оценка проводилась на малой тестовой выборке, где возможен полный перебор (5 сотрудников и 5 задач; полный перебор позволил оценить все возможные распределения – 2^{25}).

Таблица 1. Оценка статистической значимости метода

Table 1. Evaluation of the method statistical significance

Метод	Среднее значение целевой функции, час.	Стандартное отклонение, %	Время работы, час.
Fuzzy Worm Optimization	0,75	0,01	0,53
Полный перебор	0,74	0	5

Среднее значение целевой функции для предложенного метода составило 0,75 часа, а эталонное – 0,74 часа, это подтверждает, что разработанный метод формирует распределение сотрудников по задачам, максимально приближенное к эталонному. Проверка адекватности метода проводилась путем сравнения результатов его работы с результатами работы базового *WO*-алгоритма и популярного *ACO*-алгоритма, схожего моделями поведения поисковых агентов [17]. Результаты валидации представлены в таблице 2. Тестирование работы алгоритмов проводилось на выборке данных из 35 сотрудников и проекте, который включает 15 задач с различными требованиями и ограничениями. После кластеризации выбран кластер, в котором оказалось 12 сотрудников, которые участвовали в распределении. Как видно из таблицы 2, предложенный метод уступает другим в быстроте выполнения, однако обеспечивает наименьшее значение целевой функции.

Таблица 2. Результаты валидации разработанного гибридного метода

Table 2. Results of validation of the developed hybrid method

Показатель	*Fuzzy Worm Optimization*	*Worm Optimization*	*Ant Colony Optimization*
Общее время работы, мин.	32,2	27	28,6
Значение целевой функции, час	0,75	0,79	0,83
Количество итераций до сходимости алгоритма, ед.	73	77	76

Для проверки эффективности разработанного метода проведено тестирование на наборе функций из международного бенчмарка *CEC*-2017, который содержит 29 функций. В рамках тестирования использовался набор функций из четырех классов: унимодальные (*F1*), мультимодальные (*F9*), гибридные (*F17*) и композиционные (*F23*). Полученные результаты сопоставлены с результатами базовых *WO*- и *ACO*-алгоритмов. Количество запусков составило 30, количество итераций 1000, средние значения лучшего решения за 30 запусков представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты тестирования на бенчмарке *CEC*-2017

Table 3. CEC-2017 benchmark test results

Функция/алгоритм	*Fuzzy Worm Optimization*	*Worm Optimization*	*Ant Colony Optimization*
F1 Sphere (Unimodal)	$1{,}2\times10^{-6}$	$4{,}9\times10^{-6}$	$7{,}3\times10^{-6}$
F9 Rastrigin (Multimodal)	0,42	1,87	3,12
F17 Hybrid 3 (Hybrid)	8,3	14,6	20,4
F23 Composition 4 (Composition)	32,7	49,1	61,5

Нечеткий *WO*-алгоритм показывает лучшие результаты по сравнению с базовой версией алгоритма на всех типах функций, что связано со способностью *FCM* уменьшать риск преждевременной сходимости за счет формирования более устойчивых к шуму пространств решений. *ACO*-алгоритм показал высокую вариативность и меньшую устойчивость к сложным композиционным поверхностям. Для оценки чувствительности метода к управляющим параметрам проводился эксперимент (табл. 4), в котором рассчитывалось среднее значение целевой функции и время работы алгоритма при варьировании параметров «локальный/глобальный поиск», «максимальное количество итераций без улучшений».

Таблица 4. Оценка чувствительности метода к управляющим параметрам

Table 4. Evaluation of the sensitivity of the method to control parameters

Локальный/ глобальный поиск, %	Макс. кол-во итераций без улучшений, ед.	Среднее значение целевой функции, час.	Стандартное отклонение, %	Среднее время работы, мин.
70/30	10	0,79	0,020	29,0
70/30	20	0,77	0,018	30,5
70/30	30	0,76	0,015	31,2
70/30	40	0,75	0,014	32,0
50/50	10	0,78	0,018	30,5
50/50	20	0,76	0,015	31,2
50/50	30	0,75	0,014	32,0
50/50	40	0,74	0,013	33,1
30/70	10	0,79	0,020	30,0
30/70	20	0,77	0,018	31,0
30/70	30	0,76	0,016	31,8
30/70	40	0,75	0,015	32,5

Видно, что увеличение процента локального поиска повышает скорость сходимости алгоритма и показывает более низкие значения целевой функции, однако слишком высокий локальный поиск увеличивает риск преждевременной сходимости, особенно при малом числе итераций без улучшений. Высокий процент глобального поиска снижает риск застревания в локальных минимумах, но средние значения целевой функции слегка ухудшаются. Увеличение порога с 10 до 40 итераций позволяет червям дольше искать улучшения и переключаться на глобальный поиск, что снижает значение целевой функции и уменьшает стандартное отклонение. Высокий локальный поиск и достаточное число итераций без улучшений позволяют находить оптимальные решения при разумных затратах времени. Нечеткий *WO* практически достигает оптимального решения и при этом требует меньше времени, что делает его эффективным для распределения сотрудников по проектным задачам.

Заключение

Предполагается, что разработанный гибридный метод оптимизации, интегрирующий преимущества метаэвристики, инспирированной поведением червей *C. elegans*, с нечетким методом кластеризации *FCM*, позволит формировать в автоматизированном режиме распределение сотрудников по задачам проекта. Практическая ценность метода подтверждается результатами его валидации, алгоритм обеспечивает распределение, близкое к эталонному. Применение метода в реальных процессах позволит повысить эффективность управления проектами, снижая субъективный фактор и затраты времени на ручное планирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рубин Ю. Б.* Менеджмент участия в конкуренции как направление научных исследований // Современная конкуренция. 2024. Т. 18. № 1(97). С. 69–91. DOI: 10.37791/2687-0657-2024-18-1-69-91

2. *Дли М. И., Стоянова О. В., Белозерский А. Ю.* Модель оценки траекторий для управления проектами в сфере наукоемкой промышленной продукции // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 6(60). С. 105–117.

3. *Комарова Л. А., Черемухин А. Д.* Повышение эффективности методов подбора персонала на основе глубоких нейронных сетей // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 2(110). С. 10–22. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-2-10-22

4. *Булыгина О. В., Ярцев Д. Д., Кулясов Н. С. и др.* Нечеткий биоинспирированный метод формирования набора кандидатов на линейные должности // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 2(116). С. 4–23. DOI 10.37791/2687-0649-2025-20-2-4-23

5. *Калинин А. Р., Зуева Н. А.* Создание и применение графовых моделей к задачам найма сотрудников // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 3(117). С. 43–65. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-3-43-65

6. *Глазкова А. С., Тутов С. В., Рожков В. В.* Формирование конкурентоспособного кадрового потенциала химических предприятий с использованием многоэтапного механизма целевого обучения в вузах // Современная конкуренция. 2025. Т. 19. № 1(103). С. 38–51. DOI: 10.37791/2687-0657-2025-19-1-38-51

7. *Епихин А. И.* Оптимизация параметров рабочего процесса судовых двигателей на основе метода многокритериальной оптимизации // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4-1. С. 53–57. DOI: 10.37220/MIT.2023.62A.006

8. *Jayan C.Ya., Malykhnia G.F.* Multi-criterion optimization of control process based on DPCA and ANN // Systems analysis in design and management. 2024. С. 7–14. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-492

9. *Еремина И. И.* Математическая модель решения оптимизационной задачи распределения производственных и трудовых ресурсов предприятия // X Международная научно-практическая конференция «ЭТАП-2023»: материалы конференции. Набережные Челны: КФУ, 2024. С. 608–621.

10. *Böðvarsdóttir E.B., Stidsen T.* A review of multi-objective optimization methods for personnel rostering problems // Journal of Scheduling. 2025. DOI: 10.1007/s10951-025-00845-0

11. *Rodríguez-Ballesteros S., Alcaraz J., Anton-Sanchez L.* Metaheuristics for the bi-objective resource-constrained project scheduling problem with time-dependent resource costs: An experimental comparison // Computers & Operations Research. 2024. С. 163. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106489

12. *Yang J., Qiu A., Yang Zh.* Fuzzy clustering method with approximate orthogonal regularization // Applied Soft Computing. 2023. Vol. 147. Pp. 110829. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110829

13. *Nesamalar K. E., Satheeshkumar J., Amudha T.* Efficient DNA-ligand interaction framework using fuzzy C-means clustering based glowworm swarm optimization (FCMGSO) method // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. 2023. Vol. 41. № 13. Pp. 6249–6261. DOI: 10.1080/07391102.2022.2105958

14. *Arnaout J-P.* A worm optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times // Annals of Operations Research. 2020. vol. 285. Pp. 273–293. DOI 10.1007/s10479-019-03138-w

15. *Дли М. И., Пучков А. Ю., Максимкин М. В.* Программная модель интеллектуальной системы управления сложными процессами переработки мелкорудного сырья // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 6(114). С. 96–112. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112

16. *Галимуллин Н. Р.* Python: использование Python для автоматизации повседневных задач // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 9. № 9(150). С. 69–76. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.09.09.010

17. *Dorigo M., Birattari M., Stützle T.* Ant Colony Optimization // Computational Intelligence Magazine. 2006. Vol. 1. Pp. 28–39.

REFERENCES

1. Rubin Yu.B. Management of participation in competition as a field of scientific research. *Journal of Modern Competition*. 2024. Vol. 18. No. 1(97). Pp. 69–91. DOI: 10.37791/2687-0657-2024-18-1-69-91. (In Russian)

2. Dli M.I., Stoyanova O.V., Belozersky A.Yu. A trajectory assessment model for project management in the field of high-tech industrial products. *Journal of Applied Informatics.* 2015. Vol. 10. No. 6(60). Pp. 105–117. (In Russian)

3. Komarova L.A., Cheremuhin A.D. Increasing the efficiency of recruitment based on deep neural networks. *Journal of Applied Informatics.* 2024. Vol. 19. No. 2(110). Pp. 10–22. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-2-10-22. (In Russian)

4. Bulygina O.V., Yartsev D.D., Kulyasov N.S. et al. Fuzzy bioinspired method for forming a set of candidates for linear positions. *Journal of Applied Informatics*. 2025. Vol. 20. No. 2(116). Pp. 4–23. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-2-4-23. (In Russian)

5. Kalinin A.R., Zueva N.A. Creation and application of graph models for employee recruitment tasks. *Journal of Applied Informatics*. 2025. Vol. 20. No. 3. Pp. 43–65. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-3-43-65. (In Russian)

6. Glazkova A.S., Tutov S.V., Rozhkov V.V. Formation of personnel potential of chemical enterprises using multi-stage mechanism of target set of applicants of universities. *Journal of Modern Competition*. 2025. Vol. 19. No. 1. Pp. 38–51. DOI: 10.37791/2687-0657-2025-19-1-38-51. (In Russian)

7. Epikhin A.I. Optimization of working process parameters of marine engines based on the method of multicriteria optimization. *Marine Intelligent Technologies*. 2023. No. 4-1. Pp. 53–57. DOI: 10.37220/MIT.2023.62A.006. (In Russian)

8. Jayan C.Ya., Malykhnia G.F. Multi-criterion optimization of control process based on DPCA and ANN. *Systems analysis in design and management.* 2024. Pp. 7–14. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-492

9. Eremina I.I. Mathematical model for solving the optimization problem of distribution of production and labor resources of an enterprise. *X Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «ETAP-2023».* Naberezhnye Chelny, KFU. 2024. Pp. 608–621. (In Russian)

10. Böðvarsdóttir E.B., Stidsen T. A review of multi-objective optimization methods for personnel rostering problems. *Journal of Scheduling*. 2025. DOI: 10.1007/s10951-025-00845-0

11. Rodríguez-Ballesteros S., Alcaraz J., Anton-Sanchez L. Metaheuristics for the bi-objective resource-constrained project scheduling problem with time-dependent resource costs: An experimental comparison. *Computers & Operations Research*. 2024. Pp. 163. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106489

12. Yang J., Qiu A., Yang Zh. Fuzzy clustering method with approximate orthogonal regularization. *Applied Soft Computing*. 2023. Vol. 147. Pp. 110829. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110829

13. Nesamalar K.E., Satheeshkumar J., Amudha T. Efficient DNA-ligand interaction framework using fuzzy C-means clustering based glowworm swarm optimization (FCMGSO) method. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2023. Vol. 41. No. 13. Pp. 6249–6261. DOI: 10.1080/07391102.2022.2105958

14. Arnaout J-P. A worm optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. *Annals of Operations Research*. 2020. Vol. 285. Pp. 273–293. DOI: 10.1007/s10479-019-03138-w

15. Dli M.I., Puchkov A.Yu., Maksimkin M.V. A software model of an intelligent control system for complex processing of small ore raw materials. *Journal of Applied Informatics*. 2024. Vol. 19. No. 6(114). Pp. 96–112. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112. (In Russian)

16. Galimullin N.R. Python: using Python to automate everyday tasks. *Ekonomika i upravlenie problemy resheniya* [Economics and Management: Problems and Solutions]. 2024. Vol. 9. No. 9(150). Pp. 69–76. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.09.09.010. (In Russian)

17. Dorigo M., Birattari M., Stützle T. Ant colony optimization. *Computational Intelligence Magazine*. 2006. Vol. 1. Pp. 28–39. DOI: 10.1109/MCI.2006.329691

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Ярцев Денис Дмитриевич, аспирант, Росинформагротех;
141261, Россия, Московская область, Пушкинский г.о., р.п. Правдинский, Лесная улица, 60;
Yarcevdd@me.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0760-4783

Воротилова Маргарита Юрьевна, аспирант, филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске;
214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1;
rita.vorotilova@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4646-3540, SPIN-код: 6572-7685

Мордвин Сергей Валерьевич, ассистент кафедры, филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске;
214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1;
mors@1eska.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8121-0716

Information about the authors

Denis D. Yertsev, Postgraduate Student, Rosinformagrotech;
60, Lesnaya street, Pushkinsky Urban District, Pravdinsky Urban Settlement, Moscow Region, 141261, Russia
Yarcevdd@me.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0760-4783

Margarita Yu. Vorotilova, Postgraduate Student, Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk;
1, Energetichesky proezd, Smolensk, 214013, Russia;
rita.vorotilova@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4646-3540, SPIN-code: 6572-7685

Sergey V. Mordvin, Assistant Professor, Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk;
1, Energetichesky proezd, Smolensk, 214013, Russia;
mors@1eska.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8121-0716

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 330.341.1:004.738.5 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-188-200
YQDJUY

Методологические подходы к оценке инновационных экосистем в условиях развития платформенной экономики

К. В. Дьячков

Научно-образовательный центр
Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В условиях цифровой трансформации экономики и расширения платформенных бизнес-моделей возрастает роль инновационных экосистем и платформенного спроса как факторов, определяющих инновационную активность хозяйствующих субъектов.

Целью статьи является теоретико-аналитическое обоснование механизмов влияния платформенной экономики и платформенных моделей спроса на инновационное поведение фирм, а также разработка методических подходов к их оценке.

Научная новизна исследования заключается в интерпретации платформенного спроса как эндогенного институционально-алгоритмического механизма, формирующего траектории инновационного развития через информационные, сетевые, алгоритмические и институциональные каналы.

Методологической основой работы послужили теория многосторонних рынков, концепция инновационных экосистем, методы структурно-функционального анализа, формализация экономических зависимостей, а также анализ эмпирических данных Росстата, ИСИЭЗ НИУ ВШЭ и ОЭСР за 2024–2025 гг.

В статье показано, что включенность фирм в платформенные экосистемы способствует снижению неопределенности инновационной деятельности, ускорению инновационных циклов и росту диффузии продуктовых и сервисных инноваций.

Сделан **вывод** о системном характере воздействия платформенной экономики на инновационную активность и необходимости учета платформенных механизмов при разработке политики инновационного и цифрового развития.

Ключевые слова: платформенная экономика, платформенный спрос, инновационная активность, цифровые экосистемы, многосторонние рынки, алгоритмическое ранжирование, сетевые эффекты, инновационные модели, цифровая трансформация, хозяйствующие субъекты, экономика данных

Поступила 12.12.2025, одобрена после рецензирования 06.02.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Дьячков К. В. Методологические подходы к оценке инновационных экосистем в условиях развития платформенной экономики // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 188–200. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-188-200

© Дьячков К. В., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

JEL: O33, L86, D22, O38, L26 Original article

Methodological approaches to assessing innovation ecosystems in context of a developing platform economy

K.V. Dyachkov

Scientific and Educational Center
Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia

Abstract. In the context of digital transformation and the rapid expansion of platform-based business models, innovation ecosystems and platform-driven demand increasingly determine firms' innovation behavior.

Aim. The article is to provide a theoretical and analytical justification for the mechanisms of influence of the platform economy and platform models of demand on the innovative behavior of firms, as well as to develop methodological approaches to their assessment.

The **scientific novelty** of the study lies in conceptualizing platform demand as an endogenous institutional and algorithmic mechanism that shapes innovation trajectories through informational, network, algorithmic, and institutional channels.

The **methodological basis of the work** was the theory of multi-sided markets, the concept of innovation ecosystems, methods of structural-functional analysis, the formalization of economic dependencies, as well as an analysis of empirical data from Rosstat, the HSE Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, and the OECD for 2024–2025.

The article demonstrates that the inclusion of firms in platform ecosystems helps reduce the uncertainty of innovation activities, accelerate innovation cycles, and increase the diffusion of product and service innovations.

The study **concludes** that the impact of the platform economy on innovation activity is systemic in nature, requiring explicit consideration of platform mechanisms in innovation and digital development policies.

Keywords: platform economy, platform demand, innovation activity, digital ecosystems, multi-sided markets, algorithmic governance, network effects, innovation models, digital transformation, business entities

Submitted 12.12.2025, approved after reviewing 06.02.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Dyachkov K.V. Methodological approaches to assessing innovation ecosystems in context of a developing platform economy. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 188–200. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-188-200

Введение

Современная экономика переживает глубокую трансформацию под влиянием цифровизации и широкого внедрения цифровых платформ, что приводит к радикальным изменениям в механизмах формирования спроса и стимулирования инновационной деятельности хозяйствующих субъектов. Цифровые платформы как экономические и институциональные структуры становятся не только средством организации взаимодействия между участниками рынка, но и активными факторами формирования инновационной активности, изменяя традиционные механизмы рыночного взаимодействия и трансформируя старые модели спроса и предложения.

В мировой научной литературе цифровые платформы рассматриваются как ключевые структурные элементы современной цифровой экономики, способствующие организации

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

многосторонних рынков, снижению барьеров транзакций и ускорению обмена информацией между потребителями, поставщиками и производителями инновационных продуктов и услуг. Данный подход получает развитие в исследованиях, посвященных платформенным бизнес-моделям, цифровым экосистемам и их роли в инновационном процессе, где подчеркивается значение платформ как институциональных посредников, которые одновременно организуют и модифицируют рыночный спрос и предложение [1, 2].

В ряде работ также выделяется влияние платформ на конкурентную среду и инновационные траектории развития фирм: цифровые платформы предоставляют участникам доступ к большим объемам данных, механизмам персонализации, аналитическим инструментам и сетевым эффектам, которые способствуют более точному определению потребностей клиентов и ускорению инновационных решений [3, 4]. В частности, современные исследования показывают, что платформенная экономика способна усиливать технологическую инновационную активность предприятий и тем самым повышать их экономическую эффективность и устойчивость на рынке [4].

В России вопросы влияния цифровых платформ и платформенной экономики на экономическое развитие и инновационные процессы также становятся объектом активного изучения как со стороны научных сообществ, так и со стороны государства, в том числе в рамках национального проекта «Цифровая экономика», направленного на развитие цифровой инфраструктуры, поддержку стартапов и инновационных решений, а также интеграцию цифровых платформ в стратегические секторы экономики.

Согласно ряду отечественных исследований, цифровые платформы выступают не только инфраструктурными элементами цифровой экономики, но и ключевыми институтами, которые формируют новые экономические отношения между субъектами, снижая транзакционные издержки, повышая уровень прозрачности рынка и создавая условия для ускоренного распространения инноваций в разных секторах экономики [5, 6, 7]. В этих работах цифровые платформы интерпретируются как гибридные структуры, которые объединяют технологические системы и экономических агентов, обеспечивая прямое взаимодействие и обмен между сторонами рынка.

В международной научной дискуссии подчеркивается, что развитие платформенной экономики сопровождается сложными вызовами и рисками, связанными, например, с обеспечением честной конкуренции, защитой данных, регуляторной адаптацией и изменением структуры рынков труда [8]. Эти вопросы указывают на необходимость комплексного научного подхода при оценке влияния платформенного спроса на инновационную активность хозяйствующих субъектов и на формирование сбалансированной и устойчивой инновационной среды.

Особое внимание в зарубежной литературе также уделяется исследованию взаимосвязи между цифровыми платформами, технологическими инновациями и экономической ценностью компаний. Так, эмпирические исследования показывают, что влияние платформенной экономики на ценность предприятий во многом осуществляется через усиление технологической инновационной активности, что подтверждает посредническую роль платформ в стимулировании инновационных процессов [9].

Таким образом, современное состояние научных исследований подтверждает: цифровые платформы и платформенная экономика становятся неотъемлемыми факторами развития инновационной экономики, оказывая системное влияние на спрос, конкурентные механизмы и инновационную активность хозяйствующих субъектов. Обзор существующих теоретических и эмпирических работ показывает, что необходимы дальнейшие исследования, направленные на выявление конкретных механизмов трансформации спроса, их институциональных характеристик и последствий для инновационной деятельности в различных экономических контекстах.

Цель исследования заключается в теоретико-аналитическом обосновании механизмов воздействия платформенных моделей спроса и инновационных экосистем на инновационную активность хозяйствующих субъектов, а также в разработке методического инструментария оценки данного влияния в условиях цифровой трансформации экономики.

Для достижения поставленной цели в статье решаются следующие **задачи:**

– Раскрыть экономическое содержание платформенной экономики и платформенного спроса как институционально-алгоритмического механизма формирования инновационных стимулов.

– Проанализировать эволюцию научных подходов к исследованию многосторонних рынков, экосистем и инновационной активности фирм.

– Систематизировать каналы трансляции платформенного спроса в инновационные процессы хозяйствующих субъектов.

– Формализовать ключевые зависимости между параметрами платформенного спроса, сетевыми эффектами и инновационной активностью фирм.

– Обосновать систему показателей для эмпирической оценки влияния платформ на инновационное поведение компаний.

– Выявить дифференциацию эффектов платформенного спроса по типам хозяйствующих субъектов.

– Определить риски и ограничения платформенной модели стимулирования инноваций в контексте структурной неоднородности экономики.

Методы исследования. Методологическую основу исследования образуют положения институциональной и эволюционной экономической теории, теория многосторонних рынков и концепция инновационных экосистем.

В работе использован комплекс общенаучных и специальных методов исследования, включая:

– аналитический и системный подходы – для исследования платформенной экономики как целостного механизма трансляции спроса в инновационные процессы;

– структурно-функциональный анализ – для выявления роли данных, алгоритмов и сетевых эффектов в формировании инновационных стимулов;

– методы экономической формализации – при построении функциональных зависимостей между параметрами платформенного спроса и инновационной активностью фирм;

– сравнительный анализ – при сопоставлении традиционных и платформенных моделей спроса;

– типологизацию и классификацию – для дифференциации эффектов платформенного спроса по группам хозяйствующих субъектов;

– эмпирический анализ статистических данных Росстата, ИСИЭЗ НИУ ВШЭ и ОЭСР за 2024–2025 гг.[1];

– интерпретацию и обобщение результатов для выявления устойчивых закономерностей воздействия платформ на инновационную активность.

Применение совокупности указанных методов позволяет обеспечить комплексный характер исследования и обосновать выводы о системном влиянии платформенной экономики на инновационное развитие хозяйствующих субъектов.

[1]Индикаторы инновационной деятельности: 2025. М.: НИУ ВШЭ, 2025. 320 с.
Индикаторы цифровой экономики: 2025. М.: НИУ ВШЭ, 2025. 300 с.
Инновационная деятельность организаций в Российской Федерации: статистический сборник. М.: Росстат, 2024.

Теоретические основы платформенной экономики (с элементами формализации и эмпирической интерпретации)

Современные исследования платформенной экономики демонстрируют, что цифровые платформы выступают не только как особая форма организации рынка, но и как эмпирически наблюдаемый фактор трансформации инновационной динамики на микро- и мезоуровне. По данным ОЭСР, доля фирм, использующих платформенные каналы взаимодействия с рынком, устойчиво коррелирует с ростом интенсивности продуктовых и процессных инноваций, особенно в секторах услуг, электронной коммерции и логистики[2]. Аналогичные выводы представлены в докладах НИУ ВШЭ, фиксирующих более высокие показатели инновационной активности у компаний, интегрированных в цифровые экосистемы[3].

С теоретико-эмпирической точки зрения платформу целесообразно рассматривать как многосторонний рынок, в рамках которого функция спроса приобретает эндогенный характер. В классической модели двустороннего рынка полезность участия агента i может быть представлена в виде зависимости:

$$Ui=\alpha i+\beta iNj-Pi, \quad (1)$$

где Nj – численность пользователей другой стороны рынка,

βi – коэффициент перекрестного сетевого эффекта,

Pi – цена или совокупные издержки участия [1, 13].

Эмпирические исследования показывают, что рост Nj в цифровых платформах приводит к нелинейному увеличению транзакционной активности и ускорению диффузии инноваций [8, 3]. В российских условиях данный эффект подтверждается данными по маркетплейсам и B2B-платформам, где увеличение пользовательской базы сопровождается ростом числа инновационных предложений со стороны поставщиков.

В отличие от традиционных рынков платформенная экономика характеризуется активной ролью алгоритмов в трансформации спроса. Алгоритмы рекомендаций, динамического ценообразования и ранжирования формируют дополнительный контур координации, который не наблюдается в классических моделях рынка. В формализованном виде объем платформенного спроса можно представить как функцию

$$Dp=f(Nc,Ns,Ap,Dp,Ip), \quad (2)$$

где Nc – число потребителей,

Ns – число поставщиков,

Ap – алгоритмические механизмы платформы,

Dp – массивы данных о поведении пользователей,

Ip – институциональные правила и стандарты платформы [10, 14].

Эмпирически значимость параметров Ap и Dp подтверждается исследованиями цифровых рынков, показывающими, что алгоритмическая видимость продукта оказывает прямое влияние на вероятность коммерциализации инновации [9]. Тем самым спрос утрачивает экзогенный характер и становится управляемым элементом экосистемы.

Для анализа инновационной активности фирм в платформенной среде целесообразно использовать зависимость следующего вида:

$$IAk=g(Dp,Vk,Rk,Ck), \quad (3)$$

[2]OECD. Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future. Paris: OECD Publishing, 2019. 300 p. DOI: 10.1787/9789264311992-en

[3]Цифровая трансформация: эффекты и риски в новых условиях. М.: Изд. дом ВШЭ, 2023. 256 с.

где IAk – уровень инновационной активности фирмы k,

Dp – параметры платформенного спроса,

Vk – видимость продуктов фирмы на платформе,

Rk – алгоритмическое ранжирование,

Ck – издержки адаптации к платформенным стандартам [14, 16].

Данная модель позволяет эмпирически интерпретировать наблюдаемый сдвиг инновационной активности в сторону инкрементальных, модульных и экосистемно-совместимых инноваций, что подтверждается исследованиями цифровых экосистем в ЕС и России [6].

Для систематизации теоретических положений и наглядного отражения механизмов функционирования платформенной экономики целесообразно представить обобщенную схему трансляции пользовательского спроса в инновационную активность фирм в рамках цифровых экосистем. В отличие от традиционных рынков, где связь между спросом и инновациями носит опосредованный характер, платформенные модели формируют прямые алгоритмические и инфраструктурные каналы воздействия. Это позволяет рассматривать платформу не только как посредника, но и как активный координирующий механизм экономического взаимодействия. В этой связи на рисунке представлена концептуальная модель платформенной экономики как механизма преобразования данных о спросе в инновационные решения хозяйствующих субъектов.



***Рис. 1**. Платформенная экономика как механизм трансляции спроса в инновационную активность*

***Fig. 1**. Platform economy as a mechanism for translating demand into innovative activity*

Представленная схема отражает многоуровневую логику функционирования платформенной экономики как системы координации спроса и инновационного предложения. Исходным элементом выступают пользователи платформы, формирующие массивы поведенческих данных, запросов и предпочтений. Эти данные становятся первичным экономическим ресурсом цифровой экосистемы, трансформируя классическое понимание спроса из агрегированной рыночной величины в непрерывный поток информации о потребительском поведении.

На следующем уровне располагается платформенная инфраструктура, включающая алгоритмы обработки данных, API, стандарты взаимодействия и цифровые сервисы. Именно здесь осуществляется институционализация спроса: пользовательские сигналы структурируются, агрегируются и подготавливаются для последующей экономической интерпретации. В отличие от традиционного рынка, где информация о спросе поступает с лагами, в платформенной среде она обрабатывается в режиме реального времени, что создает основу для высокой адаптивности инновационных решений.

Центральным элементом модели является алгоритмический контур координации, включающий рекомендательные системы, механизмы ранжирования и динамического ценообразования. Этот контур выполняет селективную функцию, перераспределяя внимание пользователей и формируя приоритеты спроса внутри экосистемы. Через алгоритмы платформа не только отражает существующие предпочтения, но и активно конструирует траектории пользовательского выбора, тем самым задавая направления инновационной активности фирм-участников.

Дальнейшее усиление воздействия осуществляется через сетевые эффекты, обеспечивающие масштабирование спроса при росте пользовательской базы. Накопление критической массы участников приводит к нелинейному расширению рынков для инновационных продуктов и сервисов, снижая предельные издержки их распространения и повышая экономическую отдачу от внедрения новшеств. В результате инновации получают не только рыночную, но и экосистемную поддержку.

Завершающим элементом схемы выступают фирмы-участники платформенной экосистемы, трансформирующие алгоритмически структурированный спрос в продуктовые, процессные и сервисные инновации. При этом важную роль играет контур обратной связи: результаты инновационной активности вновь фиксируются платформой в виде данных о поведении пользователей, что запускает новый цикл адаптации и коэволюции спроса и предложения. Таким образом, платформенная экономика формирует замкнутую систему, в рамках которой спрос становится встроенным механизмом управления инновационным развитием хозяйствующих субъектов.

После рассмотрения концептуальной схемы «Платформенная экономика как механизм трансформации инновационного поведения», отражающей системные взаимосвязи между цифровой инфраструктурой, алгоритмами, сетевыми эффектами и инновационными решениями фирм, целесообразно перейти от теоретико-модельного анализа к эмпирической интерпретации данных процессов. Представленная схема позволяет зафиксировать логику функционирования платформенной экономики как институционально организованной среды, однако для обоснования ее влияния на инновационную активность необходимо подкрепить выводы количественными параметрами, характеризующими реальное поведение хозяйствующих субъектов.

В этой связи особое значение приобретает использование системы показателей, отражающих степень включенности фирм в платформенный спрос, интенсивность инновационной деятельности, роль данных, сетевых эффектов и цифровой зрелости. Именно совокупность таких индикаторов позволяет связать архитектуру платформенной экономики с измеряемыми результатами инновационного развития. Для этого ниже представлена таблица, аккумулирующая эмпирические показатели за 2024–2025 гг., которые характеризуют влияние платформенных механизмов на инновационную активность фирм и служат основой для последующего аналитического и эконометрического осмысления трансформации инновационных процессов в условиях цифровых экосистем.

Представленные показатели демонстрируют, что платформенная экономика воздействует на инновационную активность не только через расширение рынков сбыта, но и через изменение институциональной архитектуры принятия инновационных решений. Рост доли выручки через платформы (Sp) и онлайн-каналы (Os) усиливает роль алгоритмической селекции инноваций, тогда как сокращение показателя Tm свидетельствует об ускорении инновационного цикла.

Таблица 1. Эмпирические показатели влияния платформенной экономики на инновационную активность (2024–2025)

Table 1. Empirical indicators of the impact of the platform economy on innovation activity (2024–2025)

Показатель	Экономический смысл	Обозначение	Источник данных	2024	2025	Эмпирическая интерпретация для платформ
Доля выручки через цифровые платформы, %	Степень включенности фирмы в платформенный спрос	(Sp)	РФ оценки Минцифры/ ИСИЭЗ ВШЭ	–	~5,5 ВВП	Рост (Sp) отражает усиление зависимости инновационной активности от алгоритмического спроса на цифровых рынках (*оценка рыночных источников РФ, по итогам 2025*)
Удельные затраты на инновации, % от выручки	Интенсивность инновационного поведения	Iexp	Росстат	~2,9	~3,1	Платформенные компании тратят на инновации больше по отношению к выручке, чем средний бизнес РФ
Доля фирм, внедряющих продуктовые инновации, %	Масштаб инновационной диффузии	Iprod	Росстат / OECD	~18	~20	Увеличение доли внедряющих инноваций свидетельствует о влиянии платформой конкуренции
Скорость вывода инноваций на рынок, мес.	Длина инновационного цикла	Tm	OECD	~15	~14	Снижение (Tm) отражает ускоренную адаптацию к платформенным сигналам
Индекс цифровой зрелости фирм, %	Готовность к работе в экосистеме	Dm	ИСИЭЗ ВШЭ	20 организаций используют платформы	66 МСП используют платформы	Рост (Dm) усиливает восприимчивость к платформенному спросу (комплекс цифровых решений) (unkniga.ru)
Доля продаж через онлайн-каналы, %	Канал трансляции спроса	Os	ИСИЭЗ / Росстат	73,7	–	Высокая доля онлайн-покупок показывает рост влияния платформных каналов на рынок (по данным ИСИЭЗ) (unkniga.ru)
Интенсивность использования данных (Big Data), % фирм	Информационная база инноваций	BD	ИСИЭЗ ВШЭ	~15,3	~20	Рост роли Big Data в принятии управленческих решений, что повышает инновационную адаптивность (РБК)
Уровень сетевых эффектов (рост пользователей, %)	Масштабируемость инноваций	Ne	Росстат / ИСИЭЗ	~16 роста вовлеченности	~20 роста вовлеченности	Увеличение числа пользователей усиливает сетевые эффекты и распространение инноваций (РБК)
Доля МСП, работающих через платформы, %	Инклюзивность экосистемы	SMEp	ИСИЭЗ ВШЭ	20	66 МСП	Платформы снижают барьеры для МСП, подключая их к рынкам и инновациям (unkniga.ru)
Коэффициент платформенной зависимости	Институциональная обусловленность инноваций	Pd	авторская оценка	0,15	0,22	Рост (Pd) отражает смещение инновационной стратегии под алгоритмы платформ

Существенным является и влияние цифровой зрелости (Dm) и использования Big Data (BD), что подтверждает переход от интуитивной к дата-ориентированной модели инновационного управления. В совокупности это формирует сконструированный характер инновационного спроса, при котором инновационная активность фирм становится функцией не только рыночных условий, но и архитектуры платформенной экосистемы.

Анализ представленных эмпирических показателей позволяет сделать вывод о том, что влияние платформенной экономики на инновационную активность фирм носит не фрагментарный, а системный характер. Платформенная интеграция затрагивает одновременно несколько измерений инновационного процесса: от формирования спросовых сигналов и использования данных до ускорения инновационных циклов и изменения структуры инвестиционных решений. При этом ключевым отличием платформенной среды является эндогенность спроса по отношению к архитектуре цифровых экосистем, что принципиально отличает ее от традиционных рыночных моделей. Инновационная активность фирм в этих условиях формируется не только под воздействием внешнего спроса, но и в результате алгоритмической селекции, сетевых эффектов и институциональных правил платформ.

Вместе с тем агрегированные показатели не позволяют в полной мере раскрыть внутреннюю логику трансляции платформенного спроса в конкретные инновационные решения хозяйствующих субъектов. Для углубленного понимания данного процесса требуется переход от описательного анализа к рассмотрению моделей платформенного спроса и механизмов их воздействия на инновационную активность фирм. В этой связи в следующем разделе статьи будет осуществлен аналитический разбор ключевых моделей платформенного спроса, а также раскрыты каналы и формы их влияния на инновационное поведение экономических субъектов в условиях цифровых экосистем.

Модели платформенного спроса и инновационная активность. Аналитическая часть и механизмы влияния

Одним из ключевых инструментов теоретического анализа инновационной активности фирм в условиях цифровой экономики является идентификация моделей платформенного спроса и механизмов, посредством которых они влияют на инновационные процессы. Платформенная экономика создает не только инфраструктурные возможности для взаимодействия потребителей и поставщиков, но и институциональные стимулы, которые изменяют поведение хозяйствующих субъектов в отношении инновационной деятельности. Современные исследования показывают, что интегрированность компаний в платформенные экосистемы способствует усилению технологической инновационной активности и повышению рыночной ценности предприятий через механизм инноваций [2, 15].

Одной из распространенных моделей платформенного спроса является модель многостороннего рынка, где платформа как организатор взаимодействия координирует потоки информации и ресурсов между разнородными группами пользователей. В таких системах спрос каждой группы зависит от активности другой, а сетевые эффекты становятся важнейшим фактором экономической динамики. Рост сетевых эффектов приводит к так называемой «ловушке эффективности», когда увеличение базы участников повышает ценность платформы, снижает транзакционные издержки и расширяет возможности для коммерциализации инноваций. В условиях платформенной экономики цена и функциональные свойства продукта перестают быть единственными двигателями спроса: решающую роль начинают играть качество алгоритмических рекомендаций, персонализация и доступ к данным о поведении пользователей [17, 20].

Модели платформенного спроса можно классифицировать в зависимости от направленности инновационной активности, которую они стимулируют. Первая группа моделей – это модели адаптивного спроса, в которых платформа предоставляет фирмам обратную

связь в формате поведенческих данных, что позволяет последним оперативно адаптировать продукты под текущие запросы пользователей. В этих моделях ключевую роль играют алгоритмы обработки больших данных (Big Data), рекомендательные системы и динамическое ценообразование, которые в режиме реального времени формируют дифференцированные сигналы спроса, усиливающие инновационную активность компаний. Эффективность таких моделей подтверждается эмпирическими данными о внедрении цифровых платформ и изменении структуры инновационных расходов компаний в ЕС, США и Китае [10].

Вторая группа моделей – модели коэволюционного спроса, где инновации и платформенный спрос находятся в состоянии взаимного усиления. В этой модели инновационная активность фирм не только реагирует на структурированные алгоритмами стимулы, но и формирует сам спрос через создание новых цифровых решений и сервисов, которые привлекают дополнительных пользователей. Процесс становится итеративным: инновации генерируют дополнительные потоки спроса, а увеличение числа пользователей стимулирует дальнейшее развитие технологических новшеств. Такое взаимодействие отражает экосистемный характер платформенной экономики, когда множество акторов (посредники, поставщики, разработчики) взаимодействуют не линейно, а в форме многофункционального кооперационного поля [14, 15].

Третья группа – модели институализированного спроса, где платформа вводит правила, стандарты и механизмы, формальные и неформальные, для управления инновационными процессами. В этих моделях платформа выступает не только посредником, но и институциональным координатором: она определяет условия доступа к рынку, правила ранжирования и видимости продуктов, что в совокупности формирует траектории инновационного развития. Институционализация спроса проявляется в требованиях совместимости, стандартах API и условиях участия, которые платформы навязывают поставщикам. Это наблюдение согласуется с эмпирическими данными о том, что платформенные модели способствуют снижению неопределенности инновационной деятельности и увеличению ее направленности на рыночный успех [9, 10].

Механизмы влияния указанных моделей платформенного спроса на инновационную активность можно условно разделить на информационный, алгоритмический, сетевой и институциональный каналы. Информационный канал характеризуется тем, что платформа аккумулирует данные о поведении пользователей, предпочтениях, ценовой чувствительности и реакции на новые продукты, что создает высокоструктурированный массив знаний для фирм. Этот канал снижает неопределенность, позволяя компаниям ориентировать инновации на конкретные технологические и потребительские запросы. Алгоритмический канал включает в себя рекомендательные системы и механизмы персонализации, которые оказывают селективное воздействие на видимость инновационных продуктов на платформе, тем самым изменяя стратегию технического развития компаний.

Сетевой канал воздействия связан с наличием и усилением сетевых эффектов: увеличение числа пользователей платформы повышает ценность инноваций, ускоряет распространение новых продуктов и снижает предельные издержки их выхода на рынок. Сетевые эффекты обеспечивают нелинейность масштабирования, что выгодно компаниям, способным быстро реагировать на изменяющийся цифровой спрос. Институциональный канал проявляется в правилах и стандартах, которые платформа задает участникам системы: нормы качества, согласованные интерфейсы, требования к совместимости – все эти элементы становятся частью инновационной архитектуры и формируют устойчивые стимулы к совместимости и адаптации новых решений.

Эмпирические исследования указывают на то, что степень включенности фирмы в платформенные экосистемы коррелирует с ее инновационной активностью. Например, исследование, проведенное на выборке фирм, активных на цифровых рынках, выявило позитивную связь между платформенной интеграцией и ростом технологической инновационной

активности, а также подтверждает, что эта связь усиливается в условиях высокой конкуренции и развитой инфраструктуры цифровых сервисов. Помимо этого, платформа как экосистема поддерживает долгосрочную инновационную устойчивость, снижая барьеры координации и расширяя доступ к знаниям и компетенциям, что является критически важным для фирм, работающих в высокотехнологичных отраслях и международных цепочках добавленной стоимости.

Таким образом, аналитическое рассмотрение моделей платформенного спроса и механизмов их влияния на инновационную активность показывает, что платформенная экономика действует как мультипликатор инноваций, трансформируя традиционные рыночные сигналы в сложные, институционально обусловленные стимулы. Это требует от хозяйствующих субъектов не только технологической адаптации, но и стратегической переориентации в сторону платформенной совместимости, что в свою очередь усиливает инновационную динамику и конкурентоспособность на цифровых рынках.

Заключение

Проведенное исследование показало, что платформенная экономика в современных условиях представляет собой не просто технологическую инновацию, но и системный институциональный уклад, способный кардинально трансформировать традиционные механизмы формирования спроса и инновационной активности хозяйствующих субъектов. В отличие от классических рыночных моделей, где спрос выступает как агрегированная функция потребительских предпочтений, платформенный спрос носит эндогенный характер, обусловленный алгоритмическими механизмами, сетевыми эффектами и цифровой инфраструктурой. Анализ современных теоретических подходов и эмпирических данных подтверждает, что цифровые платформы обеспечивают новые траектории экономического взаимодействия между участниками рынка, повышая скорость распространения инноваций и снижая транзакционные издержки.

В эмпирической части исследования была разработана система показателей, отражающих влияние платформенной экономики на инновационную активность предприятий. Сопоставление данных за 2024–2025 годы показало, что включенность фирм в платформенные экосистемы положительно коррелирует с ростом доли цифровых продаж, долей фирм, внедряющих инновации, и скоростью вывода продуктов на рынок. Специфика платформ заключается в преимущественном использовании данных и алгоритмических механизмов, которые усиливают инновационный потенциал компаний и способствуют адаптации новых решений к потребностям пользователей в реальном времени.

Механизмы воздействия платформенного спроса на инновационную активность выступают многоуровневыми. Информационный канал снижает неопределенность и обеспечивает доступ к аналитическим данным, алгоритмический – ориентирует фирмы на адаптивное развитие, сетевой – усиливает масштабы распространения инноваций, а институциональный – формирует формальные правила и стандарты участия, влияющие на стратегические решения хозяйствующих субъектов. Такие взаимосвязи выступают основанием для выделения платформенного спроса в самостоятельный объект анализа инновационной динамики и инновационной политики.

Исследование также выявило, что платформенная экономика обладает значительным потенциалом для развития цифровых рынков и повышения устойчивости экономической системы, но при этом существуют существенные ограничения и риски. Среди них – асимметрия отношений между участниками платформенных экосистем, неоднородность доступа к цифровым ресурсам, а также необходимость создания сбалансированной правовой базы для регулирования цифровых платформ. В российском контексте развитие платформенной экономики

требует координации действий государства, научного сообщества и бизнеса для обеспечения симметричных условий взаимодействия и снижения структурных рисков.

Платформенные модели спроса и их влияние на инновационную активность хозяйствующих субъектов ясно демонстрируют, что современная экономическая динамика все более определяется цифровыми экосистемами. Это требует от научных исследований углубленного анализа инновационных процессов в условиях цифровизации и разработки методических подходов, позволяющих учитывать специфические особенности платформенной трансформации. В частности, необходимо выделять платформенные механизмы как отдельный предмет инновационной политики и оценивать их влияние на экономический рост, конкурентоспособность и устойчивость бизнеса.

В заключение можно утверждать, что платформенная экономика становится неотъемлемым элементом современной инновационной системы, способствующим повышению эффективности управления спросом и стимулированию инновационной активности. Обеспечение благоприятной институциональной среды, развитие цифровой инфраструктуры и адаптация правового регулирования – ключевые направления для обеспечения устойчивого развития платформенных экосистем и максимизации их инновационного потенциала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Rochet J.-C., Tirole J. Platform competition in two-sided markets. *Journal of the European Economic Association*. 2003. Vol. 1. No. 4. Pp. 990–1029. DOI: 10.1162/154247603322493212

2. Evans D.S., Schmalensee R. Matchmakers: The new economics of multisided platforms. Boston: Harvard Business Review Press, 2016. 272 p. DOI: https://doi.org/10.2139/ssrn.2793021

3. Parker G., Van Alstyne M., Choudary S. Platform revolution: how networked markets are transforming the economy. New York: W.W. Norton & Company, 2016. 352 p.

4. Kenney M., Zysman J. The rise of the platform economy. *Issues in Science and Technology*. 2016. Vol. 32. No. 3. Pp. 61–69.

5. *Гелисханов И. З., Юдина Т. Н., Бабкин А. В.* Цифровые платформы в экономике: сущность, модели, тенденции развития // Экономика и управление. 2018. № 6(11). С. 22–36. DOI: 10.18721/JE.11602

Geliskhanov I.Z., Yudina T.N., Babkin A.V. Digital economy: essence and directions of development. *Economy and Management.* 2018. No. 4. Pp. 17–24. DOI: 10.18721/JE.11602. (In Russian)

6. *Воронов В. С., Викторов Е. И.* Модели платформенных экосистем государственной поддержки инновационного предпринимательства // IP: теория и практика. № 4(12). С. 236–254. DOI: https://iptp.rgiis.ru/index.php/IPTP/article/view/271

Voronov V.S., Viktorov E.I. Platform ecosystems models of state support for innovative entrepreneurship. *IP: Theory and Practice*. No. 4(12). Pp. 236–254. DOI: https://iptp.rgiis.ru/index.php/IPTP/article/view/271. (In Russian)

7. *Анисимов А. Ю., Жданцев К. Н. и др.* Трансформация конкурентной среды платформенных бизнес-моделей в условиях цифровой торговли // Экономика, предпринимательство и право. 2025. Т. 15. № 7. С. 4937–4952. DOI: 10.18334/epp.15.7.123269. EDN: PJWGVO

Anisimov A.Yu., Zhdantsev K.N. et al. Transformation of competitive environment of platform business models in ontext of digital trade. *Economy, Entrepreneurship and Law*. 2025. Vol. 15. No. 7. Pp. 4937–4952. DOI: 10.18334/epp.15.7.123269. EDN: PJWGVO. (In Russian)

8. Rysman Marc. The economics of two-sided markets. *Journal of Economic Perspectives*. 2009. Vol. 23. No. 3. Pp. 125–43. DOI: 10.1257/jep.23.3.125

9. Brynjolfsson E., McAfee A. Machine, platform, crowd: harnessing our digital future. New York: W.W. Norton & Company, 2017. 306 p.

10. Varian H.R. Artificial intelligence, economics, and industrial organization. *NBER Working Paper*. 2019. No. 24839. URL: https://www.nber.org/papers/w24839 (accessed: 02.01.2026).

11. Pasquale F. The Black box society: the secret algorithms that control money and information. Cambridge: Harvard University Press, 2015. 320 p. DOI: 10.4159/harvard.9780674736061

12. Lundvall B.-Å. National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning. London: Pinter Publishers, 1992. 342 p.

13. Katz M., Shapiro C. Network externalities, competition, and compatibility. *American Economic Review*. 1985. Vol. 75. No. 3. Pp. 424–440.

14. Cusumano M., Gawer A., Yoffie D. The business of platforms: strategy in the age of digital competition, innovation and power. New York: Harper Business, 2019. 320 p.

15. Gawer A. Bridging differing perspectives on technological platforms. *Research Policy*. 2014. Vol. 43. No. 7. Pp. 1239–1249. DOI: 10.1016/j.respol.2014.03.006

16. OECD. Digital innovation: seizing policy opportunities. Paris: OECD Publishing, 2019. 186 p. DOI: https://doi.org/10.1787/a298dc87-en

17. *Алехина Е. И.* Цифровизация институциональной среды и развитие долевой экономики // Экономика и предпринимательство. 2021. № 6. С. 112–118.

Alekhina E.I. Digitalization of institutional environment and development of sharing economy. *Economy and Entrepreneurship*. 2021. No. 6. Pp. 112–118. (In Russian)

18. НИУ ВШЭ. Цифровая трансформация: эффекты и риски в новых условиях. М.: ВШЭ, 2023. 256 с.

NIU VSHE. Tsifrovaya transformatsiya: effekty i riski v novykh usloviyakh [HSE University. Digital Transformation: Effects and Risks in the New Conditions]. Moscow: VSHE, 2023. 256 p. (In Russian)

19. OECD. Measuring the digital transformation: a roadmap for the future. Paris: OECD Publishing, 2019. 300 p. DOI: 10.1787/9789264311992-en

20. Schmalensee R., Evans D.S. The Antitrust analysis of multi-sided platform businesses. *NBER Working Paper*. 2015. No. 18783. 52 p. URL: https://www.nber.org/papers/w18783 (accessed: 01/21/2026).

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Дьячков Константин Владимирович, аспирант, Научно-образовательный центр, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

konstantinco@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/009-0006-4654-7791

Information about the author

Konstantin V. Dyachkov, Postgraduate Student, Scientific and Educational Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia;

konstantinco@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/009-0006-4654-7791

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 311.1 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-201-209
GWZEDR

Статистика как инструмент переформатирования общественного сознания

М. В. Карманов[1], И. А. Киселева[1, 2], В. И. Кузнецов[1], А. М. Трамова✉[1, 2]

[1]Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36
[2]Университет «Синергия»
129090, Россия, Москва, ул. Мещанская, 9/14, стр. 1

Аннотация. В статье рассматривается значение статистической информации для формирования общественного сознания и его переформатирования. Формируемые статистикой информационные ресурсы дают представление о происходящих событиях и таким образом позволяют создавать определенное общественное мнение. В этом смысле представление статистических данных в СМИ делает их публикации убедительными. Между тем статистика часто рассматривается как инструмент манипуляции, который применяется политтехнологами, когда возникает необходимость добиться нужного результата. Переформатирование общественного сознания подразумевает целенаправленный процесс последовательного изменения настроений, вкусов, обычаев, устоев, моральных и нравственных принципов, моделей поведения и т.д. Оно охватывает достаточно продолжительный период времени, в течение которого активно используются разнообразные технологии, методы и инструменты. Авторы рассматривают роль статистики в переформатировании общественного сознания.

Цель исследования – уточнение сущности понятия «переформатирование общественного сознания» и определение роли статистики в этом процессе.

Методология. Применяются методы теоретического исследования в форме обобщения, сравнения и специальных аналитических процедур.

Результаты. В статье приводится обзор литературы, посвященной проблемам общественного сознания. Обоснована роль статистики в переформатировании общественного сознания. Отмечается, что при помощи статистики возможно воздействовать на целевую аудиторию и формировать новые ценности. Для этой цели предлагается рассматривать статистическую информацию в прошлом, настоящем и будущем. Обращается внимание на необходимость повышения статистической грамотности, что позволит выявить попытки ненадлежащего использования количественных данных в политических целях.

Заключение. Материал может быть полезен при разработке программ формирования общественного сознания, чтении лекций по статистике для работников СМИ.

Выводы. Проблемы общественного сознания приобретают особую актуальность в настоящее время, когда большое внимание уделяется вопросам государственной безопасности. В этих условиях повышается роль статистической информации, позволяющей влиять на переформатирование общественного сознания.

Ключевые слова: статистика, общественное сознание, статистическая грамотность, манипуляция статистическими данными

Поступила 10.09.2025, одобрена после рецензирования 14.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Карманов М. В., Киселева И. А., Кузнецов В. И., Трамова А. М. Статистика как инструмент переформатирования общественного сознания // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 201–209. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-201-209

© Карманов М. В., Киселева И. А., Кузнецов В. И., Трамова А. М., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

JEL: C82; D7; E7 Original article

Statistics as a tool for reformatting public consciousness

M.V. Karmanov[1], I.A. Kiseleva[1, 2], V.I. Kuznetsov[1], A.M. Tramova[✉ 1, 2]

[1]Plekhanov Russian University of Economics
36, Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia
[2]Synergy University
9/14, building 1, Meshchanskaya street, Moscow, 129090, Russia

Abstract. This article examines the importance of statistical information in shaping and reformatting public consciousness. The information resources generated by statistics provide insight into current events and, thus, help shape public opinion. In this sense, the presentation of statistical data in the media makes their publications persuasive. Meanwhile, statistics are often viewed as a manipulative tool used by political strategists to achieve a desired result. Reformatting public consciousness involves a targeted process of consistently changing attitudes, tastes, customs, values, moral and ethical principles, behavior patterns, etc. It spans a relatively long period of time, during which a variety of technologies, methods, and tools are actively used. The authors examine the role of statistics in reformatting public consciousness.

Aim. This study is to clarify the concept of "reformatting public consciousness" and determine the role of statistics in this process.

Methodology. Theoretical research methods are used in the form of generalization, comparison, and specific analytical procedures.

Results. The article provides a literature review on public consciousness issues. The role of statistics in reshaping public consciousness is substantiated. It is noted that statistics can be used to influence target audiences and shape new values. To this end, it is proposed to consider statistical information in the past, present, and future. Attention is drawn to the need to improve statistical literacy, which will help identify attempts to misuse quantitative data for political purposes.

Conclusion. The material can be useful in developing public consciousness-building programs and delivering lectures on statistics to media professionals.

Conclusions. Public consciousness issues are particularly relevant today, when much attention is paid to issues of national security. Under these conditions, the role of statistical information, which allows for influencing the reshaping of public consciousness, is increasing.

Keywords: statistics, public consciousness, statistical literacy, manipulation of statistical data

Submitted 10.09.2025, approved after reviewing 14.01.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Karmanov M.V., Kiseleva I.A., Kuznetsov V.I., Tramova A.M. Statistics as a tool for reformatting public consciousness. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 201–209. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-201-209

Современные гибридные войны, охватывающие все без исключения сферы человеческой жизнедеятельности [1], отличаются тем, что они ментально ориентированы на переформатирование общественного сознания [2], позволяющее добиваться победы над потенциальным противником, не прибегая к боевым действиям и иным традиционным способам геополитического противостояния [3].

В широком смысле слова переформатирование общественного сознания подразумевает целенаправленный процесс последовательного изменения настроений, вкусов, обычаев, устоев, моральных и нравственных принципов, моделей поведения и т.д. с заменой их на

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

новые ценностные ориентиры, чуждые историческим традициям и интересам людей, проживающих на определенной территории.

Вполне естественно, что подобный процесс закономерно рассматривается как одна из угроз национальной безопасности [4]. Причем в рамках ментальных войн именно переформатирование общественного сознания позволяет обеспечить тотальное разрушение мировоззрения, цивилизационных основ бытия оппонентов, приводящее к уничтожению их самосознания, ментальности и к полной утрате государственного суверенитета [5].

Следовательно, рассматриваемое средство идеологического противостояния представляет собой такую угрозу национальной безопасности, которая начинается с систематического нивелирования понятия Родины, а заканчивается «кульбитом» общественного сознания, в ходе которого эта самая Родина исчезает вообще, превращаясь в подконтрольную резервацию, живущую по правилам и законам, привнесенным извне [6].

Переформатирование общественного сознания не может быть осуществлено мгновенно (вчера были традиции, устои, мировоззрение и т.д., а сегодня их уже нет). Оно охватывает определенный (достаточно длительный) период времени, в течение которого активно используются разнообразные технологии, методы и инструменты. Среди последних важная роль принадлежит статистике, позволяющей оценивать действительность с нужной и «правильной» точек зрения.

В этом контексте вполне естественно возникают два взаимосвязанных вопроса:

1. Почему именно статистика активно привлекается в качестве одного из инструментов переформатирования общественного сознания [7].

2. На что именно нацелено использование статистических данных, а также приемов их представления и анализа в процессе переформатирования общественного сознания [8]?

При ответе на первый вопрос следует отталкиваться от понимания того обстоятельства, что статистика является сферой деятельности, связанной со сбором, обработкой и анализом информации о состоянии и развитии общественных явлений и процессов. Ее результаты во все времена привлекали и будут продолжать привлекать пристальное внимание самых широких слоев населения. Поэтому в случае со статистическими данными охват населения в массовом формате, позволяющий как формировать, так и трансформировать общественное мнение, присутствует изначально [9]. Стремление к познанию (правда, в различной степени) заложено в каждом человеке от рождения. А статистические показатели являются своеобразными количественными фотографиями бытия, открывающими путь к пониманию масштабов, структуры, распространенности, интенсивности развития и других параметров происходящего. С другой стороны, именно статистическая информация часто используется в качестве аргументов для принятия тех или иных управленческих решений, а поэтому спрос на нее носит все возрастающий характер [10].

Таким образом, такой действенный и проверенный временем инструмент аналитической деятельности, традиционно привлекаемый людьми для познания окружающего мира, нельзя не использовать для решения конкретной задачи, а именно для переформатирования общественного сознания. Ведь при помощи цифр намного проще воздействовать на целевую аудиторию, внушая при помощи статистики новые ориентиры, идеалы и ценности. Давно известно, что статистические примеры и аргументы позволяют гораздо глубже проникнуть в сознание людей, потому как по сравнению с обыкновенными словами несут количественные доказательства тех или иных заключений по поводу характера, направлений и результатов развития общества [11].

При ответе на второй вопрос целесообразно разделять цели статистики в процессе переформатирования общественного сознания в историческом, в текущем и в футурологическом аспектах. С нашей точки зрения в рассматриваемом контексте чаще всего они сводятся к следующему:

• ***в прошлом*** – разрыхление, разрушение значимых исторических достижений для уничтожения исторических достижений государства;

• ***в настоящем*** – преуменьшение, очернение текущих результатов социально-экономического развития государства;

• ***в будущем*** – формирование образа отстающего государства, не имеющего никаких перспектив развития.

Отправляясь в ретроспективу, неопытному бойцу ментального фронта подобная затея может показаться пустой тратой времени и сил. Опытные же участники информационно-идеологических войн [12] дают себе отчет в том, что именно уничтожение корней того или иного мировоззрения имеет даже не важное, а очень важное значение.

Остановимся подробнее на смысле разрушения исторических достижений конкретного государства. Совершенно очевидно, что в современном мире любая общность людей, а тем более граждан одной и той же страны, базируется на определенном национально-патриотическом фундаменте, созданном в течение столетий и даже тысячелетий, в ходе которых были одержаны широко известные военные, политические, экономические, научные и другие победы, вызывающие гордость и консолидирующие сознание отдельных членов общества. Именно эти достижения представляют собой духовные, нравственные, ментальные, мировоззренческие и иные звенья общей цепи, объединяющие разные человеческие поколения и крепко привязывающие их к единой территории, которую они идентифицируют как Родину.

Как свидетельствует практика западной пропаганды, для разрушения исторической платформы единения статистика привлекается сразу по нескольким направлениям. Первое из них связано с чисто количественным преуменьшением масштабов (значимости, важности, весомости) событий прошлого, имеющих громкое звучание в сознании обрабатываемой целевой аудитории. Например, ключевые сражения Великой Отечественной войны, имеющие большое национально-патриотическое значение, либо совокупные людские потери Советского Союза в борьбе с нацистскими захватчиками и т.п. часто представляются в микшированном, минимизированном виде, что может порождать, особенно у молодежи, вопросы об истинной роли собственной страны в ретроспективном развитии общества. Второе направление информационно-статистического воздействия ориентировано на дискредитацию руководителей прошлого, а также связанных с ними итогов внутреннего социально-экономического развития страны. В этом случае на конкретных цифровых примерах иллюстрируются максимально возможные негативные результаты, в том числе в свете нарушений демократии и прав. Третье направление ориентировано на трансформацию истинной исторической конфигурации, когда при помощи статистических данных прошлое переворачивается с ног на голову, а количественные индикаторы представляют всему миру новых героев, о которых ранее никто вообще не слышал.

В совокупности подобные статистические экзерсисы сознательно перечеркивают национально-патриотическую канву прошлого, внедряя в массовое общественное сознание «убедительные» количественные аргументы никчемности прошлого, в котором вроде бы ничего не было и нет из того, что действительно может вызывать гордость за своих предков и консолидировать современников, принадлежащих к различным поколениям. Причем в добавок к столь специфической статистике активно муссируются разнообразные теории поколений, доказывающие исключительные специфические особенности каждого из них и отсутствие межпоколенческих связей [13].

В настоящем процессе переформатирования общественного сознания преуменьшаются текущие результаты социально-экономического развития, в том числе с привлечением фейков, коллективный Запад использует статистику по двум ключевым и также тесно взаимосвязанным направлениям [14].

Первое из них тесно сопряжено с информационным обеспечением тотально продвигаемой идеи о неправильно выбранном векторе преобразований, вступающем в прямое противоречие с так называемыми общечеловеческими ценностями, которые вроде как по своей значимости превосходят национальные интересы и перевешивают стремление к суверенитету абсолютно в любой сфере человеческой жизнедеятельности.

Для достижения этой цели применяются обширные, грамотно структурированные и логически последовательно выстроенные статистические материалы. Их квинтэссенция заключается в демонстрации победного марша всеобъемлющей и безусловной толерантности, стремительного падения ценности традиционной семьи, повсеместной легализации наркотиков и т.д. Естественно, что такие цифровые примеры приходят в противоречие с данными официальной статистики в тех странах, где выбраны несколько иные ориентиры развития общества. Тогда в ход пускается достаточно известный прием, связанный с дискредитацией статистических органов отдельных государств в частности, а также статистики как науки в целом.

Второе направление призвано статистически доказать, что в рамках неправильно выбранного вектора развития все достигнутые результаты носят не только сомнительный характер, но и сознательно преувеличиваются, замалчивается истинное положение дел. С этой целью в открытый доступ вбрасываются различные количественные данные, экспертные оценки и т.п., вроде бы как подтверждающие, что официальная статистика не соответствует действительности. При этом специфика восприятия информации большинством обывателей сводится к тому, что они неглубоко разбираются в статистической методологии, а поэтому не до конца осознают, что расчеты, проведенные по разным методикам, могут давать и разные итоги. В сознании остается лишь мысль о лукавстве официальной статистики и ее вроде как постоянном стремлении к фальсификации любых материалов. Это обстоятельство, естественно, вызывает раздражение и недовольство, которое сознательно раздувается зарубежными политтехнологами.

И, наконец, о будущем. Отталкиваясь от совсем не героического прошлого и сомнительного настоящего, очень сложно уповать на благоприятную перспективу. И это отлично понимают зарубежные агрегаторы информационного фронта, использующие статистику для переформатирования общественного сознания. В этой связи главное направление статистического воздействия определяется как целенаправленное формирование непривлекательного образа страны.

В рамках этого направления основной удар обычно наносится по молодым, подрастающим поколениям граждан, которые наиболее остро воспринимают формат будущего, где им предстоит жить и трудиться во благо себя, своих близких и страны. При этом нивелирование и даже полное уничтожение патриотических настроений молодежи выступает в данном случае в качестве задачи стратегического характера [15].

Для ее реализации информационное воздействие на население строится таким образом, чтобы при помощи достаточно простых и наглядных статистических данных продемонстрировать, что все национальное принципиально отстает от зарубежных аналогов, а в будущем это отставание примет необратимые и самые пагубные последствия, которые не позволят достичь достойного места в обществе и соответствующего ему высокого уровня жизни.

Надо сказать, что в этом отношении пропагандистская машина Запада представляет собой достаточно гибкий и отлаженный механизм, который способен через популярные у молодежи каналы общения и получения информации найти самый короткий путь к переформатированию общественного сознания в нужном направлении. Популяризация тотальной свободы и демократии, распространение фривольного образа жизни, попирающего любые традиции и обычаи, и т.п. – вот далеко не полный перечень средств, которые сопровождаются красноречивыми статистическими иллюстрациями, доказывающими популярность той или иной поведенческой модели, приверженность к глобальному молодежному тренду развития и т.д.

Занимаясь формированием привлекательного образа будущего, западная пропаганда строится с учетом существующих реалий, которые, к большому сожалению, часто опираются на достаточно низкую статистическую грамотность молодежи. Проблема здесь заключается в том, что статистическая культура вообще, включающая и статистическую грамотность в частности, является необходимым и обязательным элементом интеллектуального и профессионального развития страны [16]. Не имея же должного уровня статистических знаний, молодые подрастающие поколения объективно не могут разобраться в преднамеренной фальсификации действительности, когда в ход пускаются нерепрезентативные количественные данные, несопоставимые во времени или в пространстве индикаторы, формальные корреляционные зависимости и т.п.

Отмечается, что зачастую на восприятие надежности результатов влияют опыт и авторитет организации, проводившей исследование, и указание на источник, в котором опубликованы результаты [17].

Отдельно следует обратить внимание на то обстоятельство, что все перечисленные выше направления переформатирования общественного сознания в рамках прошлого, настоящего и будущего используются одновременно и в тесной взаимосвязи между собой. Это позволяет, разрушая исторические скрепы прошлого, более убедительно воздействовать на целевую аудиторию в настоящем, пролонгируя нападки на сложившийся менталитет членов общества в будущем. В результате появляются хорошие возможности для постепенного убеждения граждан страны отказываться от традиционного мировоззрения и в меньшей степени уповать на национальный суверенитет, ценность которого существенно преуменьшается всеми доступными средствами массовой пропаганды. При этом статистические показатели, как количественные фотографии окружающего нас мира, акцентируют внимание социума только на тех событиях прошлого, настоящего или будущего, которые способствуют возникновению негативных настроений, оставляя за бортом все остальные явления и процессы.

В целом переформатирование общественного сознания в настоящее время является столь актуальным направлением информационно-ментальных войн, ведущихся Западом против России, что объективно не может оставаться без самого серьезного внимания со стороны государства, особенно в контексте обеспечения национальной безопасности. И здесь крайне мало просто заниматься разоблачением тех или иных акций негативного информационного воздействия с широким использованием статистических данных и наглядных приемов умышленного представления показателей, отражающих только нужные аспекты состояния и развития общественных явлений и процессов. Вышеизложенные вопросы рассматриваются в специальной литературе [17]. Назрела необходимость подготовки специалистов особого профиля, которые бы, с одной стороны, владели знаниями для ведения эффективной профилактики идеологических диверсий, а с другой стороны, имели должный научно-практический потенциал для работы со статистической информацией, позволяющий грамотно выявлять любые попытки ненадлежащего и неправомерного использования количественных данных в политических целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лукьянов В. Ю.* Гибридные войны как угроза безопасности в 21 веке // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. 2021. Т. 21. № 3. С. 5–14. DOI: 10.37482/2687-1505-V098

2. *Артюх М. А.* Ментальная война: к вопросу о содержании современного глобального противоборства. Прогнозируемые вызовы и угрозы национальной безопасности Российской Федерации и направления их нейтрализации: сборник материалов круглого стола. М., 2021. С. 61–71.

3. *Бужинская Д. С.* Ментальная диверсия: Великая Отечественная война в развлекательном теледискурсе. В сборнике: СМИ и общество. Материалы 5-й международной научно-практической конференции. 2010. С. 14–20. EDN: YNRQBX

4. *Добровольская О. А.* Переформатирование общественного сознания граждан России как фактор национальной безопасности // Актуальные вопросы науки. 2020. № 62–63. С. 21–24. EDN: IDCRLY

5. *Ильницкий А. М.* Ментальная война России // Военная мысль. 2021. № 8. С. 19–33. EDN: TDSKIX

6. *Рудкевич Е. Ю.* Ментальная война: нивелирование понятия Родины. Образ Родины: содержание, формирование, актуализация: сборник материалов 6-й Международной научной конференции. Московский художественно-промышленный институт, 2022. С. 262–267. EDN: PAKJRR

7. *Щетинина М. Ю.* Статистические данные как средство манипуляции общественным сознанием. В сборнике: Современное государство: проблемы социально-экономического развития. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. 2015. С. 93–94. EDN: TLVRMJ

8. *Денисенко Р. М.* Статистика: место и роль в развитии общества // Сибирский торгово-экономический журнал. 2014. № 1. С. 120–122. EDN: TANTSP

9. Люди счет любят. Интервью В. Л. Соколина // Вопросы статистики. 2008. № 9. С. 3–6. EDN: MTGXHH

10. *Антохонова И. В.* Статистика и эволюция спроса в обществе на анализ данных. В сборнике: Всероссийская научно-практическая конференция «Статистика и вызовы современности». Федеральная служба государственной статистики, Московский государственный университет экономики, статистики и информатики (МЭСИ), 2015. С. 20–22. EDN: VXVGSZ

11. *Мухутдинова А. А., Гарафутдинова Г. Р.* Роль статистики в жизни общества // Научные исследования: от теории к практике. 2015. № 5(6). С. 200–201. EDN: VLGLCX

12. *Айдаркина Е. Е., Лысенко А. И.* Информационные войны и их роль в современном мире // Экономика и социум. 2015. № 5-1. С. 45–47. EDN: VJWPLB

13. *Талтынов С. М.* Теория поколений: критический взгляд. Кадровый форум Черноземья: сборник статей 7-го кадрового форума Черноземья (Третье международное заседание). Воронежский государственный университет, 2014. С. 104–107. EDN: WNTGIB

14. *Брусенская Л. А., Куликова Э. Г.* Фейк как элемент манипулирования общественным сознанием // Гуманитарные и социальные науки. 2018. № 5. С. 101–112. DOI: 10.18522/2070-1403-2018-70-5-101-112

15. *Голомазова Т. Н., Шныренков Е.* Патриотизм в системе ценностных ориентаций молодежи // Вестник МГСУ. 2007. № 2. С. 43–45.

16. *Тутова А. Б.* Статистическая грамотность и общая статистическая культура как необходимый элемент интеллектуального и профессионального развития страны. В сборнике: Вестник кафедры статистики Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. Материалы и доклады / под общей редакцией Н. А. Садовниковой. М., 2017. С. 290–292. EDN: YLMTSX

17. *Грима Пере.* Абсолютная точность и другие иллюзии. Секреты статистики // Мир математики: в 40 т. Т. 13 / пер. с испанского – Де Агостини, 2014. 144 с.

REFERENCES

1. Lukyanov V.Yu. Hybrid Wars as a security threat in the 21st century. *Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: Humanities and Social Sciences*. 2021. Vol. 21. No. 3. Pp. 5–14. DOI: 10.37482/2687-1505-V098. (In Russian)

2. Artyukh M.A. Mental war: on the contents of modern global confrontation. *Predicted challenges and threats to national security of the Russian Federation and directions for their neutralization.* Collection of materials from the round table. Moscow, 2021. Pp. 61–71. (In Russian)

3. Buzhinskaya D.S. Mental sabotage: the Great Patriotic war in entertainment television discourse. In the collection: *Media and Society. Proceedings of the 5th international scientific and practical conference*. 2010. Pp. 14–20. EDN: YNRQBX. (In Russian)

4. Dobrovolskaya O.A. Reformatting the public consciousness of Russian citizens as a factor in national security. *Current Issues of Science.* 2020. No. 62–63. Pp. 21–24. EDN: IDCRLY. (In Russian)

5. Ilnitsky A.M. Russia's mental war. *Voyennaya mysl'* [Military Thought]. 2021. No. 8. Pp. 19–33. EDN: TDSKIX. (In Russian)

6. Rudkevich E.Yu. Mental war: leveling the concept of the motherland. *The image of the motherland: content, formation, actualization*. Collection of materials from the 6th International scientific conference. Moscow Institute of Art and Industry, 2022. Pp. 262–267. EDN: PAKJRR. (In Russian)

7. Shchetinina M.Yu. Statistical data as a means of manipulating public consciousness. In the collection: *The modern state: problems of socioeconomic development.* Materials of the 5th International scientific and practical conference. 2015. Pp. 93–94. EDN: TLVRMJ. (In Russian)

8. Denisenko R.M. Statistics: place and role in the development of society. *Siberian Trade and Economic Journal.* 2014. No. 1. Pp. 120–122. EDN: TANTSP. (In Russian)

9. People love to count. Interview with V. L. Sokolin. *Voprosy statistiki* [Questions of Statistics]. 2008. No. 9. Pp. 3–6. EDN: MTGXHH. (In Russian)

10. Antokhonova I.V. Statistics and evolution of social demand for data analysis. In: All-Russian scientific and practical conference *"Statistics and modern challenges"*. Federal State Statistics Service, Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics (MESI), 2015. Pp. 20–22. EDN: VXVGSZ. (In Russian)

11. Mukhutdinova A.A., Garafutdinova G.R. Role of statistics in society. *Nauchnyye issledovaniya: ot teorii k praktike* [Scientific Research: From Theory to Practice]. 2015. No. 5(6). Pp. 200–201. EDN: VLGLCX. (In Russian)

12. Aidarkina E.E., Lysenko A.I. Information wars and their role in the modern world. *Economy and Society.* 2015. No. 5-1. Pp. 45–47. EDN: VJWPLB. (In Russian)

13. Taltynov S.M. Theory of generations: a critical view. *Personnel forum of the Black Earth Region*. Collection of articles from the 7th Personnel Forum of the Black Earth Region (Third International Meeting). Voronezh State University, 2014. Pp. 104–107. EDN: WNTGIB. (In Russian)

14. Brusenskaya L.A., Kulikova E.G. Fake as an element of manipulation of public consciousness. *Gumanitarnyye i sotsial'nyye nauki* [Humanitarian and Social Sciences]. 2018. No. 5. Pp. 101–112. DOI: 10.18522/2070-1403-2018-70-5-101-112. (In Russian)

15. Golomazova T.N., Shnyrenkov E. Patriotism in the system of value orientations of young people. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU]. 2007. No. 2. Pp. 43–45. (In Russian)

16. Tutova A.B. Statistical literacy and general statistical culture as a necessary element of the intellectual and professional development of the country. In the collection: *Bulletin of the Department of Statistics of Plekhanov Russian University of Economics*. Materials and reports. General editor N.A. Sadovnikova. Moscow, 2017. Pp. 290–292. EDN: YLMTSX. (In Russian)

17. Grima Pere. Absolute accuracy and other illusions. secrets of statistics. *The World of Mathematics*: in 40 volumes. Vol. 13. Trans. from Spanish – De Agostini. 2014. 144 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed with no external funding.

Информация об авторах

Карманов Михаил Владимирович, д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры статистики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;
Karmanov.MV@rea.ru, SPIN-код: 9452-2999
Киселева Ирина Анатольевна, д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры математических методов в экономике, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;
д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики, Университет «Синергия»;
129090, Россия, Москва, ул. Мещанская, 9/14, стр. 1;
Kia1962@list.ru, SPIN-код: 2213-2312
Кузнецов Владимир Иванович, д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры статистики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;
Kuznetsov.VI@rea.ru, SPIN-код: 9328-2911
Трамова Азиза Мухамадияевна, д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;
профессор кафедры прикладной математики, Университет «Синергия»;
129090, Россия, Москва, ул. Мещанская, 9/14, стр. 1;
Tramova.am@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4089-6580, SPIN-код: 8583-3592

Information about the authors

Mikhail V. Karmanov, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Statistics, Plekhanov Russian University of Economics;
36, Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia;
Karmanov.MV@rea.ru, SPIN-code: 9452-2999
Irina A. Kiseleva, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Mathematical Methods in Economics, Plekhanov Russian University of Economics;
36, Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia;
Professor of the Department of Applied Mathematics, Synergy University;
9/14, building 1, Meshchanskaya street, Moscow, 129090, Russia;
Kia1962@list.ru, SPIN-code: 2213-2312
Vladimir I. Kuznetsov, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Statistics, Plekhanov Russian University of Economics;
36, Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia;
Kuznetsov.VI@rea.ru, SPIN-code: 9328-2911
Aziza M. Tramova, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;
36 Stremyannyy lane, Moscow, 115054, Russia;
Professor of the Department of Applied Mathematics, Synergy University;
9/14, building 1, Meshchanskaya street, Moscow, 129090, Russia;
Tramova.am@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4089-6580, SPIN-code: 8583-3592

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 658.7 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-210-223
HPEVSX

Исследования цифровых экосистем: современное состояние, тенденции и направления развития

Т. В. Маугатие, Е. В. Корчагина

Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195221, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Аннотация. Цифровые экосистемы как развивающаяся концепция являются важнейшим компонентом современной цифровой экономики и привлекают внимание большого числа ученых и практиков.

Цель исследования – проведение библиометрического анализа научных публикаций в области цифровых экосистем на основе 250 статей, проиндексированных в международной базе научного цитирования Scopus за период с 2014 по 2025 год.

Методы исследования. Библиометрический анализ проводился с использованием пакета Bibliometrix-Biblioshiny на языке программирования R.

Результаты. Анализ показал, что с 2018 года в области исследования цифровых экосистем наблюдается значительный рост числа опубликованных научных статей, что показывает усиление научного интереса к данной теме. Географическое распределение показывает, что Германия, Великобритания и Испания лидируют по числу научных публикаций в области цифровых экосистем. Ведущим журналом в данной области является Sustainability Journal. Результаты исследования позволили выявить наиболее значимых ученых, опубликовавших работы по цифровым экосистемам с максимальными рейтингами цитирования. Также исследование позволило определить наиболее часто используемые ключевые слова и логические связи между ними. Анализ практики совместного употребления ключевых слов позволил сформировать семь основных тематических кластеров в исследуемой области.

Выводы. Рост числа публикаций в области цифровых экосистем говорит о том, что цифровые экосистемы являются актуальной и важной для науки темой, привлекающей интерес большого числа исследователей.

Ключевые слова: цифровизация, цифровые экосистемы, библиометрический анализ, Bibliometrix, Biblioshiny

Поступила 15.08.2025, одобрена после рецензирования 09.12.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Маугатие Т. В., Корчагина Е. В. Исследования цифровых экосистем: современное состояние, тенденции и направления развития // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 210–223. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-210-223

© Маугатие Т. В., Корчагина Е. В., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

JEL: O33 Original article

Research of digital ecosystems: current state, trends and directions of development

T.W. Mawugatie, E.V. Korchagina

Institute of Industrial Management, Economics and Trade
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29, Polytechnicheskaya street, Saint Petersburg, 195221, Russia

Abstract. Digital ecosystems as an emerging concept are a critical component of the modern digital economy and have attracted the attention of many scholars and practitioners.

Aim. The study is to conduct a bibliometric analysis of scientific publications in the field of digital ecosystems based on 250 articles indexed in the international scientific citation database Scopus for the period from 2014 to 2025.

Research methods. Bibliometric analysis has been conducted using the Bibliometrix-Biblioshiny package in the R programming language.

Results. The analysis reveals a significant increase in the number of published scientific articles in the field of digital ecosystems research since 2018, demonstrating growing scientific interest in this topic. Geographic distribution exposes that Germany, the United Kingdom, and Spain lead in the number of scientific publications in the field of digital ecosystems. The leading journal in this field is Sustainability Journal. The study's results identified the most significant scholars who have published papers on digital ecosystems with the highest citation rates. The study also identified the most frequently used keywords and the logical relationships between them. An analysis of keyword co-occurrence patterns discovered seven main thematic clusters in the field.

Conclusions. The growing number of publications in the field of digital ecosystems indicates that digital ecosystems are a relevant and important topic for science, attracting the interest of a large number of researchers.

***Keywords**:* digitalization, digital ecosystems, bibliometric analysis, Bibliometrix, Biblioshiny

Submitted 15.08.2025, approved after reviewing 09.12.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Mawugatie T.W., Korchagina E.V. Research of digital ecosystems: current state, trends and directions of development. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 210–223. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-210-223

Введение

Цифровые экосистемы (ЦЭ) представляют собой самоорганизующиеся устойчивые системы, в основе которых лежит комплекс взаимосвязанных цифровых технологий, обеспечивающих интегрированный опыт для пользователей через предоставление различных услуг или реализацию бизнес-функций в едином пространстве. ЦЭ являются обязательным элементом современной глобализированной цифровой экономики и технологически развитого мира, где конкуренция определяется цифровыми технологиями. Развитие и переход к цифровым услугам привели к тому, что цифровая экономика стала более конкурентной средой. Экономическая наука традиционно утверждала, что местоположение, размер, возраст и сфера деятельности компаний являются определяющими факторами их конкурентоспособности. Однако в современную эпоху глобализации определяющими факторами становятся эффективность удовлетворения потребностей клиентов, сотрудничество с бизнес-партнерами и уровень внедрения технологий. Дости-

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

жения в области технологий и конкурентных подходов становятся все более разнообразными, выходя за рамки традиционной бизнес-среды. Это требует нового подхода к вопросу повышения конкурентоспособности, расширения спектра стратегий, роста эффективности и производительности компаний.

ЦЭ, интегрирующие цифровые технологии и связывающие компании посредством бесперебойных устройств в глобальном бизнес-ландшафте, позволяют потребителям, специалистам по цепочке поставок и экспертам отслеживать маршруты товаров, услуг или информации, тем самым способствуя успеху бизнеса [22]. Например, распространенность цифровых экосистем повлияла на эффективность китайских предпринимателей в сфере сельского хозяйства в Южном и Восточном Китае [11]. Эффективность внедрения ряда инновационных технологий, например блокчейна, часто определяется уровнем развития цифровых экосистем [31]. С точки зрения бизнеса ЦЭ позволяют специалистам совершенствовать свои услуги и внедрять новые бизнес-модели. Это свидетельствует о растущей важности платформенных экосистем в современной цифровой экономике [18].

Сложная и постоянно меняющаяся сеть предпринимателей, компаний, организаций и систем, взаимодействующих друг с другом посредством цифровых технологий, образует цифровую предпринимательскую экосистему [14]. Цифровизация и платформенные экосистемы распространили модель создания ценности среди традиционных участников логистики, внедрив новые методы повышения ценности [24]. ЦЭ начинают играть все более важную роль в различных областях – от бизнеса до управления рисками. Например, они позволяют обнаруживать и контролировать стихийные бедствия, особенно в районах с высоким уровнем риска. По всему миру сообщества, проживающие вблизи прибрежных районов, подвержены стихийным бедствиям. ЦЭ на базе Интернета вещей могут повысить уровень сплоченности сообщества, скорость взаимодействия его участников, обеспечить определение оптимальных решений возникающих проблем, что позволяет более эффективно управлять рисками и реагировать на чрезвычайные ситуации [5].

Несмотря на всю важность ЦЭ, сбои в их управлении приводят к проблемам со значительными последствиями. Непоследовательность и нескоординированность в использовании сервисов участниками экосистемы приводит к задержкам, увеличению затрат и прерыванию процессов. Непроработанность алгоритмов ЦЭ и слабое управление приводят к несоблюдению запросов участников. Низкая эффективность управления ЦЭ увеличивает бизнес-риски, особенно в развивающихся странах [17]. Следствием отсутствия эффективного управления ЦЭ является недовольство заинтересованных сторон, что, в свою очередь, влияет на эффективность бизнеса [13].

ЦЭ – это быстро развивающаяся область, в которой существует множество нерешенных вопросов, включая вопросы их определения, управления и устойчивого развития. Решение этих проблем имеет решающее значение посредством развития исследований в этой области и обеспечения практического применения в более широкой цифровой экономике, которая может способствовать развитию и использованию других технологий для удовлетворения общественных потребностей с максимальной экономической выгодой [9, 15, 27, 29]. Концепция цифровых экосистем остается открытой, что приводит к ряду нерешенных вопросов и оставляет ее малоизученной областью. Например, определение ЦЭ не имеет четких границ вследствие отсутствия консенсуса среди ученых по этому вопросу [9, 19, 21].

Более того, вопросы управления и функциональности ЦЭ, связанные с созданием стоимости, регулированием и сотрудничеством, остаются открытыми для дальнейшего изучения [1]. Проблемы качества данных, открытости, совместимости, устойчивости ЦЭ остаются нерешенными [4]. Вопросы разделения цифровых платформ и экосистем требуют дальнейшей проработки [2, 3]. В этой связи анализ существующих наработок в данной научной области и выявление четкого вклада ключевых публикаций важны для понимания перспективных направлений развития ЦЭ [15, 33]. Для достижения этой цели библиомет-

рический анализ предоставляет уникальную возможность описания современного состояния исследований в области цифровых экосистем посредством количественной оценки опубликованных научных работ, предлагая четкие карты общих тем и кластеров. Данное исследование дополняет существующую литературу по цифровым экосистемам, предоставляя библиометрический анализ опубликованных научных работ, тем самым способствуя более глубокому пониманию современных научных тенденций.

Методы и материалы

В исследовании использовался библиометрический анализ для изучения структуры и динамики имеющихся знаний в области цифровых экосистем на глобальном уровне. Это аналитический инструмент, используемый для количественной оценки опубликованных научных работ в определенной предметной области [34]. Библиометрический анализ также полезен для выявления наиболее значимых работ и вклада ученых и институтов, оценки ключевых слов и взаимосвязей между научными публикациями [23].

В данном исследовании в качестве источника информации мы использовали базу международного цитирования Scopus – обширную и широкомасштабную базу данных, предлагающую широкий спектр рецензируемых статей. Scopus является хранилищем рецензируемого научного контента, содержащего данные высочайшего качества, тщательно отобранные и оцененные независимыми экспертами. Благодаря этому Scopus сегодня является одним из наиболее крупных и авторитетных источников научной литературы [7].

В исследование были включены научные работы по цифровым экосистемам, опубликованные в период с 2014 по 2025 год на английском языке и находящиеся в открытом доступе. Дата окончания поиска – 13 июля 2025 года. В данном исследовании использовался библиометрический анализ с использованием Bibliometrix – инструмента с открытым исходным кодом для проведения анализа научной литературы, написанного на языке R, для проведения библиометрического анализа с использованием компонентов Biblioshiny [6].

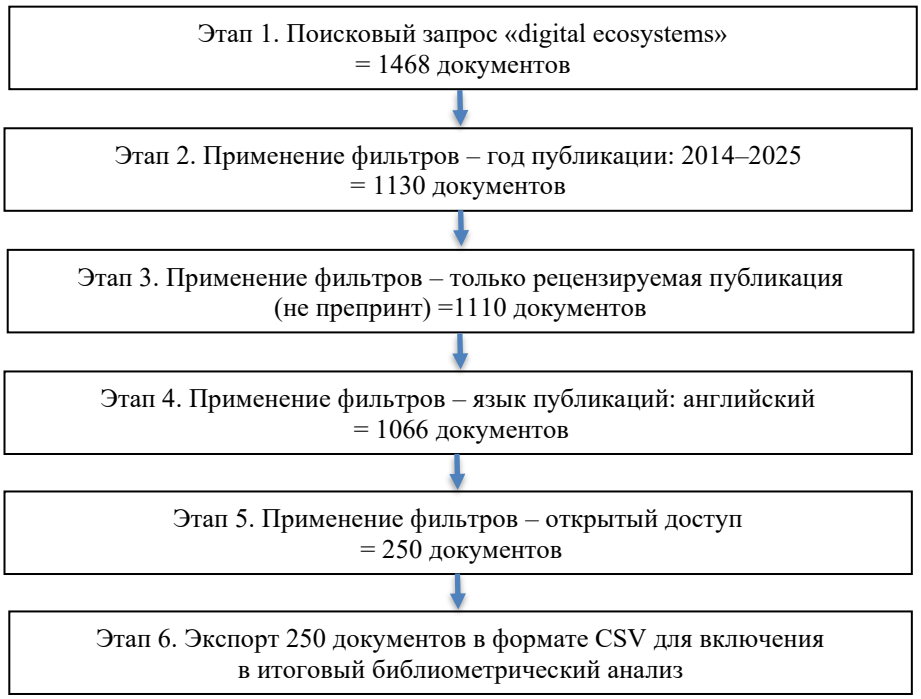


***Рис. 1**. Схема отбора публикаций из базы данных Scopus*
(составлено авторами)

***Fig. 1**. Scheme for selecting publications from the Scopus database*
(compiled by the authors)

Процесс сбора данных

На рисунке 1 показан процесс сбора данных из базы данных Scopus. Он включает в себя применение поискового запроса и фильтров, что приводит к получению 250 опубликованных документов. Из общего числа документов 66 % составляют статьи, 24 % – материалы конференций, а оставшаяся часть – обзоры, главы книг, редакционные статьи и книги.

Результаты

На рисунке 2 показана динамика числа публикаций в области цифровых экосистем с 2014 по 2025 год, демонстрирующая тенденцию к росту. В частности, на начальном этапе (2014–2018 годы) рост был относительно низким, в диапазоне от 3 до 7 научных публикаций в год. Однако в период с 2018 по 2024 год наблюдалась значительная и устойчивая динамика роста числа публикаций. Количество публикаций увеличилось с 6 в 2018 году до 56 в 2024 году, что свидетельствует о растущем интересе к цифровым экосистемам и исследовательской деятельности в этой области. Эта динамика показывает, что цифровые экосистемы становятся все более важной областью исследований, привлекая все большее число ученых. За семь месяцев 2025 года опубликовано всего 16 статей, однако их число может существенно увеличиться к концу года.

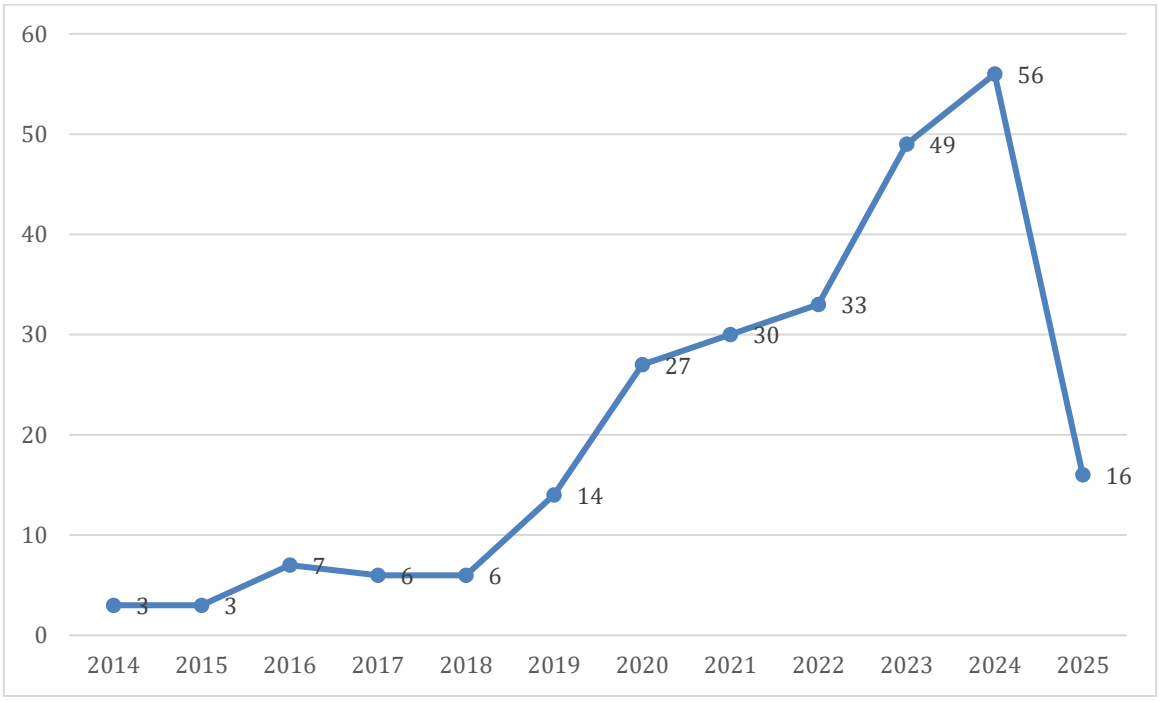


***Рис. 2**. Число публикаций по цифровым экосистемам с 2014 по 2025 гг.*
(составлено авторами)

***Fig. 2**. Number of publications on digital ecosystems from 2014 to 2025.*
(compiled by the authors)

На рисунке 3 представлена трехпольная диаграмма, построенная на основе ключевых слов авторов, названий статей и идентификаторов статей в базе данных, которые являются метаданными собранного документа из базы данных Scopus. Ключевые слова авторов предоставляются самими авторами статей, а идентификаторы статей в базе данных алгоритмически извлекаются или генерируются базой данных Scopus из названий и аннотаций цитируемых статей. При создании этой визуализации параметры были заданы с использованием трех метаданных: ключевых слов авторов статей по цифровым экосистемам (DE),

представленных в левом поле; названий статей (TI_TM) в среднем поле и идентификаторов статей в базе данных (ID), извлеченных с помощью интеллектуального анализа текста и представленных в правом поле.

На основе этого подхода было выявлено 20 основных элементов в каждой категории и установлены взаимосвязи между ними. Как видно из диаграммы, термин «digital» в названиях статей (категория TI_TM) имеет максимальное количество связей с термином «digital ecosystems» в категории DE и термином «digital ecosystem» в категории ID. Эти термины являются центральными при обсуждении цифровых экосистем. Основываясь на представленных на диаграмме данных, мы можем сделать вывод о связи изучаемой проблематики с Индустрией 4.0, цифровыми технологиями, цифровыми платформами, цифровой трансформацией, кибербезопасностью, доверием, инновациями, устойчивостью, экологией, информационными системами, искусственным интеллектом, социальными медиа и т. д. Это позволяет говорить не только о высокой актуальности проблематики цифровых экосистем в современной науке и практике, но и о важности инновационных, социальных и экологических аспектов ее изучения.

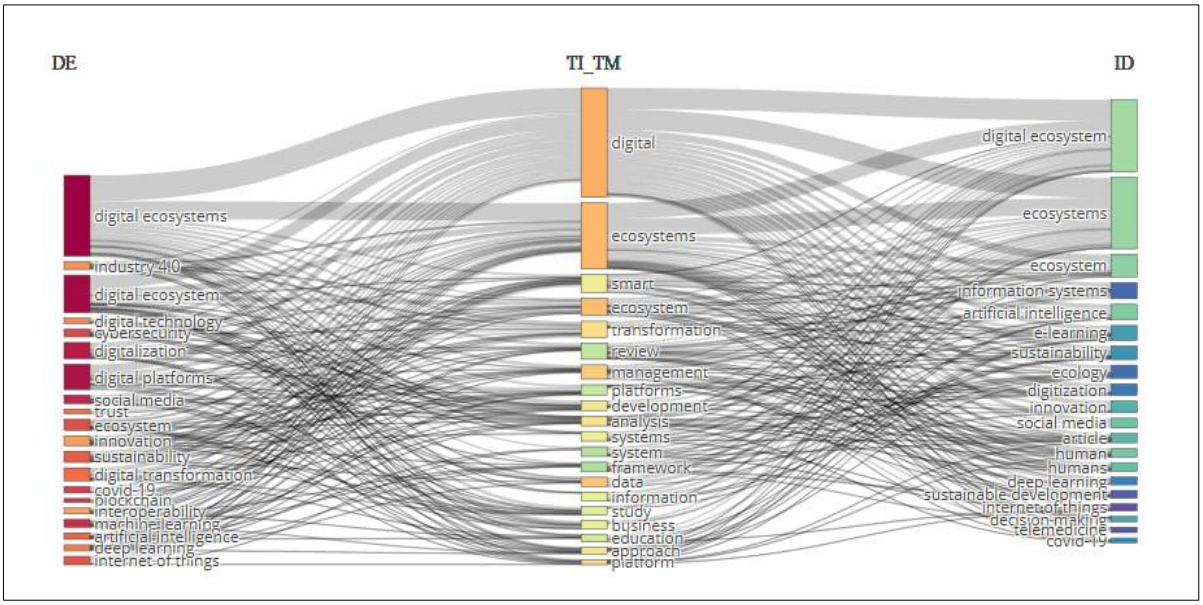


***Рис. 3**. Трехпольная диаграмма связи ключевых слов авторов, названий и идентификаторов статей в базе данных (*составлено авторами)

***Fig. 3**. Three-field diagram of the relationship between author keywords, titles and article identifiers in the database (*compiled by the authors)

В таблице 1 представлены десять наиболее цитируемых в мире публикаций, отобранных по показателям общего количества цитирований и общего количества цитирований в год. Эти публикации вносят наиболее существенный вклад в теоретические, методологические и концептуальные основы, развивая науку в области ЦЭ. По общему количеству цитирований наибольшее общее цитирование имеют публикации Gabor D. – 495 цитирований и Thomas E. – 336 цитирований. Статья Gabor D. рассматривает, как цифровые экосистемы способствуют развитию финтеха [16]. Статья Thomas E. подтверждает значимую роль цифровых экосистем в развитии и долгосрочной устойчивости внедрения телемедицины [30]. По общему количеству цитирований в год лидируют Thomas E. (84,00) и Plekhanov D. (66,67), что говорит о высоком глобальном научном влиянии данных авторов.

Таблица 1. Десять наиболее цитируемых статей по цифровым экосистемам

Table 1. The ten most cited papers on digital ecosystems

Статья	DOI	Общее число цитирований	Общее число цитирований в год
Gabor D, 2017, New Polit Econ [16]	10.1080/13563467.2017.1259298	495	55.00
Thomas E., 2022, J Telemed Telecare [30]	10.1177/1357633X20960638	336	84.00
Brunetti F., 2020, TQM J [10]	10.1108/TQM-12-2019-0309	311	51.83
Plekhanov D., 2023, EUR Manage J [28]	10.1016/J.Emj.2022.09.007	200	66.67
Van Dijck J., 2019, Internet Policy Rev [32]	10.14763/2019.2.1414	164	23.43
Iyawa G., 2016, Procedia Comput Sci [20]	10.1016/J.Procs.2016.09.149	127	12.70
Namugenyi C., 2019, Procedia Comput Sci [26]	10.1016/J.Procs.2019.09.283	116	16.57
Mihelj S., 2021, Nations NATL [25]	10.1111/Nana.12685	105	21.00
De Las Heras-Pedrosa C., 2020, Int J Environ Res Public Health [12]	10.3390/Ijerph17155542	101	16.83
Barykin S., 2020, J Open Innov: Technol Mark Complex [8]	10.3390/Joitmc6040124	94	15.67

Источник: составлено авторами

На рисунке 4 представлены десять наиболее продуктивных журналов, внесших значительный вклад в растущую литературу по цифровым экосистемам за десятилетие, с указанием числа публикаций. Ведущую роль играет Sustainability Journal, в котором было сделано десять публикаций, за ним следует E3S WEB of Conferences с шестью публикациями. Оба издания вносят существенный вклад в развитие проблематики исследования, предлагая ее для обсуждения глобальной аудитории, что приводит к быстрому развитию направления исследований и дессиминации результатов. Представленные на рисунке 4 журналы не ограничиваются одной академической областью и охватывают междисциплинарные ландшафты, привлекая внимание разных читателей. Это подчеркивает междисциплинарный характер исследований в области цифровых экосистем.

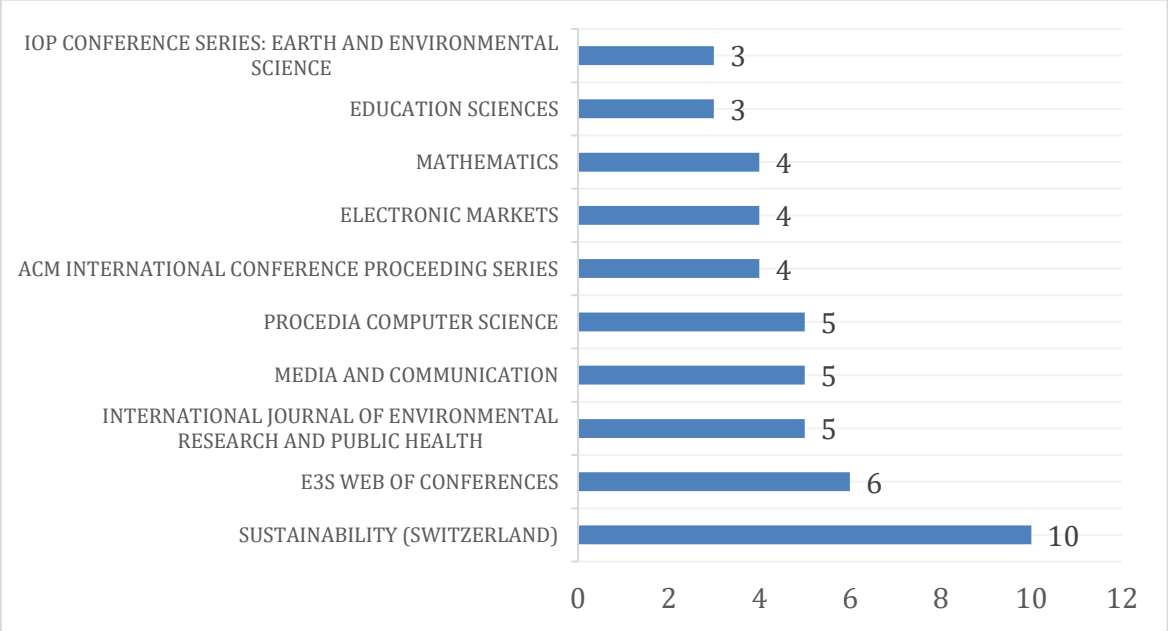


Рис. 4. *Десять наиболее продуктивных журналов по цифровым экосистемам* (составлено авторами)

Fig. 4. *The ten most productive journals on digital ecosystems* (compiled by the authors)

Таблица 2 демонстрирует десять стран, наиболее активно проводящих исследования в области цифровых экосистем. Наивысшей научной производительностью в данной области обладает Германия, на долю которой приходится 63 (25,2 %) от общего числа проанализированных публикаций. На втором месте находится Великобритания с 58 публикациями (23,2 %), на третьем – Испания с 57 публикациями (22,8 %). Данные таблицы 2 также показывают, что развитые страны демонстрируют более высокие показатели научной производительности в области цифровых экосистем.

Таблица 2. Страны-лидеры по публикациям в области цифровых экосистем

Table 2. Leading countries in publications in the field of digital ecosystems

Страна	Число публикаций
Германия	63
Великобритания	58
Испания	57
Италия	55
Китай	35
США	35
Финляндия	31
Дания	24
ЮАР	21
Франция	20

Источник: составлено авторами

Карта наиболее часто встречающихся ключевых слов представлена на рис. 5. Как демонстрирует рисунок 5, словосочетание «digital ecosystems» имеет самую высокую частоту встречаемости – 58 раз (19 %) – по сравнению с другими основными ключевыми словами во всем наборе проанализированных публикаций. На втором месте по частоте находится словосочетание «digital ecosystem» – 20 раз (7 %) на третьем – «digital platforms» (14,5 %), на четвертом – «digitalisation» (10,3 %), на пятом – «social media» (9,3 %), на шестом – «machine learning» (8,3 %). Места с седьмого по десятое заняты терминами «blockchain», «Covid-19», «cybersecurity» и «ecosystem», каждый из которых имеет по 7 упоминаний (3 %).

Анализ совместного упоминания ключевых слов, использованных авторами статей, представлен на рисунке 6. Он иллюстрирует взаимосвязи между ключевыми словами, которые связаны одновременным упоминанием хотя бы в одной публикации. В данной визуализации узел является ключевым словом, размер которого определен частотой упоминания, а связующие линии демонстрируют, с какими ключевыми словами данное слово встречалось совместно в цитируемых документах. Толщина связующих линий указывает на частоту совместного упоминания данного слова с другими ключевыми словами. Визуализация сети совместного упоминания ключевых слов создает набор кластеров, иллюстрирующих различие в исследовательских фокусах проанализированых статей. Словосочетание «digital ecosystems» имеет наибольший размер узла и наибольшее количество связующих путей с другими терминами, что указывает на высокую частоту совместного упоминания с другими темами (например, с цифровизацией, цифровыми платформами, цифровой экономикой и др.), представленную количеством исходящих путей из узла.

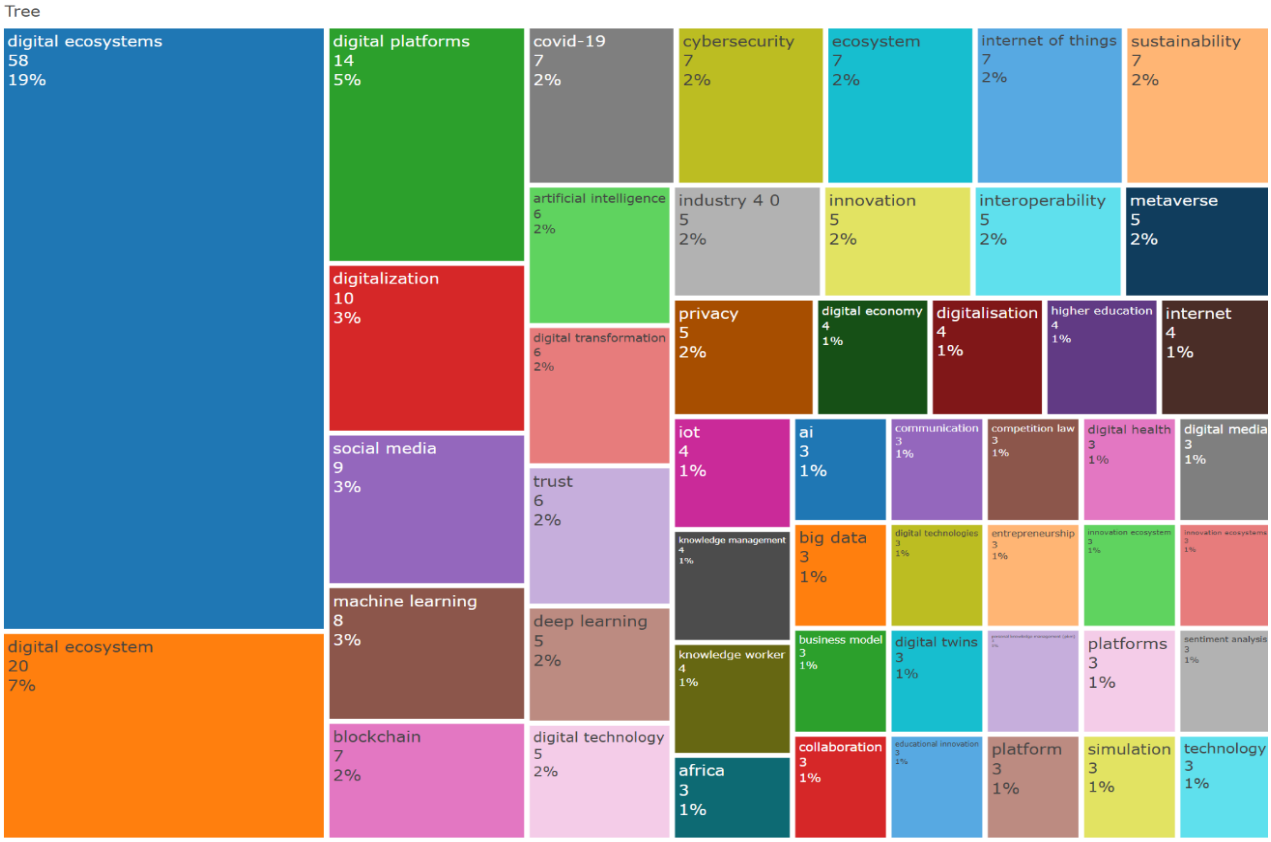


Рис. 5. *Карта частоты ключевых слов, использованных авторами статей*
(составлено авторами)

Fig. 5. *Keyword frequency map used by article authors*
(compiled by the authors)

Анализ совместного упоминания ключевых слов, представленный на рисунке 6, дает возможность выделить 7 кластеров, иллюстрирующих основные области исследований. По значимости их можно проранжировать следующим образом. Лидирует цифровой инновационный кластер (в центре, выделен коричневым цветом), содержащий 10 элементов. За ним следуют кластеры предпринимательского взаимодействия (красный) и технического обеспечения (синий), содержащие по 6 элементов. Далее идет коммуникационный кластер (желтый), в котором находятся 4 элемента. Затем правовой (зеленый) и образовательный (розовый), содержащие по 3 элемента. Наконец, последним является кластер специфических областей (фиолетовый), включающий 2 элемента, не включенные в другие кластеры. Представленная на рисунке 6 визуализация позволяет лучше понять основные исследовательские направления и взаимосвязи между ними.

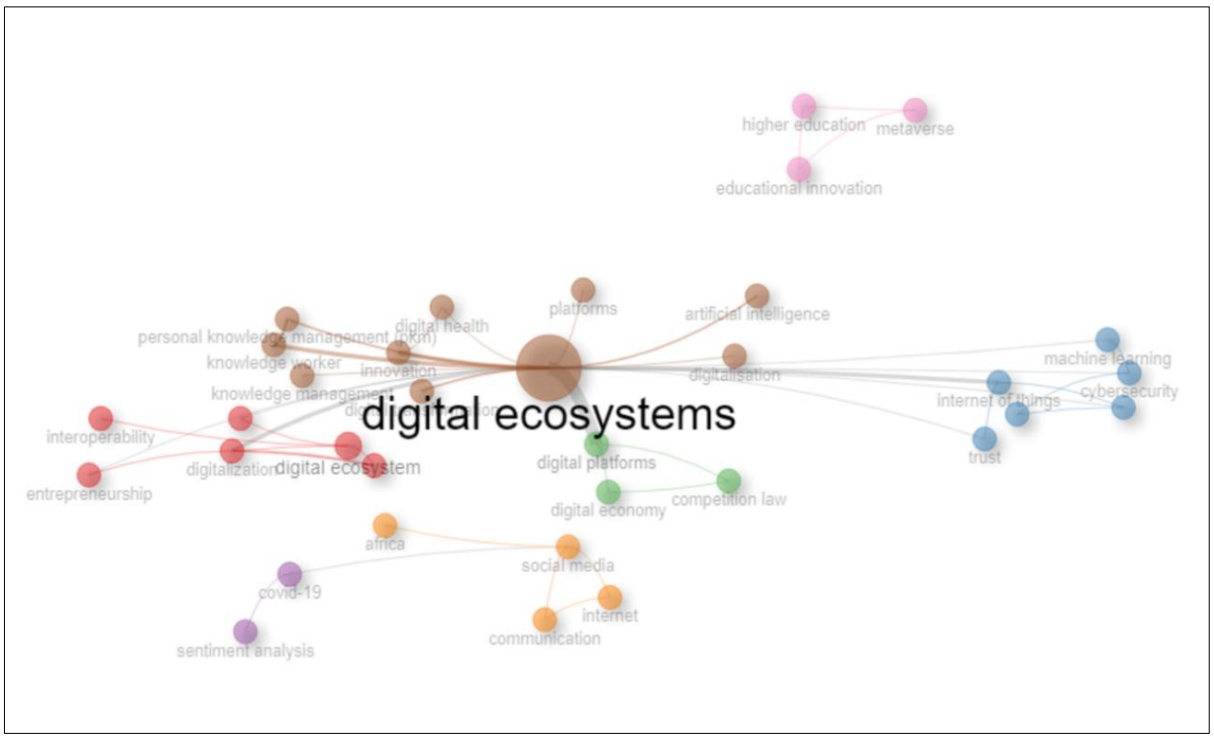


***Рис. 6**. Анализ совместного употребления ключевых слов, использованных авторами статей*
(составлено авторами)

***Fig. 6**. Analysis of the co-occurrence of keywords used by article authors*
(compiled by the authors)

Выводы

Результаты исследования указывают на рост числа публикаций в области цифровых экосистем, темпы которого существенно возросли начиная с 2018 года. Это говорит о том, что цифровые экосистемы являются актуальной и важной для науки темой, привлекающей интерес большого числа исследователей. Мы провели анализ ключевых публикаций в области цифровых экосистем, определив десять наиболее влиятельных авторов по количеству цитирований статей. Германия, Великобритания и Испания были основными странами по числу опубликованных исследований. Большинство публикаций по цифровым экосистемам было сделано авторами из развитых стран. Единственной развивающейся страной в списке топ-10 является ЮАР. Установлено, что наиболее влиятельными журналами, в которых было опубликовано большинство статей по цифровым экосистемам, являются Sustainability и E3B Web of Conferences.

Анализ использованных ключевых слов показывает, что наиболее часто употребляемым ключевым словом является «digital ecosystems». В десятку наиболее употребляемых также вошли словосочетания «digital ecosystem», «digital platforms», «social media», «machine learning», слова «digitalisation», «blockchain», «Covid-19», «cybersecurity» и «ecosystem». Мы также исследовали, как ключевые слова создают связи с другими и формируют тематические кластеры. На основе тематических карт и анализа совместного употребления слов и словосочетаний было выделено семь основных тематических кластеров в области цифровых экосистем. Сетевой анализ показывает, что концепция цифровых экосистем образует широкую и устойчивую сеть с другими экономическими, социальными и техническими концепциями. Это задает направления будущих исследований цифровых экосистем в контексте развития цифровой трансформации и цифровых технологий.

Данное исследование имеет некоторые ограничения. Так, оно проводилось с использованием информации из единой базы данных (Scopus). Будущие исследователи могут расширить область изысканий, включив другие базы данных, что позволит провести более подробный и широкий анализ. Кроме того, данное исследование имеет широкий фокус, который может быть сужен до отраслевого анализа или углубленных исследований отдельных направлений развития и использования цифровых экосистем. Также определенную ценность может представлять сравнительный анализ существующих цифровых экосистем с выявлением их общих черт и ключевых отличий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Барыкин С. Е., Алексеева Н. С.* Управленческие модели координации участников инновационной экосистемы // Тенденции экономического развития в XXI веке: материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию экономического факультета БГУ. В 2 ч., Минск, 28–29 февраля 2024 года. Минск: Белорусский государственный университет, 2024. С. 266–268.

Barykin S.E., Alekseeva N.S. Management models for coordinating participants in an innovation ecosystem. Trends in economic development in the 21st century: *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference Dedicated to The 25th Anniversary of the Faculty of Economics of BSU*. In 2 parts, Minsk, February 28–29, 2024. Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy universitet, 2024. Pp. 266–268. (In Russian)

2. *Корчагина Е. В.*, *Еремин К. А., Видинеева Е. В.* Цифровые логистические платформы: анализ зарубежного опыта // Журнал правовых и экономических исследований. 2021. № 4. С. 27–31. DOI: 10.26163/GIEF.2021.42.11.004.

Korchagina E.V., Eremin K.A., Vidineeva E.V. Digital logistics platforms: analysis of foreign experience. *Journal of Legal and Economic Research.* 2021. No. 4. Pp. 27–31. DOI: 10.26163/GIEF.2021.42.11.004. (In Russian)

3. *Корчагина Е. В.* Цифровые логистические платформы: подходы к классификации // Журнал правовых и экономических исследований. 2022. № 2. С. 13–17. DOI: 10.26163/GIEF.2022.85.79.002

Korchagina E.V. Digital logistics platforms: approaches to classification. *Journal of Legal and Economic Research*. 2022. No. 2. Pp. 13–17. DOI: 10.26163/GIEF.2022.85.79.002. (In Russian)

4. *Лавская К. К., Барыкин С. Е., Макаренко Е. А.* Цифровой помощник в контексте понятий цифровой платформы и цифровой экосистемы // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. Т. 7. № 10(139). С. 162–175. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2023.10.07.020

Lavskaya K.K., Barykin S.E., Makarenko E.A. Digital assistant in the context of the concepts of digital platform and digital ecosystem. *Economy and Management: Problems, Solutions*. 2023. Vol. 7. No. 10(139). Pp. 162–175. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2023.10.07.020. (In Russian)

5. Anand S., Enayati M., Raj D. et al. Internet over the ocean: A smart IoT-enabled digital ecosystem for empowering coastal fisher communities. *Technology in Society*. 2024. No. 79. P. 102686. DOI: 10.1016/j.techsoc.2024.102686

6. Aria M., Cuccurullo C. Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*. 2017. No. 11(4). Pp. 959–975. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007

7. Baas J., Schotten M., Plume A. et al. Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. *Quantitative Science Studies*. 2020. Vol. 1. No. 1. Pp. 377–386. DOI: 10.1162/qss_a_00019

8. Barykin S.Y., Kapustina I.V., Kirillova T.V. et al. Economics of digital ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*. 2020. 6(4). 124. DOI: 10.3390/joitmc6040124

9. Bejjani M., Göcke L., Menter M. Digital entrepreneurial ecosystems: A systematic literature review. *Technological Forecasting and Social Change*. 2023. No. 189. P. 122372. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122372

10. Brunetti F., Matt M.T., Bonfanti A. et al. Digital transformation challenges: strategies emerging from a multi-stakeholder approach. *TQM Journal*. 2020. Vol. 32. No. 4. Pp. 697–724. DOI: 10.1108/TQM-12-2019-0309

11. Cao Y., Fan Y., Wang Y., Liao X. Effect of digital ecosystem embeddedness on farmers' entrepreneurial performance: Evidence from China. *Data Science and Management*. 2025. DOI: 10.1016/j.dsm.2025.06.004

12. De las Heras-Pedrosa C., Sánchez-Núñez P., Peláez J.I. Sentiment analysis and emotion understanding during the COVID-19 pandemic in Spain and its impact on digital ecosystems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. No. 17*(*15). P. 5542. DOI: 10.3390/ijerph17155542

13. Fernández-Portillo A., Ramos-Vecino N., Ramos-Mariño A., & Cachón-Rodríguez G. How the digital business ecosystem affects stakeholder satisfaction: Its impact on business performance. *Review of Managerial Science*. 2024. No. 18(9). Pp. 2643–2662. DOI: 10.1007/s11846-023-00720-2

14. Fu H., Xiao X.-H., & Zhu H.-M. Big gains in digital ecosystem niches: How facilitators emerge and develop into an organizational category. *Information & Management*. 2024. No. 61(4). P. 103957. DOI: 10.1016/j.im.2024.103957

15. Gamidullaeva L., Tolstykh T., Bystrov A. et al. Cross-Sectoral digital platform as a tool for innovation ecosystem development. *Sustainability*. 2021. No. 13(21). P. 11686. DOI: 10.3390/su132111686

16. Gabor D. & Brooks S. The digital revolution in financial inclusion: International development in the fintech era. *New Political Economy*. 2017. No. 2(4). Pp. 423–436. DOI: 10.1080/13563467.2017.1259298

17. Gawer A., Bonina C. Digital platforms and development: Risks to competition and their regulatory implications in developing countries. *Information and Organization*. 2024. No. 34(3). P. 100525. DOI: 10.1016/j.infoandorg.2024.100525

18. Goertler T., Papert M., Fischer I., Schmidt M. Building digital platform ecosystems: a synthetization of fundamental design topics from a literature review. *Digital Business*. 2025. No. 5(1). P. 100109. DOI: 10.1016/j.digbus.2025.100109

19. Hein A., Schreieck M., Riasanow T. et al. Digital platform ecosystems. *Electronic Markets*. 2020. Vol. 30(1). Pp. 87–98. DOI: 10.1007/s12525-019-00377-4

20. Iyawa G.E., Herselman M., Botha A. Digital health innovation ecosystems: from systematic literature review to conceptual framework. *Procedia Computer Science*. 2016. No. 100. Pp. 244–252. DOI: 10.1016/j.procs.2016.09.149

21. Koch M., Krohmer D., Naab M. et al. A matter of definition: Criteria for digital ecosystems. *Digital Business*. 2022. No. 2(2). P. 100027. DOI: 10.1016/j.digbus.2022.100027

22. Korchagina E., Barykin S., Suvorova S. et al. The treatment of optimizing container transportation dynamic programming and planning. *E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019*, Divnomorskoe Village, 09–14 September 2019. Vol. 135. Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. P. 02016. DOI: 10.1051/e3sconf/201913502016

23. Lam W.S., Lam W.H., Lee P.F. A bibliometric analysis of digital twin in the supply Chain. *Mathematics*. 2023. No. 11(15). P. 3350. DOI: 10.3390/math11153350

24. Liu Z., Pan Q. Research on value creation path of logistics platform under the background of digital ecosystem: Based on SEM and fsQCA methods. *Electronic Commerce Research and Applications*. 2024. No. 67. P. 101424. DOI: 10.1016/j.elerap.2024.101424

25. Mihelj S., Jiménez-Martínez C. Digital nationalism: understanding the role of digitalmedia in the rise of 'new' nationalism. *Nations and Nationalism.* 2021. No. 27. Pp. 331–346. DOI: 10.1111/nana.12685346

26. Namugenyi C., Nimmagadda S.L., Reiners T. Design of a SWOT analysis model and its evaluation in diverse digital business ecosystem contexts. *Procedia Computer Science*. 2019. No. 159. Pp. 1145–1154, DOI:10.1016/j.procs.2019.09.283.

27. Nativi S., Mazzetti P., Craglia M. Digital ecosystems for developing digital twins of the earth: the destination earth case. *Remote Sensing*. 2021. No. 13(11). P. 2119. DOI: 10.3390/rs13112119

28. Plekhanov D., Franke H., Netland T.H. Digital transformation: a review and research agenda. *European Management Journal.* 2023. Vol. 41. No. 6. Pp. 821–844. DOI: 10.1016/j.emj.2022.09.007

29. Suuronen S., Ukko J., Eskola R. et al. A systematic literature review for digital business ecosystems in the manufacturing industry: Prerequisites, challenges, and benefits. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022. Vol. 37. Pp. 414–426. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.02.016

30. Thomas E.E., Haydon H.M., Mehrotra A. et al. Building on the momentum: sustaining telehealth beyond COVID-19. *Journal of Telemedicine and Telecare*. 2022. Vol. 28(4). Pp. 301–308. DOI: 10.1177/1357633x20960638

31. Ungureanu P., Bellesia F., Cochis C. Dealing with blame in digital ecosystems: the DAO failure in the ethereum blockchain. *Technological Forecasting and Social Change*. 2025. No. 215. P. 124096. DOI: 10.1016/j.techfore.2025.124096

32. Van Dijck J., Nieborg D. & Poell T. Reframing platform power. *Internet Policy Review*. 2019. No. 8(2). DOI: 10.14763/2019.2.1414

33. Volz F., Münch C., Küffner C., Hartmann E. Digital ecosystems and their impact on organizations – A dynamic capabilities approach. 2025. DOI: 10.1111/ijmr.12396

34. Wube M.C. Supply chain management of micro, small, and medium enterprises (MSMEs) in Africa: A bibliometric analysis. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 2024.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Маугатие Т.В. – подбор методического инструментария, практическая апробация и описание;
Корчагина Е. В. – научное руководство исследованием, постановка целей и задач исследования.

Contribution of the authors:

Mawugatie T.W. – scientific supervision of the study, setting the goals and objectives of the study;
Korchagina E.V. – selection of methodological tools, practical testing and description.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Темеселью Волдетсадик Маугатие, аспирант Института промышленного менеджмента, экономики и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
195221, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29;
temesel2007@gmail.com

Елена Викторовна Корчагина, д-р экон. наук, доцент, профессор Института промышленного менеджмента, экономики и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
195221, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29;
elena.korchagina@mail.ru, SPIN-код: 8556-2270

Information about the authors

Temeselew W. Mawugatie, Postgraduate Student of the Institute of Industrial Management, Economics and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;
29, Polytechnicheskaya street, Saint Petersburg, 195221, Russia;
temesel2007@gmail.com

Elena V. Korchagina, Doctor of Economic Sciences, Assistant Professor, Professor of the Institute of Industrial Management, Economics and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;
29, Polytechnicheskaya street, Saint Petersburg, 195221, Russia;
elena.korchagina@mail.ru, SPIN-code: 8556–2270

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 338.2 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-224-236
IMZMTE

Особенности цифровой трансформации российской экономики

И. В. Перфильев✉, Е. С. Балашова

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская улица, 3

Аннотация. Цифровая трансформация представляет собой процесс внедрения современных цифровых технологий во все сферы деятельности компании, государства и общества в целом. Она включает использование облачных вычислений, больших данных, искусственного интеллекта, интернета вещей и других инновационных технологий для повышения удобства взаимодействия с клиентами, а также усиления эффективности и конкурентоспособности бизнеса. В то же время цифровая трансформация является зоной высокой неопределенности, связанной с динамичностью цифровой среды и ее подверженностью постоянным изменениям, что формирует дополнительные риски для бизнеса. Цифровая трансформация ведет к смене паттернов потребительского поведения, механизмов конкурентной борьбы, парадигмы ведения бизнеса. Все это обусловливает актуальность представленного исследования.

Цель исследования – провести анализ ключевых трендов цифровой трансформации мировой и российской экономики.

Методы исследования. Методологической основой исследования выступают методы системного и сравнительного анализа, дедукции и логического обобщения. Также использованы эмпирические данные международных аналитических агентств, статистика цифрового развития и экспертные оценки.

Результаты. В статье проведен анализ трендов цифровой трансформации мировой экономики. Описаны основные стадии развития технологических инноваций. Выделены наиболее перспективные цифровые технологии для внедрения. Представлена классификация стран по степени внедрения цифровых технологий. Определена позиция России в мировом рейтинге цифровой трансформации. Выявлены особенности цифровизации российского бизнеса. Указаны основные сложности и барьеры, с которыми сталкиваются российские компании в процессе цифровой трансформации. Охарактеризованы факторы, способные стать драйверами цифровизации российских компаний.

Заключение. Сделан вывод о необходимости активного государственного участия в устранении цифрового неравенства, повышении цифровой грамотности населения и формировании благоприятной институциональной среды для инновационного предпринимательства. Ключевыми условиями успешной цифровой трансформации в российских реалиях определены: развитие цифровой инфраструктуры, стимулирование внедрения технологий в бизнес-среду, подготовка кадров, а также обеспечение кибербезопасности.

Ключевые слова: цифровая трансформация, международные тренды цифровизации, перспективные технологии, цифровое развитие национальных экономик, цифровизация российских компаний

Поступила 07.10.2025, одобрена после рецензирования 09.12.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Перфильев И. В., Балашова Е. С. Особенности цифровой трансформации российской экономики // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 224–236. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-224-236

© Перфильев И. В., Балашова Е. С., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

JEL: O33 Original article

Features of digital transformation in Russia's economy

I.V. Perfiliev✉, E.S. Balashova

State Marine Technical University
3, Lotsmanskaya street, Saint Petersburg, 190121, Russia

Abstract. Digital transformation is the process of implementing modern digital technologies in all areas of a company, government, and society as a whole. It encompasses the use of cloud computing, big data, artificial intelligence, the Internet of Things, and other innovative technologies to improve customer experience, as well as enhance business efficiency and competitiveness. At the same time, digital transformation is a highly uncertain environment, driven by the dynamism of the digital environment and its constant change, which creates additional risks for businesses. Digital transformation leads to shifts in consumer behavior patterns, competitive mechanisms, and business paradigms. All of this underscores the relevance of this research.

Aim. The study is to analyze key trends in the digital transformation of the global and Russian economies.

Research methods. The methodological foundation of the study includes methods of systems and comparative analysis, deduction, and logical generalization. Empirical data from international analytical agencies, digital development statistics, and expert evaluations are also employed.

Results. This article analyzes trends in the digital transformation of the global economy. It describes the main stages of technological innovation development and identifies the most promising digital technologies for implementation. It presents a classification of countries based on their level of digital technology adoption. Russia's position in global digital transformation rankings is determined. The specific features of Russian business digitalization are discovered. The main challenges and barriers faced by Russian companies in the digital transformation process are identified. Factors that could drive the digitalization of Russian companies are characterized.

Conclusion. The article concludes that active government involvement is essential to overcome digital inequality, improve digital literacy, and create a favorable institutional environment for innovative entrepreneurship. The study identifies the critical conditions for successful digital transformation in Russia: the development of digital infrastructure, the stimulation of technology adoption in business, workforce training, and ensuring cybersecurity.

Keywords: digital transformation, international digitalization trends, promising technologies, digital development of national economies, digitalization of Russian companies

Submitted 07.10.2025, approved after reviewing 09.12.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Perfiliev I.V., Balashova E.S. Features of digital transformation in Russia's economy. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 224–236. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-224-236

Введение

Присоединение к сети Интернет все большего числа участников привело к созданию новых возможностей для бизнеса и проникновению цифровых технологий в различные бизнес-процессы, начиная от взаимодействия с потребителями, поставщиками, посредниками и заканчивая оптимизацией внутренних регламентов и процедур [1]. Таким образом, цифровая трансформация является инструментом адаптации бизнеса к вызовам цифровой экономики [2]. Сегодня многими учеными и экспертами цифровая трансформация рассматривается как современное направление стратегического управления [3–6], основу

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

которого составляют цифровые технологии оптимизации бизнес-процессов [7]. Проведение цифровой трансформации открывает возможности для создания инновационных продуктов и услуг на основе цифровых технологий [8], но зачастую требует при этом изменений организационной структуры, переформатирования бизнес-моделей, развития цифровых компетенций персонала [9, 10], перестройки корпоративной культуры [11].

Цель цифровой трансформации бизнеса заключается в повышении его конкурентоспособности в нестабильной конкурентной среде. Достижение данной цели реализуется через адаптацию к новым угрозам и возможностям с помощью цифровых технологий. Ключевой особенностью такой адаптации является создание добавленной стоимости путем использования технологий искусственного интеллекта (ИИ), виртуальной и дополненной реальности, больших данных, блокчейна и других инструментов. Цифровые технологии обеспечивают возможность вывести процедуры принятия управленческих решений на новый, передовой уровень. Fortune Business Insights оценивает емкость мирового рынка анализа больших данных в 307,51 млрд долл. США в 2023 году, 348,21 млрд долл. США в 2024 году и ожидает рост этого рынка до 924,39 млрд долл. США к 2032 году, со среднегодовым приростом в 13,0 % в прогнозном периоде [12]. По оценке Ассоциации больших данных, рынок больших данных в России составил 170 млрд руб. в 2021 году, а дальнейшая консолидация усилий государства и бизнеса по развитию данного рынка обеспечит его 90% рост до 319 млрд руб. к концу 2024 года [13]. Цифровая трансформация является зоной высокой неопределенности. По мнению Бермана, цифровая трансформация приведет к смене парадигмы, «характеризующейся гиперсвязанностью и интеграцией потребителей и организаций по всему спектру деятельности в цепочке создания стоимости, включая совместные действия по дизайну и проектированию, производству и маркетингу, распределению и финансированию» [9]. Острой проблемой развития цифровой экономики становится отставание темпов роста цифровых компетенций персонала от темпов изменений в цифровой среде, которое постепенно накапливается на протяжении десятилетий.

Цель настоящего исследования заключается в анализе ключевых трендов цифровой трансформации мировой и российской экономики.

Результаты исследования

Расходы компаний на цифровую трансформацию в мире растут с каждым годом. International Data Corporation (IDC) прогнозирует, что глобальные расходы на цифровую трансформацию (DX) достигнут почти 4 триллионов долларов в 2027 году [14, 15]. Рост обусловлен инвестициями в искусственный интеллект (ИИ) и генеративные технологии. Прогнозируется, что рынок цифровой трансформации будет расширяться с годовым темпом роста 16,2 % в период с 2022 по 2027 год [14]. Организации продолжают отдавать приоритет цифровизации, прогнозируется значительный рост инвестиций в DX, который может превысить 2/3 всех расходов на информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) к 2027 году (рис. 1). По мнению Л. В. Лапидус, «цифровая экономика – это новая бизнес-среда» [15]. Движение бизнеса к цифровой трансформации стало ответом на средовые вызовы, сформированные эволюцией цифровой экономики, основу которой составляют онлайн-потребление, рынки и бизнес-модели. Цифровая экономика представляет собой совокупность отношений по поводу производства, распределения, обмена и потребления, реализованных на базе онлайн-технологий для удовлетворения потребностей B2C и B2B потребителей. Развитие цифровой экономики требует формирования инновационных управленческих подходов и соответствующих методов госрегулирования. Драйвером цифровой экономики являются технологии Индустрии 4.0, изменяющие условия жизни человека и социума.

Онлайн-технологии включают технологии разных поколений от Web 1.0, 2.0, 3.0 до 4.0, обеспечивающих проведение интернет-транзакций и способствующих созданию и распространению цифровых продуктов и сервисов. Интернет-транзакции в цифровой

экономике включают три основных направления: финансовые транзакции, обмен информацией и услугами. Онлайн, интернет и Web -технологии являются взаимозаменяемыми терминами. Цифровые технологии можно понимать как интернет-технологии, которые включают облачные инструменты, решения в области искусственного интеллекта, системы оценки и рекомендаций, программы лояльности, приложения интернета вещей (IoT), телемедицину и т. д. Цифровая трансформация представляет собой процесс внедрения современных цифровых технологий во все сферы деятельности компании, государства и общества в целом. Она включает использование облачных вычислений, больших данных, искусственного интеллекта, интернета вещей и других инновационных технологий для повышения удобства взаимодействия с клиентами, а также усиления эффективности и конкурентоспособности бизнеса. Основными аспектами цифровой трансформации являются:

- роботизация и автоматизация;
- интеграция данных и цифровых платформ;
- развитие электронных сервисов и дистанционного обслуживания;
- применение искусственного интеллекта и аналитики больших данных;
- улучшение цифровой безопасности и защиты персональных данных.

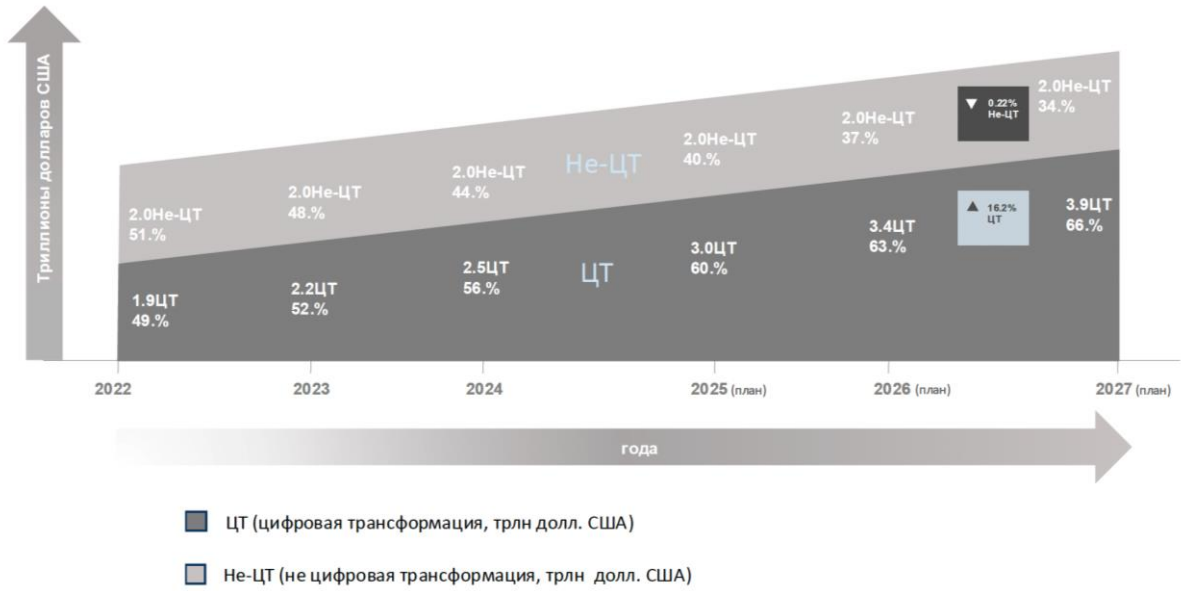


***Рис. 1**. Динамика расходов бизнеса на цифровую трансформацию с прогнозом до 2027 года [14]*

***Fig. 1**. Dynamics of business expenses on digital transformation with a forecast up to 2027 [14]*

Компания Gartner, фокусирующаяся на анализе информационных технологий и рынков, разработала кривую принятия технологий (также известную как цикл ажиотажа Gartner). Согласно этой кривой в процессе развития технологических инноваций можно выделить пять этапов: технологический триггер, пик ожиданий, пропасть разочарования, склон просветления и плато продуктивности. Технологический триггер обусловлен первыми публикациями о появлении перспективной технологии. Пик ожиданий связан с расширением популярности новой технологии среди бизнесменов и инвесторов в связи с предвкушением резкого роста эффективности. За пиком следует пропасть разочарования, связанная с проявлением недостатков и ограничений применения технологии, не оправдавшей сформированных ранее завышенных ожиданий. Следующая стадия обусловлена появлением технологических решений, преодолевающих выявленные ранее недостатки технологии, что приводит к расширению ее использования в коммерческих проектах. Наконец, последний этап связан с широким внедрением технологии и становлением ее основой нового хозяйственного уклада.

Компания Gartner на основе анализа более 2000 инновационных технологий выбирает наиболее перспективные, способные обеспечить рост эффективности и конкурентных преимуществ на горизонте от пяти до десяти и более лет (рис. 2). Анализ рисунка показывает, что в настоящее время почти все основные технологии Индустрии 4.0 достигли стадии внедрения [16]. Цифровая трансформация становится фактором международной конкуренции. Страны, первыми внедрившие цифровые технологии и обеспечившие их широкое распространение среди своих национальных компаний, становятся экономическими и индустриальными лидерами XXI века. Подходы к внедрению цифровых технологий в странах мира различаются, что связано с их международной экономической специализацией, различиями в стартовых уровнях промышленного и технологического развития, а также особенностями расстановки стратегических приоритетов, спецификой национальных инновационных систем и управленческих культур. Так, есть страны, которые преимущественно ориентируются на развитие цифрового производства (Германия), другие же фокусируются на сфере цифровых услуг (Великобритания). Есть те, кто предпочитает опираться на государственные программы и финансирование (Китай), и те, кто в большей степени поддерживает развитие частных инициатив (США) [17]. Сравнить страновый прогресс развития цифровой экономики, а также оценить степень проникновения цифровых технологий в повседневную жизнь разных стран можно на основе рейтинга Global Digitalization Index (GDI) [18]. В 2024 году на первом месте рейтинга находятся США, на втором – Сингапур, на третьем – Швеция. Помимо тройки лидеров, в первую десятку входят Австралия, Дания, Ирландия, Китай, Нидерланды, Финляндия и Швейцария. При этом даже страны первой десятки показывают неодинаковую динамику цифрового развития. В целом в рейтинге Global Digitalization Index проанализированные страны разделены на три группы на основе оценки четырех основных параметров: повсеместная связанность, цифровая основа, зеленая энергетика, политика и экосистемы (табл. 1).

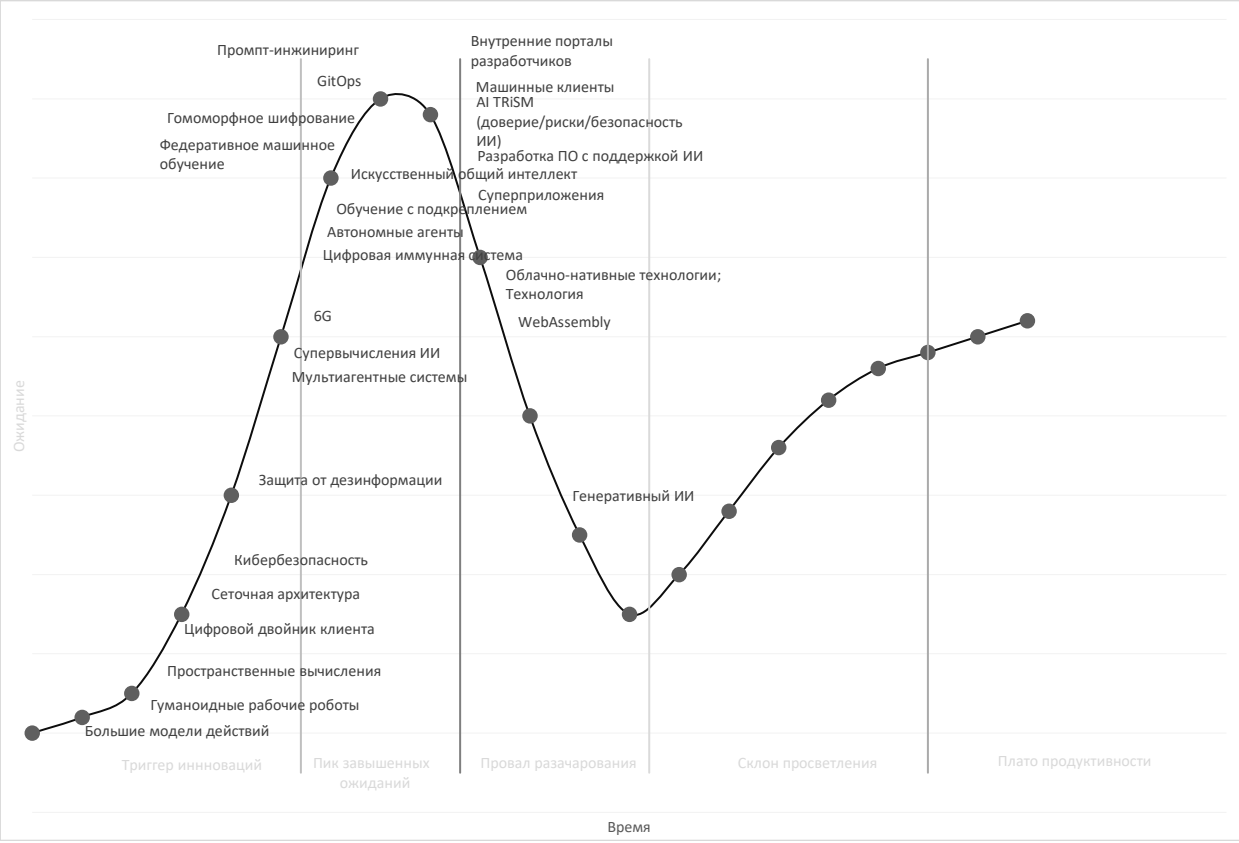


***Рис. 2**. Кривая принятия технологий (цикл ажиотажа Gartner) [16]*

***Fig. 2**. Technology adoption curve (Gartner hype cycle) [16]*

Таблица 1. Классификация стран по Global Digitalization Index (составлено авторами по материалам [18])

Table 1. Classification of countries according to the Global Digitalization Index (compiled by the authors based on materials from [18])

Группа	Страны	Характеристики
Лидеры	**Первая тройка**: США, Сингапур, Швеция, **Прочие** (в алфавитном порядке): Австралия, Австрия, Бельгия, Великобритания, Германия, Дания, Ирландия, Канада, Китай, Люксембург, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, ОАЭ, Финляндия, Франция, Швейцария, Южная Корея, Япония	Большинство из 22 стран этого кластера – экономики с высоким или выше среднего уровнем дохода. Они делают ставку на повсеместную подключенность и удобство для пользователя: бесшовный доступ к сервисам, высокие скорости и надежность. Параллельно лидеры ускоренно инвестируют в технологии следующего поколения – облака, центры обработки данных, передовые вычисления и системы хранения, 5G/FTTx, edge-инфраструктуру и ИИ. Сильные ИКТ-компетенции и развитые цифровые рынки служат катализатором преобразований в промышленности, транспорте, финансах, здравоохранении и государственном секторе. Экологическая повестка – еще один ключевой драйвер: энергоэффективные дата-центры, «зеленые» сети и мониторинг выбросов встраиваются в цифровую инфраструктуру. Усиленное внимание к кибербезопасности и стандартам совместимости поддерживает масштабируемость и доверие.
Внедряющие	**Ведущие** (в алфавитном порядке): Испания, Португалия, **Российская Федерация**, Саудовская Аравия, Эстония. **Прочие** (в алфавитном порядке): Бахрейн, Болгария, Бразилия, Венгрия, Греция, Индия, Италия, Колумбия, Кувейт, Литва, Малайзия, Мексика, Оман, Перу, Польша, Румыния, Сербия, Словакия, Словения, Таиланд, Турция, Уругвай, Хорватия, Чехия, Чили, Южная Африка	Страны, внедряющие цифровые технологии, быстро продвигаются благодаря широкому внедрению базовых технологий связи. Большинство из тридцати стран в этом кластере – развивающиеся экономики со средним уровнем дохода. Они уделяют особое внимание расширению охвата широкополосной связи, понимая, что надежная и доступная связь обеспечивает эффективные цифровые услуги. Ряд государств реализовал поддерживающую отраслевую политику для увеличения преимуществ подключения, например, упростив обмен данными для большего числа людей, семей и предприятий. Для **Российской Федерации** характерен верхнесредний уровень развития цифровой среды. Прогресс обеспечивают масштабы рынка и телеком-инфраструктура при ограниченном доступе к передовым технологиям и заметной региональной дифференциации. Отмечаются высокое интернет-проникновение и развитая мобильная связь; активно развиваются цифровые госуслуги («Госуслуги»), электронные платежи и электронная коммерция. Сильные компетенции – в прикладном ИИ, финтехе и облачных платформах. Реализуются программы импортозамещения (суверенная ИТ-инфраструктура, отечественное ПО и микроэлектроника). Ключевые вызовы: ограничения на импорт критичного оборудования, доступ к международным рынкам и инвестициям, дефицит ИТ-кадров. Приоритеты: локализация технологий, расширение дата-центров и облаков, кибербезопасность, пилоты цифрового рубля и отраслевые цифровые платформы.
Начинающие	Азербайджан, Алжир, Аргентина, Бангладеш, Боливия, Ботсвана, Вьетнам, Гана, Доминиканская Республика, Египет, Индонезия, Иордания, Казахстан, Кения, Коста-Рика, Марокко, Намибия, Нигерия, Пакистан, Танзания, Тунис, Филиппины, Уганда, Узбекистан, Эквадор (в алфавитном порядке)	Страны, отнесенные к этой группе, находятся на ранней стадии создания инфраструктуры ИКТ. Большинство из этих стран являются развивающимися. Эти страны сталкиваются с пробелами в покрытии территорий широкополосным интернетом, им необходимо улучшить подключение во всех аспектах и предоставить населению более широкий доступ к цифровой экономике. Начинающие страны, как правило, обладают богатыми природными ресурсами и могут сбалансировать цифровизацию с низкоуглеродным развитием посредством поддерживающей промышленной политики и перспективных планов.

Похожее исследование в области цифрового развития национальных экономик, проведенное The Fletcher School of Law and Diplomacy at Tufts University (USA) совместно с Mastercard, предлагает расчет Digital Intelligence Index (DII). Оно разделяет страны по Digital Intelligence Index на четыре группы [19]:

- Выдающиеся (Stand Outs) – продемонстрировавшие высокий уровень цифрового развития в прошлом и сохраняющие высокие темпы развития в настоящее время.
- Застойные (Stall Outs) – достигшие высокого уровня цифрового развития в прошлом, но теряющие темпы в настоящем с риском стать отстающими.
- Перспективные (Break Outs) – имеющие пока относительно низкий уровень цифрового развития, но обладающие мощным потенциалом.
- Наблюдаемые (Watch Outs) – имеющие низкие показатели как текущего уровня цифровизации, так и темпов ее роста.

Оценка по Digital Intelligence Index в 2014 году позволила отнести к группе выдающихся западноевропейские страны, Австралию, Гонконг, Израиль, Новую Зеландию, ОАЭ, Сингапур, США, Южную Корею и Японию. К перспективным и наблюдаемым были отнесены страны Азии, Африки, Восточной Европы и Южной Америки. В 2014 году Россия попала в группу наблюдаемых стран. Однако уже к 2017 году Россия перешла в перспективную группу как страна с высоким цифровым потенциалом. В 2020 году в оценку по Digital Intelligence Index были включены 90 стран. В новом рейтинге Россия сохранила свои позиции в перспективной группе (рис. 3). Digital Intelligence Index является комплексной оценкой прогресса в области внедрения цифровых технологий, рассчитываемой на основе 358 индикаторов, объединенных в две подгруппы: цифровой эволюции и цифрового доверия. Цифровая эволюция измеряет прогресс в четырех областях внедрения цифровых технологий: условия спроса, условия предложения, институциональная среда, инновации и изменения. Таким образом, сформированный индикатор описывает как текущее состояние, так и темпы развития цифровой эволюции и определяет ее приоритеты.

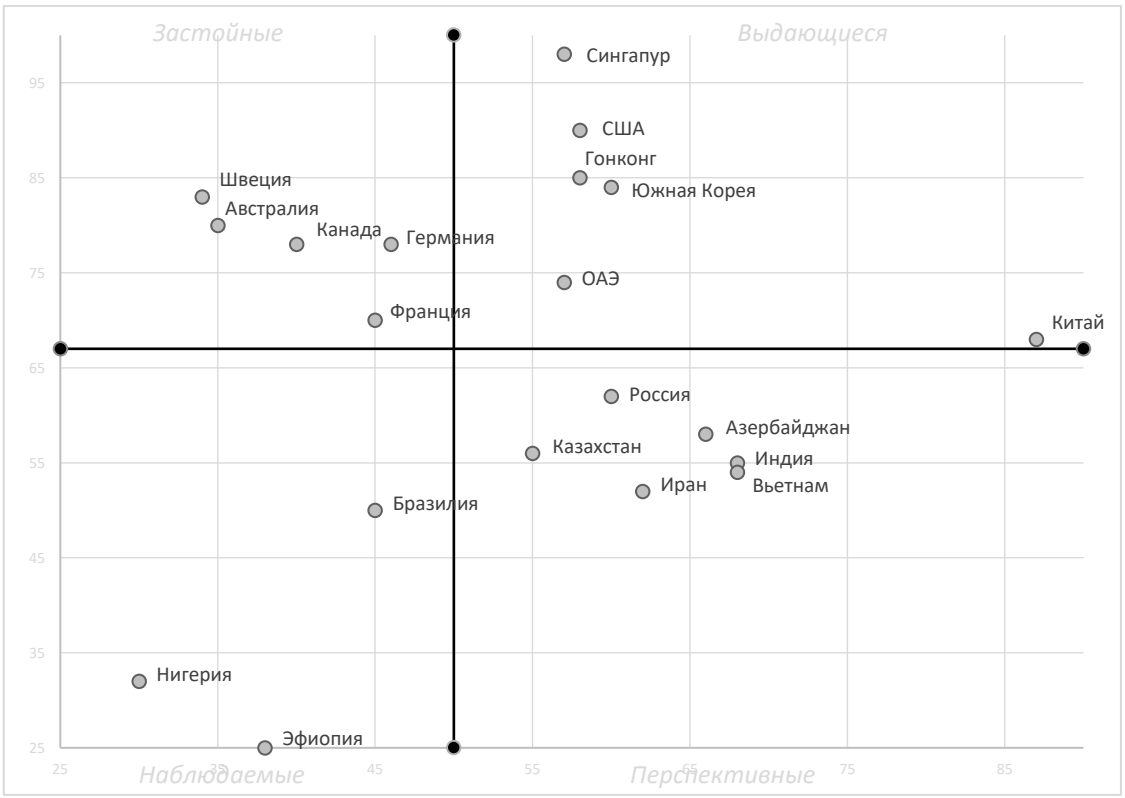
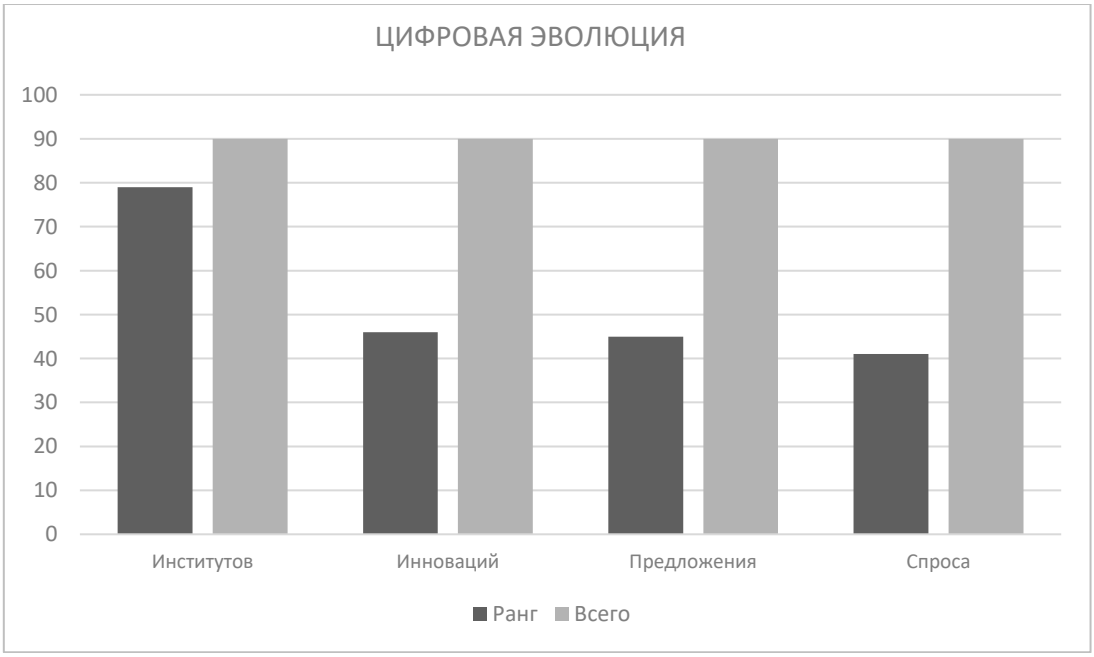


Рис. 3*. Классификация стран по Digital Intelligence Index (2020 г.) [19]*

Fig. 3*. Classification of countries according to the Digital Intelligence Index (2020) [19]*

Условия спроса описывают потребительский профиль (уровень доходов и расходов, развитость цифровых навыков), проникновение цифровых платежей (цифровые деньги, финансовые услуги и платежные технологии), проникновение цифровых устройств и распространение широкополосного Интернета (использование цифровых устройств, мобильного Интернета, web-сайтов, соцсетей). Условия предложения учитывают доступность базовой, транзакционной и инфраструктуры исполнения (включая пропускную способность, серверы, безопасность и доступность цифрового контента как характеристики первой; качество и уровень проникновения финансовых услуг в B2C и B2B сектора во второй; транспортные и логистические сети в третьей). Институциональная среда описывает развитие правовых институтов (регуляторную среду, соблюдение законов, прозрачность и качество управленческих процессов), деловой среды (уровень инвестиционной активности, конкурентность рынка, условия ведения бизнеса), цифровой экосистемы (развитие ИКТ, цифровые госуслуги и экосистемы). Инновации и изменения характеризуют привлекательность экосистем и конкурентность бизнес-среды (клиентоориентированность, уровень частных инвестиций), процессы (развитие НИОКР, доступность и распространенность инновационных технологий и услуг), стартап-культуру (количество новых предприятий, доступность капитала).

В рейтингах 2017 и 2020 годов к цифровой эволюции был добавлен индекс цифрового доверия. Система показателей цифрового доверия содержит четыре основных фактора: окружающую среду, поведение, опыт и отношение. Эти показатели позволяют оценить защищенность национальных цифровых экосистем, проникновение цифровых технологий, цифрой опыт, доверие к цифровой экосистеме. С учетом растущей зависимости населения от цифровых технологий и технологических компаний, масштабов дезинформации, снижения доверия к институтам, роста кибератак тема укрепления цифрового доверия приобретает первостепенное значение. Согласно отчету за 2020 год, Россия заняла 49-е место из 90 стран с результатом 52,78 балла (рис. 4). Исследователи отметили положительную динамику по первым двум факторам оценки (условия спроса и предложения), однако движение в сторону развития институциональной среды в России для развития инструментов цифровой трансформации остается слабым (79-е место) [19].



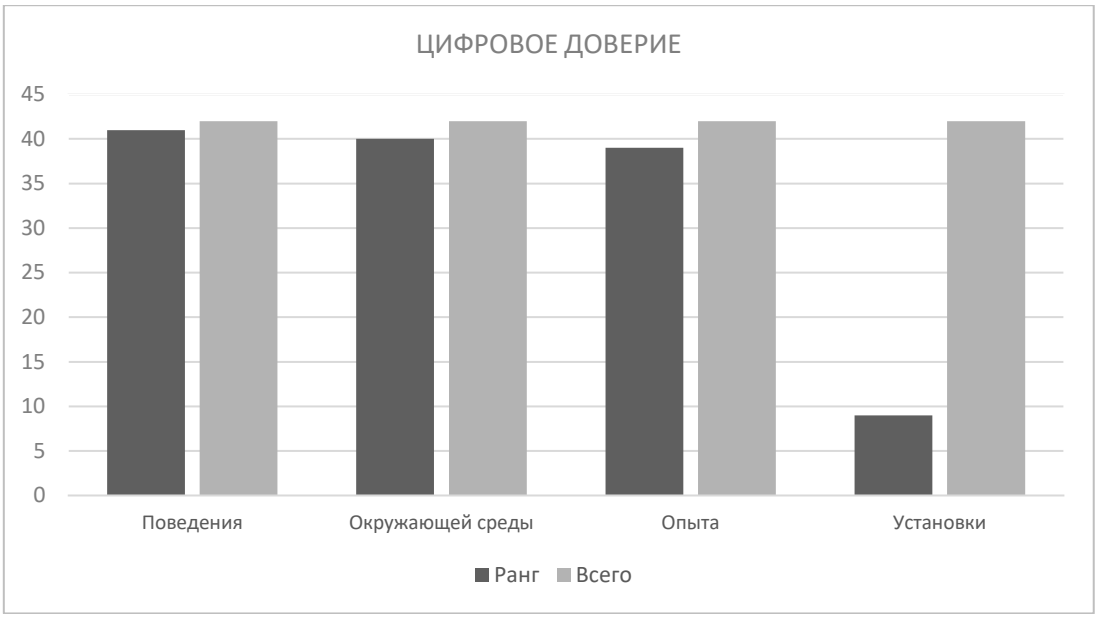


***Рис. 4**. Показатель Digital Intelligence Index для России (2020 г.) [19]*

***Fig. 4**. Digital Intelligence Index for Russia (2020) [19]*

Сегодня российская IT-индустрия демонстрирует уверенные темпы роста, увеличивая свою значимость в национальной экономике. По оценкам экспертов, IT-сектор включает более 200 тыс. компаний, или примерно каждую 12-ю организацию, что связано с задачей обеспечения технологического суверенитета. Для ее решения предприятия, связанные с работой критической инфраструктуры, должны использовать отечественные IT-решения. Государственная стратегия приносит значимые результаты и стимулирует инвестиции в российские IT-проекты. Эти выводы подтверждаются исследованием MWS, по данным которого в 2024 году объем IT-рынка оценивался в 3,3 трлн руб., а в 2025 году – в 4 трлн руб. (рис. 5).

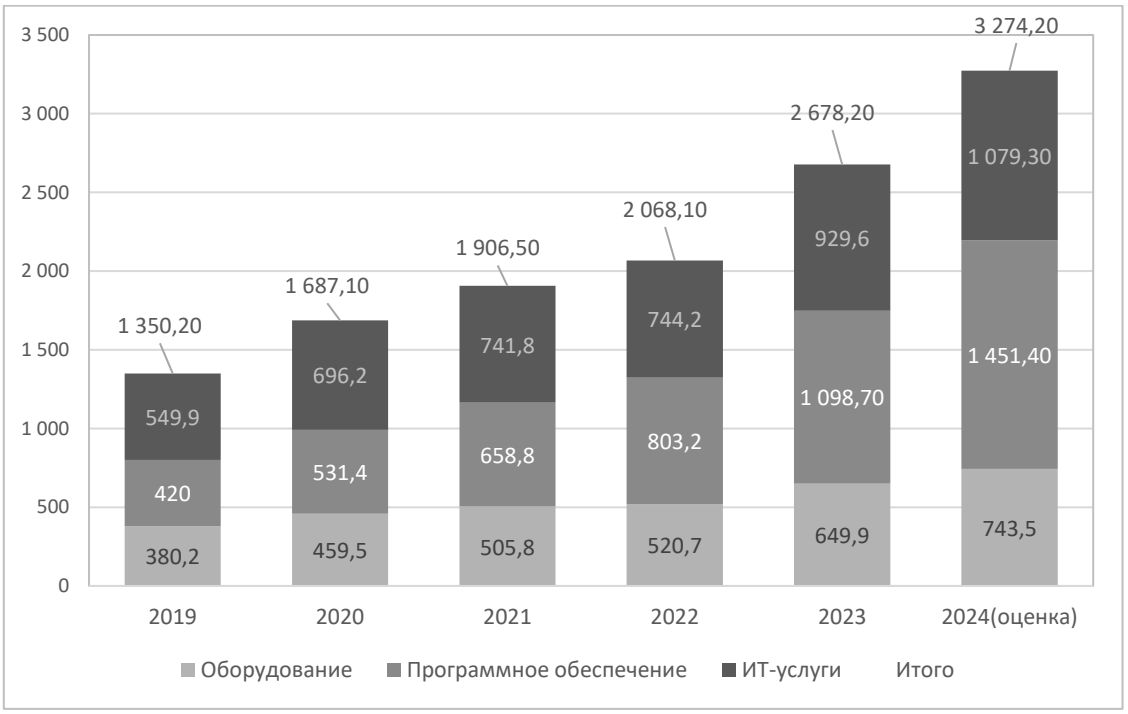


***Рис. 5**. Объем ИТ-рынка в России в 2019–2024 гг., млрд руб. [20]*

***Fig. 5**. IT market size in Russia in 2019–2024, billion rubles [20]*

CAGR 2019–2023 – это «среднегодовой совокупный темп роста» за 2019–2023 гг. (геометрическое среднее годовых темпов). Показывает, каким стабильным годовым темпом должен был расти показатель, чтобы из значения 2019 г. прийти к значению 2023 г.

Таблица 2. Среднегодовой совокупный темп роста, 2019–2023 гг.

Table 2. Average annual cumulative growth rate for 2019–2023.

Показатель	CAGR 2019–2023, %
Оборудование	14,34
Программное обеспечение	27,18
ИТ-услуги	14,03

Освобождение российского рынка от иностранных IT-компаний дало отечественному бизнесу возможность набрать сил и компетенций, что сделало возможной международную экспансию. Сегодня российские IT-компании осваивают рынки партнеров по БРИКС, стран Ближнего Востока, Азии и Африки. На внутреннем рынке процессы цифровой трансформации формируют спрос на новые IT-продукты для банковского сектора, розничной торговли, сферы образования и т. д. Отдельным трендом является усиление кооперации между IT-компаниями. В качестве примера можно назвать объединение усилий таких игроков, как Яндекс, ВКонтакте, ICL Techno, Diasoft, Lansoft, Базальт СПО для разработки комплексных продуктов. Отчасти это позволяет решить одну из серьезных проблем рынка, связанную с несовместимостью IT-решений разных компаний. Тем не менее уровень интеграции IT-продуктов российских поставщиков все еще является невысоким.

В 2024 году IT-индустрия составила 1,8 % российского ВВП, и если в дальнейшем ситуация будет развиваться благоприятно, ее доля может вырасти до 3 % (табл. 3) [20].

Таблица 3. Проникновение ИТ-рынков в ВВП в России и мире, в % за 2019–2024 гг. [20]

Table 3. Penetration of IT markets in GDP in Russia and the world, in % for 2019–2024 [20]

Рынок	Год					
	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Россия	1,23	1,57	1,40	1,33	1,56	1,83
Мир	2,15	2,31	2,28	2,37	2,49	2,62

Несмотря на то, что в целом тренды развития российского IT-рынка весьма позитивны, как отмечено выше, можно выделить ряд сложностей, которые могут его замедлить:

– Различия в используемой методологии: многие отечественные IT-провайдеры работают в соответствии с международными стандартами (ITIL, COBIT), но отсутствие национальной нормативной базы затрудняет полноценный переход на российские решения. В настоящее время IT-провайдеры разрабатывают соответствующие регламенты самостоятельно, что усложняет кооперацию с другими компаниями сектора.

– Неопределенность в оценке стоимости и прогнозировании сроков окупаемости IT-проектов: общая неопределенность политико-экономической ситуации и угроза возврата мировых IT-лидеров на российский рынок повышают инвестиционные риски. Для их снижения можно использовать партнерские проекты, что позволяет распределить риски и затраты между участниками.

– Сложность соединения программной и аппаратной компонент в IT-проектах: российским IT-провайдерам приходится переходить от замены западных продуктов к разработке

полноценных собственных решений на основе интеграции программного и аппаратного обеспечения в единую систему, что требует новых компетенций и дополнительных инвестиций.

– Совместимость инновационных IT-разработок с существующими программными решениями заказчиков: поскольку в настоящее время многие российские компании продолжают использование программного обеспечения, разработанного до санкционного режима, возникает проблема их технологической стыковки с новыми отечественными IT-продуктами.

Заключение

В настоящий момент российский бизнес-сектор сталкивается с рядом барьеров, которые замедляют полноценный переход на цифровые технологии компаний малого, среднего и крупного бизнеса [20]:

– высокие издержки на разработку и внедрение (проблема отмечена у 65 % представителей малых компаний);

– нехватка методических рекомендаций по внедрению, сложность получения консультаций в случае необходимости (отмечают 50 % средних компаний);

– возможность и эффективность использования существующих IT-решений (отмечают 30 % крупных компаний).

Более половины отечественных компаний (55 %) могли бы перейти на российские IT-решения при уменьшении их стоимости, расширении функционала, адекватной консультационной поддержке в процессе перехода. В то же время 20 % компаний крупного бизнеса считают удобным и эффективным продолжение эксплуатации приобретенных ранее зарубежных IT-решений [20]. По оценкам экспертов, устойчивая IT-экосистема может быть построена в России к 2025 году, если критически важная инфраструктура будет переведена на российские IT-продукты. Адаптация к рыночным изменениям и развитие схем IT-сотрудничества создадут условия для ускоренного развития цифровых продуктов. Это позволит на горизонте до 2030 года не только закрыть внутренний спрос на IT-решения, но и увеличить долю российского IT-бизнеса на международных рынках. Важнейшим фактором развития IT-сектора должен стать переход от импортозамещения к созданию инновационных цифровых продуктов. Это возможно при развитии системы господдержки и расширении инвестиционных партнерств. Прорывные решения в IT-индустрии станут залогом обеспечения независимости, конкурентоспособности и инновационности российской экономики в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Лапидус Л. В*. Системные эффекты от имплементации DATA STRATEGY в стратегию цифровой трансформации на транспорте // Экономика железных дорог. 2022. № 8. С. 17–29. EDN: BZKAOS

Lapidus L.V. Systemic effects from implementation of DATA STRATEGY in digital transformation strategy in transport. *Ekonomika zheleznyh dorog* [Railway Economics]. 2022. No. 8. Pp. 17–29. EDN: BZKAOS. (In Russian)

2. *Лапидус Л. В.* Роль технологических инноваций в развитии бизнеса и цифровой трансформации в странах Евразийского экономического союза // Государственное управление. 2022. № 95. С. 223–229. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-223-239

Lapidus L.V. Role of technological innovations in business development and digital transformation in countries of Eurasian Economic Union. *E-Journal Public Administration*. 2022. No. 95. Pp. 223–229. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-223-239. (In Russian)

3. Bharadwaj A., El Sawy O., Pavlou P., Venkatraman N. Digital business strategy: toward a next generation of insights. *MIS Quart*. 2013. Vol. 37. No. 2. Pp. 471–482. DOI: 10.25300/MISQ/2013/37:2.3

4. Fitzgerald M. Audi puts its future into high (tech) gear. *MIT Sloan Manage. Rev*. 2014.

5. Piccinini E., Hanelt A., Gregory R. & Kolbe L. Transforming industrial business: the impact of digital transformation on automotive organizations. In: *International Conference of Information Systems, Forth Worth, TX*. 2015.

6. Westerman G., Calméjane C., Bonnet D. et al. A. Digital transformation: a roadmap for billion-dollar organizations. In: *MIT Center for Digital Business and Capgemini Consulting*. 2011. Pp. 1–68.

7. Anderson J., Lanzolla G. The Digital revolution is over: long live the digital revolution! *Business Strategy Review*. 2010. Vol. 21. No. 1. Pp. 74–77. DOI: 10.1111/j.1467-8616.2010.00650.x

8. Clohessy T., Acton T., Morgan L. The impact of cloud-based digital transformation on ICT service providers' strategies. In: *Bled eConference*. Bled, Slovenia. 2017. DOI: 10.18690/978-961-286-043-1.9

9. Berman S.J. Digital transformation: opportunities to create new business models. *Strategy&Leadership.* 2012. Vol. 40. No. 2. Pp. 16–24. DOI: 10.1108/10878571211209314

10. Korchagina E.V., Shvetsova O.A. Solving the problem of employment for graduates of higher education institutions: increasing the degree of employers' participation in the educational process. *Proceedings of 2018 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region*, PTES 2018, St. Petersburg, 14–15 November 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Pp. 138–140. DOI: 10.1109/PTES.2018.8604228

11. *Корчагина Е. В., Десфонтейнес Л. Г.* Принципы формирования организационной культуры предприятия // Противоречия и тенденции развития современного российского общества: сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции, Сергиев Посад, 22 апреля 2019 года. Сергиев Посад: Московский университет им. С. Ю. Витте, 2019. С. 160–164.

Korchagina E.V., Desfontaines L.G. Principles of formation of the organizational culture of an enterprise. *Contradictions and Trends in the Development of Modern Russian Society*: collection of scientific articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Sergiev Posad, April 22, 2019. Sergiev Posad: Moscow University named after S.Yu. Witte, 2019. Pp. 160–164. (In Russian)

12. Big data analytics market [Electronic resource]. Fortune Business Insights. Mode: https://www.fortunebusinessinsights.com/big-data-analytics-market-106179 (accessed: 20.03.2025).

13. Strategy [Electronic resource]. Association of Big Data. Mode: https://rubda.ru/deyatelnost/strategiya/ (accessed 20.03.2025).

14. Worldwide spending on digital transformation is forecast to reach almost $4 trillion by 2027, according to new IDC spending guide [Electronic Resource]. IDC. Mode: https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS52305724 (accessed: 20.03.2025).

15. Цифровая экономика: тренды и перспективы трансформации бизнеса. Материалы VIII Межфакультетской научно-практической конференции молодых ученых: Москва, МГУ имени М. В. Ломоносова, экономический факультет; 22 декабря 2021 г. Доклады и выступления / Под научн. ред. д. э. н., проф. Л. В. Лапидус. М.: Экономический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2024.

Digital economy: trends and prospects for business transformation. Proceedings of the VIII Interfaculty scientific and practical conference of young scientists: Moscow, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics; December 22, 2021. Reports and Speeches / Ed. by D.Sc. (Econ.), Prof. L.V. Lapidus. Moscow: Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University, 2024. (In Russian)

16. Gartner 2024 Hype cycle for emerging technologies highlights developer productivity, total experience, AI and security [Electornic resource]. Gartner. Mode: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/ (accessed: 23.03.2025).

17. Polozhikhina M.A. Regulation of the process of digitalization of the economy: European and Russian experience. *Russia and the Contemporary World*. 2019. No. 4. Pp. 64–81.

18. Huawei Technologies CO., LTD. Global Digitalization Index 2024. 2024. URL: https://www.samenacouncil.org/initiatives/industryissues/gdi-2024-en.pdf

19. Chakravorti B., Chaturvedi R.S., Filipovic C., Brewer G. Digital in the time of COVID. *The Fletcher School at Tufts University.* 2020. URL: https://digitalplanet.tufts.edu/wp-content/uploads/2022/09/digital-intelligence-index.pdf

20. MTS Web Services (MWS). Perspectives of IT-Market 2024. 2023. URL: https://ru-msk2.store.cloud.mts.ru/uploads/Perspectives_of_IT_market_2024_low_version_a3612487f9.pdf?_ma=1744742455436108487.1744742911334

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Перфильев И. В. – подбор методического инструментария, практическая апробация и описание;
Балашова Е. С. – научное руководство исследованием, постановка целей и задач исследования;

Contribution of the authors:

Perfiliev I.V. – scientific supervision of the study, setting the goals and objectives of the study;
Balashova E.S. – selection of methodological tools, practical testing and description.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Перфильев Илья Владимирович, аспирант кафедры инновационной экономики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;
190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская улица, 3;
Ilya198702@yandex.ru, SPIN-код: 9918-3747
Балашова Елена Сергеевна, д-р экон. наук, доцент, заведующий кафедрой инновационной экономики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;
190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская улица, 3;
Ilya198702@yandex.ru, SPIN-код: 8781-5247

Information about the authors

Ilya V. Perfiliev, Postgraduate Student, Department of Innovational Economics, State Marine Technical University;
3, Lotsmanskaya street, Saint Petersburg, 190121, Russia;
Ilya198702@yandex.ru, SPIN-code: 9918-3747
Elena S. Balashova, Doctor of Economic Sciences, Assistant Professor, Head of the Department of Innovational Economics, State Marine Technical University;
3, Lotsmanskaya street, Saint Petersburg, 190121, Russia;
Ilya198702@yandex.ru, SPIN-code: 8781-5247

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 331.556; 316.65; 314.8 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-237-251
KJQSXZ

Анализ социально-экономической мобильности населения Кабардино-Балкарии и возможные ее последствия

И. А. Табаксоев✉, Ф. Ж. Берова

Центр социально-политических исследований
Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18

Аннотация. Миграция оказывает серьезное влияние на социально-экономическое, демографическое и социально-психологическое состояние устойчивого развития государства. Исследования, посвященные оценке миграционной ситуации и общественного мнения как на федеральном, так и на региональном уровне, являются важнейшим инструментом мониторинга и анализа протекающих миграционных и демографических процессов. Особое значение это приобретает с точки зрения нивелирования негативных трендов депопуляции, так как миграция серьезных образом влияет на социальную структуру, экономику и культуру населения.

Цель исследования. Выявить степень влияния социально-экономических факторов на мобильность населения Кабардино-Балкарии – миграционные тренды населения.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели был использован социологический опрос. Методологическую основу анализа научной работы составил и факторно-динамический метод социальных изменений, а также основные подходы социологии (качественные и количественные). Исследование проводилось с применением принципов триангуляции для сравнительного анализа, объективности и фактологической точности аналитического подхода.

Результаты. В статье проведен анализ миграционных процессов и факторов, влияющих на мобильность населения в современной Кабардино-Балкарии.

Выводы. Исходя из проведенного анализа авторы пришли к заключению, что экономический фактор является главной причиной миграционных процессов. Сделан вывод, что трудовая миграция сопровождается трудностями трудоустройства на рынке труда.

Ключевые слова: миграция, миграционные процессы, демографические процессы, Российская Федерация, СКФО, Кабардино-Балкарская Республика, естественное движение населения, мобильность, общественное мнение

Поступила 31.12.2025, одобрена после рецензирования 06.02.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Табаксоев И. А., Берова Ф. Ж. Анализ социально-экономической мобильности населения Кабардино-Балкарии и возможные ее последствия // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 237–251. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-237-251

© Табаксоев И. А., Берова Ф. Ж., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Original article

Analysis for population socio-economic mobility in Kabardino-Balkaria and its possible consequences

I.A. Tabaksoev✉, F.Zh. Berova

Center for Socio-Political Research
Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
18, Pushkin street, Nalchik, 360000, Russia

Abstract. Migration has a significant impact on the socioeconomic, demographic, and sociopsychological state of a country's sustainable development. Research assessing the migration situation and public opinion, at both the federal and regional levels, is a crucial tool for monitoring and analyzing ongoing migration and demographic processes. This is particularly important for mitigating negative depopulation trends, as migration significantly impacts the social structure, economy, and culture of the population.

Aim. The study is to identify the influence of socioeconomic factors on population mobility in Kabardino-Balkaria: population migration trends.

Research methods. To achieve this goal, a sociological survey was used. The analysis of the research is based on the factor-dynamic method of social change and key sociological approaches, both qualitative and quantitative. The study uses the principles of triangulation to ensure the comparative analysis is objective and factually accurate.

Results. This article analyzes migration processes and factors influencing population mobility in modern Kabardino-Balkaria.

Conclusions. Based on the analysis, it is concluded that economic factors are the main driver of migration processes. It is also concluded that labor migration is accompanied by difficulties in finding employment in the labor market.

***Keywords**:* migration, migration processes, demographic processes, Russian Federation, North Caucasus Federal District, Kabardino-Balkarian Republic, natural population movement, mobility, public opinion

Submitted 31.12.2025, approved after reviewing 06.02.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Tabaksoev I.A., Berova F.Zh. Analysis for population socio-economic mobility in Kabardino-Balkaria and its possible consequences. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 237–251. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-237-251

Введение

Миграционная проблематика на сегодняшний день – одна из самых болезненных и актуальных в мире. Процесс миграции оказывает не только экономическое, но и многоплановое социальное, демографическое и социально-психологическое влияние как на страны-доноры (регионы-доноры), так и на принимающие страны-реципиенты (регионы-реципиенты). Хотя можно сказать, что нет человека, который не знаком с миграцией, тем не менее политики признают сложность управления ею, а ученые, как отечественные, так и западные, отмечают, что не существует единства в понимании ее сущности, так же, как нет единого подхода к ее изучению.

Одним из первых серьезных теоретических обоснований перемещений рабочей силы следует признать *неоклассическую теорию миграции*. Основой этой концепции, ставящей во главу угла международное различие в уровнях оплаты труда, можно считать работу

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Дж. Хикса «Теория заработной платы». В отличие от неклассических теорий приверженцы исторических и структуралистских концепций объясняют миграцию экономическим и политическим неравенством различных субъектов (стран, регионов, предприятий, индивидов), когда более сильные субъекты определяют направленность миграционных потоков в выгодном им направлении. Эти же теории признают важность таких факторов, как этнические и семейные связи среди мигрантов, роль государственного регулирования в данной области[1]. Иными словами, разнообразие теорий, интерпретаций и подходов западных и отечественных школ в реальности дополняют и объясняют друг друга.

Проблема межрегиональной и международной трудовой миграции граждан Кабардино-Балкарской Республики является крайне актуальной на сегодняшний день. Межрегиональная и международная трудовая миграция сопровождается потерей трудовых ресурсов для республики[2], что влечет за собой риски безопасности, как экономические, так и демографические [1].

Важность миграционного индикатора демографической безопасности заключается в том, что он показывает скорость изменения воспроизводства населения, сдвиги в возрастной структуре населения и выступает предвестником наступления депопуляции. Как известно, существующие индикаторы демографической безопасности лишь констатируют сложившуюся на данный момент ситуацию [2].

Между тем геополитическая и экономическая позиция западных государств побуждает власть РФ ускорить процесс инновационного развития экономики, где трудовой потенциал является одним из главных составных частей [3, 4]. Таким образом, квалифицированные трудовые ресурсы и трудовая миграция играют ключевую роль в трансформации современной России. Северо-Кавказский регион демонстрирует наиболее высокие показатели динамики миграционных процессов и может участвовать в развитии экономики не только СКФО, но и всей страны.

Цель данного исследования состоит в том, чтобы проанализировать и выявить степень влияния социально-экономических факторов на мобильность населения Кабардино-Балкарии – миграционные тренды населения.

Материалы и методы

Материалом для анализа стала совокупность статистико-демографических и социологических публикаций. Методологическую основу анализа научной работы составили факторно-динамический метод социальных изменений, а также отдельные подходы социологии. Исследование проводилось с применением принципов системности, объективности и фактологической точности аналитического подхода.

Эмпирическую базу научной работы составили опубликованные результаты демографической ситуации на федеральном и региональном уровне и вторичные социологические материалы, а также анализ официальных сайтов министерств и федеральных служб государственной статистики.

Основным источником при подготовке настоящей статьи послужили результаты социологического исследования (анкетный и экспертный опросы), проведенного в мае-июле 2025 г. СДИ ЦСПИ КБНЦ РАН среди населения Кабардино-Балкарии. Социологическое

[1]Лаврова А. В. Миграция рабочей силы [Электронный ресурс]. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/migratsiya-rabochey-sily

[2]Берова Ф. Ж., Бакаева З. Р., Думанова А. Х., Яхутлова М. Л. Региональные особенности миграционных процессов и национальная безопасность (на материалах Кабардино-Балкарской Республики) [Электронный ресурс]. URL: http://law-journal.ru/files/pdf/201408/201408_98.pdf

исследование было проведено с целью выявления мнений респондентов и экспертов об основных тенденциях трудовой миграции в Кабардино-Балкарии в современный период. В задачи блока вопросов анкетного опроса по основным тенденциям трудовой миграции входят: оценка миграционной активности населения КБР, выявление основных факторов по возвращению квалифицированных специалистов в республику для участия в программе «стратегического развития». В анкетном опросе приняли участие 198 респондентов – жителей КБР. Использовались методы квотной и случайной выборки. При формировании доли квотной выборки учтено адекватное процентное соотношение респондентов кабардинской, балкарской и русской национальностей.

Факторы. Период перестройки и развал СССР привели к системному кризису по всей стране и наиболее сильно ударили по республикам Северного Кавказа. Это привело как к деградации социально-экономической сферы, так и к общему падению уровня доходов и качества жизни населения региона. Массовая трудовая миграция в сопредельные регионы зачастую сопровождается увеличением степени межэтнической напряженности в регионах-реципиентах и переводит социально-экономическую проблему в межнациональную плоскость [1].

Тенденции. На современном этапе можно выделить целый комплекс миграционных потоков и направлений: внутреннюю миграцию в рамках СКФО, наблюдающееся за последнее десятилетие увеличение уровня межрегиональной миграции, а также выезд населения Северо-Кавказского региона за рубеж.

Центром притяжения трудовой миграции из Кабардино-Балкарии с 2000-х годов являлись Ставропольский и Краснодарский края. Современный вектор миграционных потоков ориентирован на Москву и Московскую область в силу столичного статуса, инвестиционной привлекательности и высокого уровня социального и экономического развития. Этот вектор перемещения населения называют «центростремительными» миграционными потоками, или «западный дрейф» [5].

Среди миграционного потока КБР на первый план выдвигается трудовая миграция молодежи. Большинство трудовых мигрантов – это молодые, образованные, высококвалифицированные специалисты в трудоспособном возрасте, не удовлетворенные оплатой труда и стандартами жизни. Это обусловлено высокой конкуренцией на высокооплачиваемую работу на рынке труда в самой республике. В результате Кабардино-Балкария теряет определенную часть как демографического, так и интеллектуального потенциала. Молодежь, естественно, ищет лучшие условия для самореализации и экономической роста.

Результаты социологического опроса

Опрошенные респонденты, отвечая на вопрос «Мотивы Вашего переезда из Кабардино-Балкарской Республики?», выбрали следующие варианты: 49 % респондентов указали «возможность получения любых социальных благ», 29 % респондентов – «возможность реализовать свой потенциал», 12% респондентов – «возможность реализации предпринимательского потенциала». Лишь среди респондентов возрастной категории 21–29 лет большинство указали, что для них наибольшей мотивацией для переезда из КБР является «возможность реализовать свой потенциал» (73 %). На втором месте у данной группы «возможность получения любых социальных благ» (23,3 %) и на третьем месте – «возможность реализации предпринимательского потенциала» (3,7 %). В целом для подавляющего большинства респондентов наибольшей мотивацией для переезда в другой регион из КБР является возможность получения любых социальных благ, в которые входят и экономические. На втором месте – возможность реализовать свой потенциал (рис. 1).

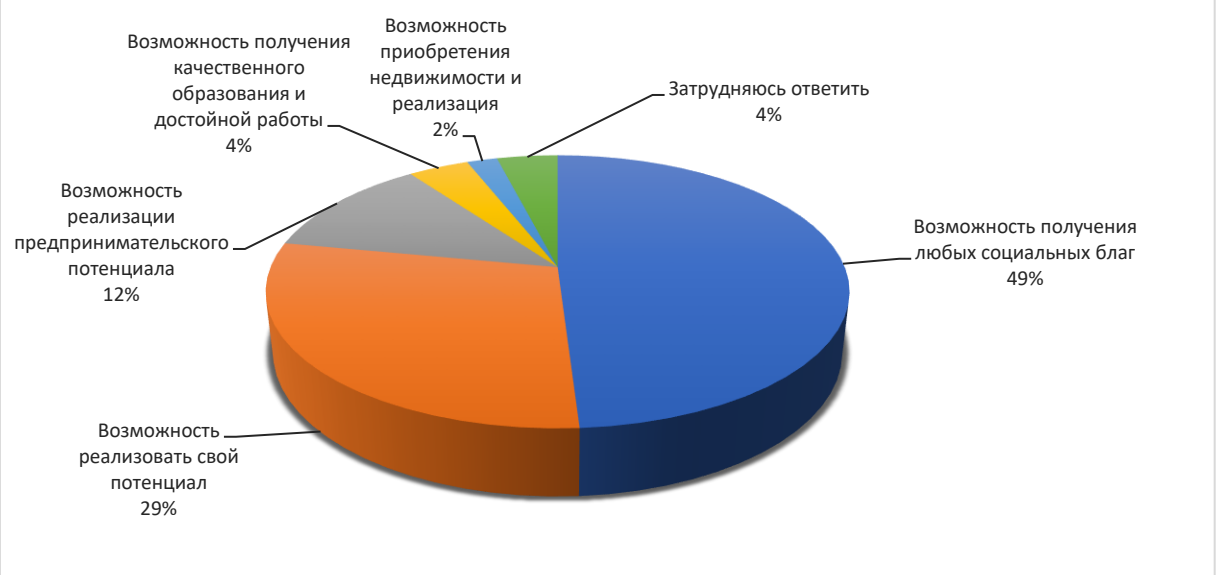


***Рис. 1**. Диаграмма распределения ответов на вопрос «Мотивы Вашего переезда из Кабардино-Балкарской Республики?»*

***Fig. 1**. Distribution diagram of responses to the question "What are your reasons for leaving the Kabardino-Balkarian Republic?"*

На вопрос «Скажите, пожалуйста, в какой регион страны Вы переехали из Кабардино-Балкарской Республики?» большинство респондентов по всем возрастным и профессиональным категориям выбрали следующие варианты ответов: 40 % респондентов – «Москва», 28 % респондентов – «Московская область», 12 % респондентов – «Санкт-Петербург», 8 % респондентов – «Ставропольский край», 3 % респондентов – «Краснодарский край», 9 % респондентов – «другие регионы» (рис. 2).

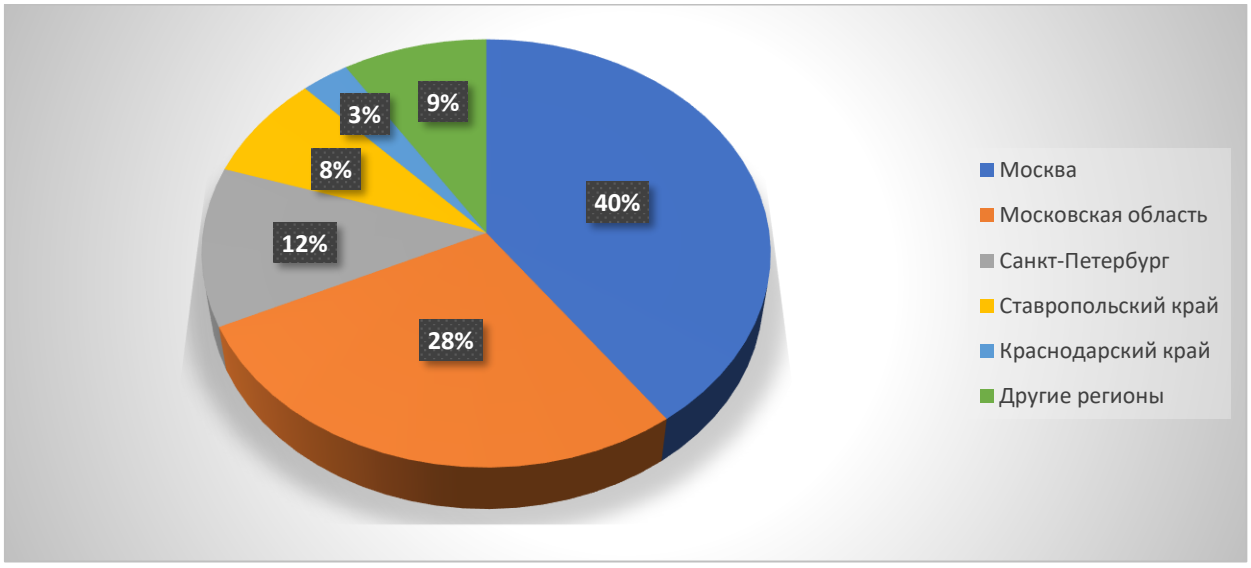


***Рис. 2.** Диаграмма распределения ответов на вопрос «Скажите, пожалуйста, в какой регион страны Вы переехали из Кабардино-Балкарской Республики?»*

***Fig. 2**. Distribution diagram of responses to the question "Please tell me which part of the country you relocated to after leaving the Kabardino-Balkarian Republic?"*

Подавляющее большинство респондентов переехали из Кабардино-Балкарии в Москву и Московскую область, где сконцентрированы основные финансовые и социальные блага России. Результаты, полученные в рамках социологического исследования, показывают, что вектор миграционных потоков не сильно изменился в сравнении с предыдущими исследованиями. Развитые социально-экономические условия жизни в Москве привлекают все миграционные и мобильные ресурсы страны.

Результаты проведенного социологического исследования подтверждаются данными Росстата, в которых отмечается, что в течение многих лет центром притяжения населения Кабардино-Балкарской Республики являются Москва и Московская область, куда в 2021 году выехало 2264 человека, Ставропольский край – 976 человек, Санкт-Петербург и Ленинградская область – 753 человека, Краснодарский край – 626 человек, Ростовская область – 373 человека[3].

Для нас особый интерес в социологическом исследовании представляли мотивы вернувшихся в КБР из других регионов страны. Отвечая на вопрос «Мотивы Вашего переезда в Кабардино-Балкарскую Республику?», большинство опрошенных респондентов по всем возрастным и профессиональным категориям выбрали следующие варианты: 42 % респондентов указали на «возможность реализовать свой потенциал», 32 % респондентов – «возможность реализации предпринимательского потенциала», 19 % респондентов – «семейные обстоятельства», 7 % респондентов выбрали «другие причины». Среди респондентов возрастной категории 21–29 лет 64 % указали, что вернулись в республику по окончании обучения и для реализации своего потенциала на родине. На втором месте у данной группы – «семейные обстоятельства» (16 %), на третьем месте – «возможность реализации предпринимательского потенциала» (12 %) и 8 % затруднились ответить. В целом большинство респондентов, вернувшихся в Кабардино-Балкарию, указали на возможность реализовать свой потенциал (рис. 3).

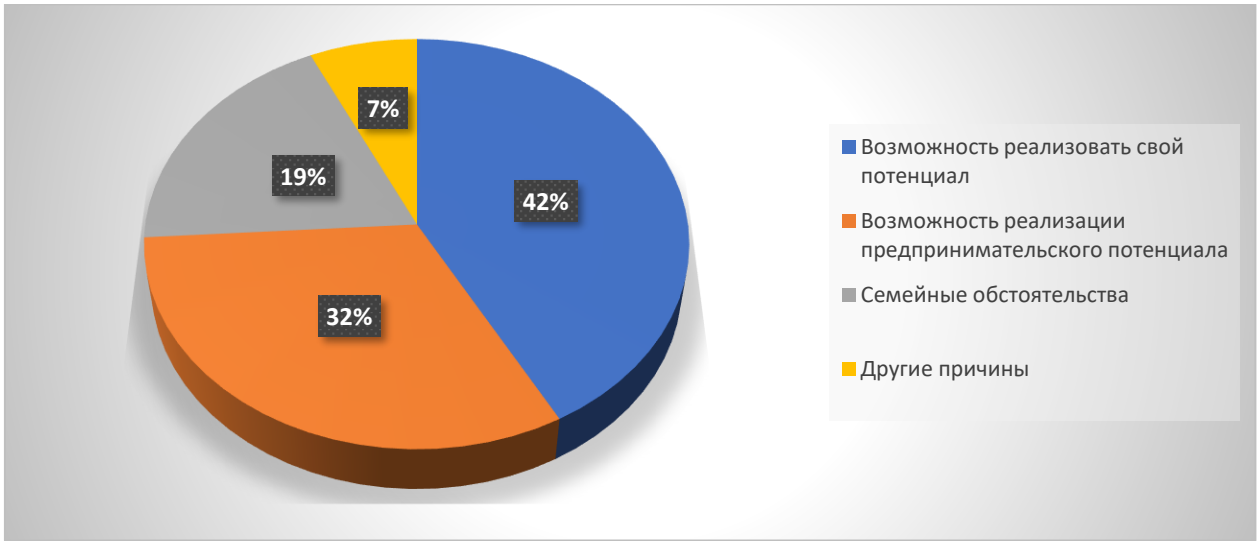


***Рис. 3**. Диаграмма распределения ответов на вопрос «Мотивы Вашего переезда в Кабардино-Балкарскую Республику?»*

***Fig. 3**. Distribution diagram of responses to the question "What are your reasons for moving to the Kabardino-Balkarian Republic?"*

[3]Ставропольский край в цифрах. Краткий статистический сборник. 2024 / Управление Федеральной службы государственной статистики по СКФО. URL: https://26.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/офиц.

Ответы на вопрос «От кого в первую очередь Вы получили помощь, поддержку после переезда в Кабардино-Балкарскую Республику?» распределились следующим образом: 37 % респондентов указали «от родителей», 31 % респондентов – «от других родственников», 24 % респондентов – «от друзей», 6 % респондентов – «помощи не было ни от кого», 4 % респондентов – «государственное субсидирование или кредит», 2 % респондентов – «свой вариант».

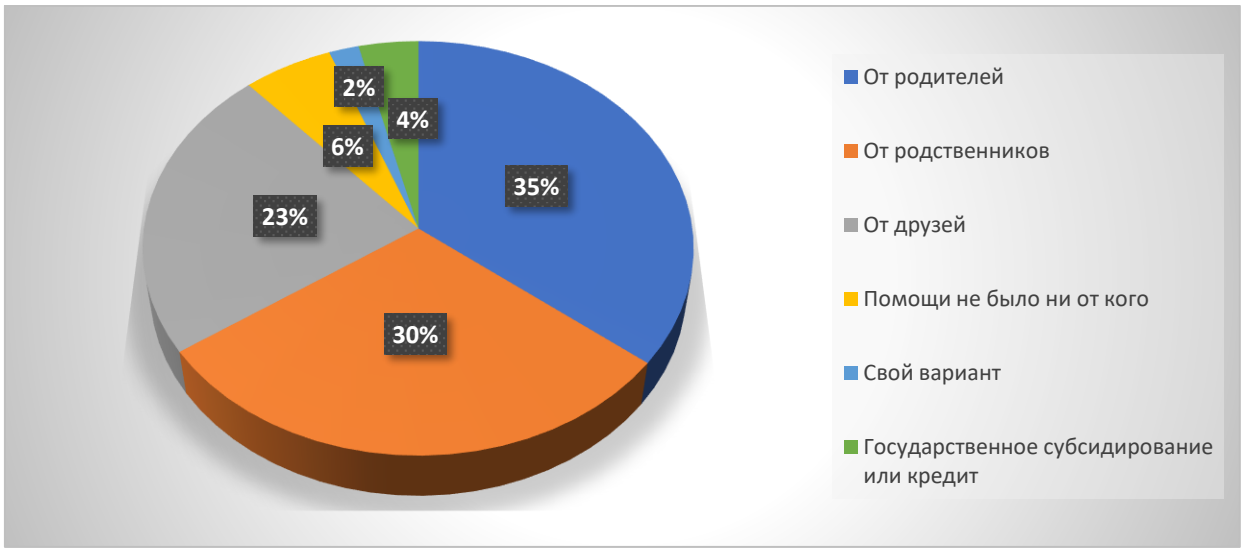


***Рис. 4**. Диаграмма распределения ответов на вопрос «От кого в первую очередь Вы получили помощь, поддержку после переезда в Кабардино-Балкарскую Республику?»*

***Fig. 4**. Distribution diagram of responses to the question "From whom did you first seek help and support after relocating to the Kabardino-Balkarian Republic??"*

Результаты ответов на данный вопрос показывают, что преобладающее большинство респондентов были поддержаны как финансово, так социально близким окружением (родители, родственники и друзья). Но необходимо также обратить внимание на тот факт, что процент респондентов, воспользовавшихся государственной поддержкой или кредитными услугами частных инвестиционных компаний и банков, очень низкий. Это свидетельствует о том, что предоставляемые услуги или недоступны для многих, или же развитие невозможно на их условиях. Считаем, данный факт необходимо изучить для дальнейшего анализа проектирования развития республики (рис. 4).

На вопрос «Чем лично Вам пришлось пожертвовать при переезде в Кабардино-Балкарию?» ответы респондентов распределились следующим образом: 59 % – «доходами», 26 % – «самореализацией и развитием в профессиональной сфере», 15 % – «медицинским и социальным обслуживанием». Таким образом, большинство респондентов, вернувшихся в Кабардино-Балкарию, отмечают, что они потеряли в большей степени доходную часть (рис. 5).

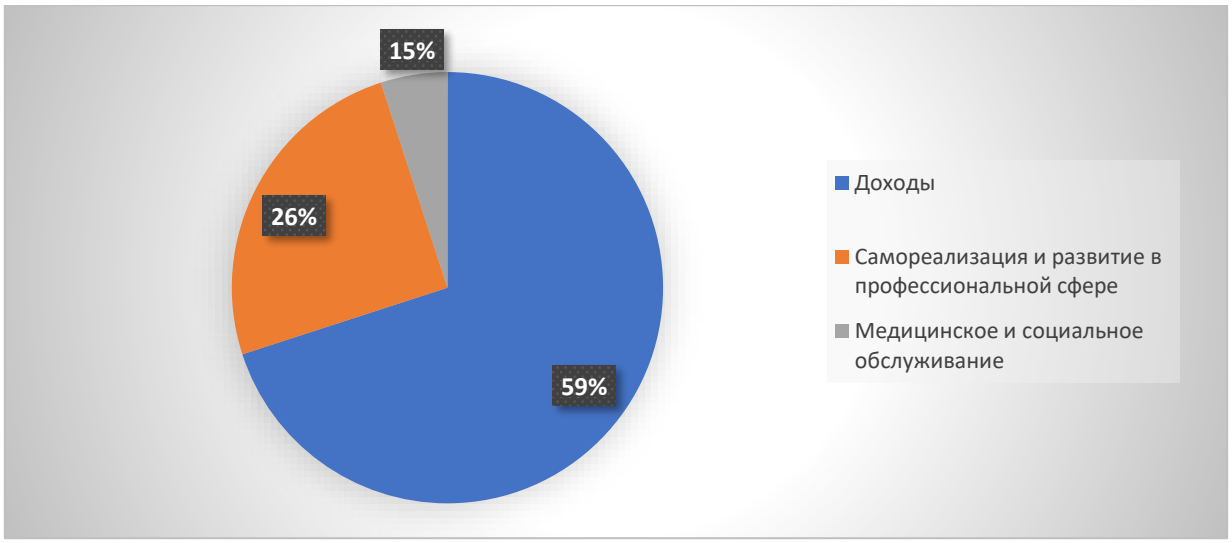


***Рис. 5**. Диаграмма распределения ответов на вопрос «Чем лично Вам пришлось пожертвовать при переезде в Кабардино-Балкарию?»*

***Fig. 5**. Distribution diagram of responses to the question "What did you personally have to give up when moving to Kabardino-Balkaria?"*

На вопрос «Как на Ваш взгляд, по какой причине люди уезжают из Кабардино-Балкарской Республики, в том числе за границу?» большинство респондентов по всем возрастным и профессиональным категориям выбрали следующие варианты ответов: 68 % респондентов – «в республике жизнь тяжелая, едут в поисках лучшей жизни, в том числе за границу», 21 % – «в поисках достойной работы (на заработки)», 7 % – «в республике и в России жить опасно, тревожно, едут туда, где порядок, законность, стабильность, забота о людях», 3 % – «скрываются от правосудия, т.е. те, кому необходимо легализовать незаконно нажитые капиталы», 1 % респондентов – «скрываются от правосудия, за тяжкие преступления» (рис. 6).

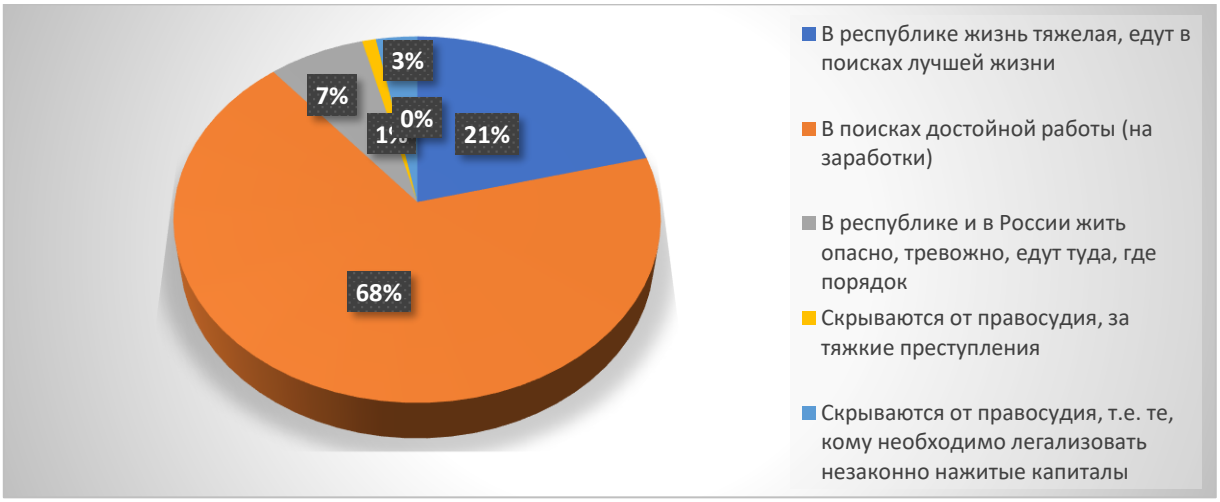


***Рис. 6**. Диаграмма распределения ответов на вопрос «Как на Ваш взгляд, по какой причине люди уезжают из Кабардино-Балкарской Республики, в том числе за границу?»*

***Fig. 6**. Distribution diagram of responses to the question "In your opinion, what are the reasons why people leave the Kabardino-Balkarian Republic, both within and outside of the country??"*

Если объединить два преобладающих ответа, то подавляющее большинство респондентов считают, что люди уезжают в поисках лучшей жизни и достойных доходов.

На вопрос «Вы хотели бы уехать из республики навсегда – на постоянное место жительства» ответы опрошенных распределились следующим образом: 30 % респондентов – «хотел(а) бы», 52 % респондентов – «не хотел(а) бы», 18 % респондентов затруднились ответить.

Результаты опроса по данному вопросу показывают, что большинство респондентов при всех сложностях социально-экономической ситуации в Кабардино-Балкарии все же не хотят переезжать из республики в другие регионы России на постоянное место жительства. Исключение есть среди опрошенных возрастной категории 21–29 лет: большинство (74 %) указали, что готовы на переезд ради достойной работы и профессионального роста (рис. 7).

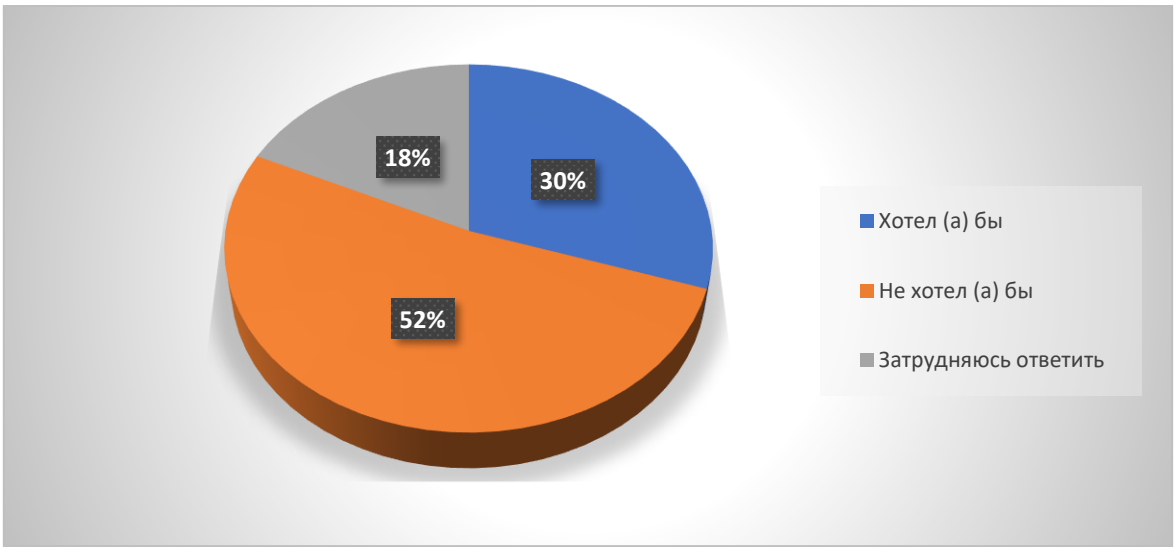


Рис. *7. Диаграмма распределения ответов на вопрос «Вы хотели бы уехать из республики навсегда – на постоянное место жительства?»*

Fig. *7. Distribution diagram of responses to the question "Would you like to permanently leave the republic for residence elsewhere?"*

На вопрос «Вы лично хотели бы уехать за границу навсегда – на постоянное место жительства?» ответы опрошенных распределились следующим образом: 22 % респондентов – «хотел(а) бы», 69 % респондентов – «не хотел(а) бы», 9 % респондентов – «затрудняюсь ответить». Результаты опроса свидетельствуют о том, что большинство респондентов при всех сложностях социально-экономической ситуации в России все же не хотят переезжать из страны на постоянное место жительства (рис. 8).

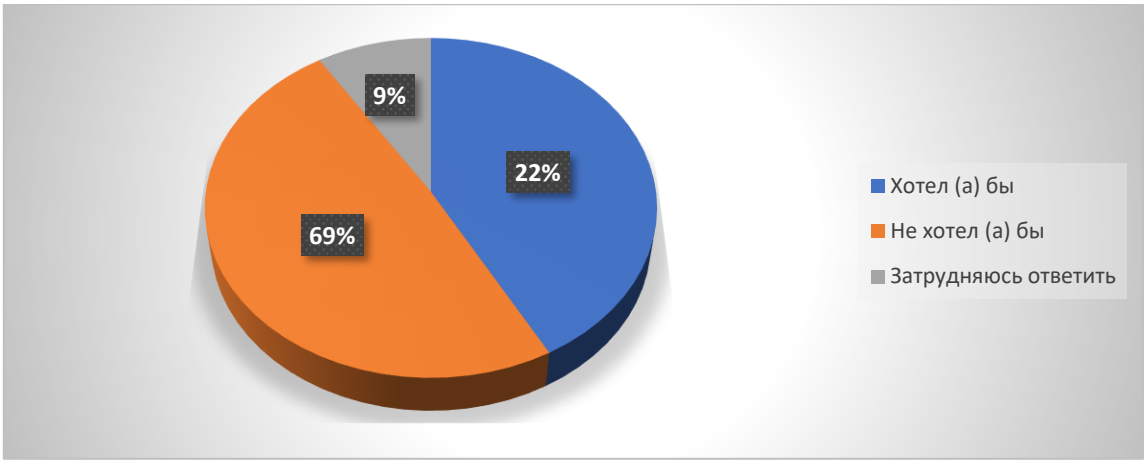


***Рис. 8**. Диаграмма распределения ответов на вопрос «Вы лично хотели бы уехать за границу навсегда – на постоянное место жительства?»*

***Fig. 8**. Distribution diagram of responses to the question "Would you personally like to move abroad forever – for permanent residence?"*

На вопрос «Как Вам кажется, в ближайшие годы число людей, уезжающих за границу навсегда – то есть на постоянное место жительства, будет увеличиваться или сокращаться?» преобладающее большинство опрошенных по всем возрастным и профессиональным категориям выбрали следующие варианты ответов: 14 % респондентов – «будет увеличиваться», 5 % респондентов – «будет сокращаться», 81 % респондентов – «затрудняюсь ответить» (рис. 9). Данные опроса показали по данному вопросу, что респонденты затрудняются ответить на него в силу протекающих политических событий как в стране, так и в мире.

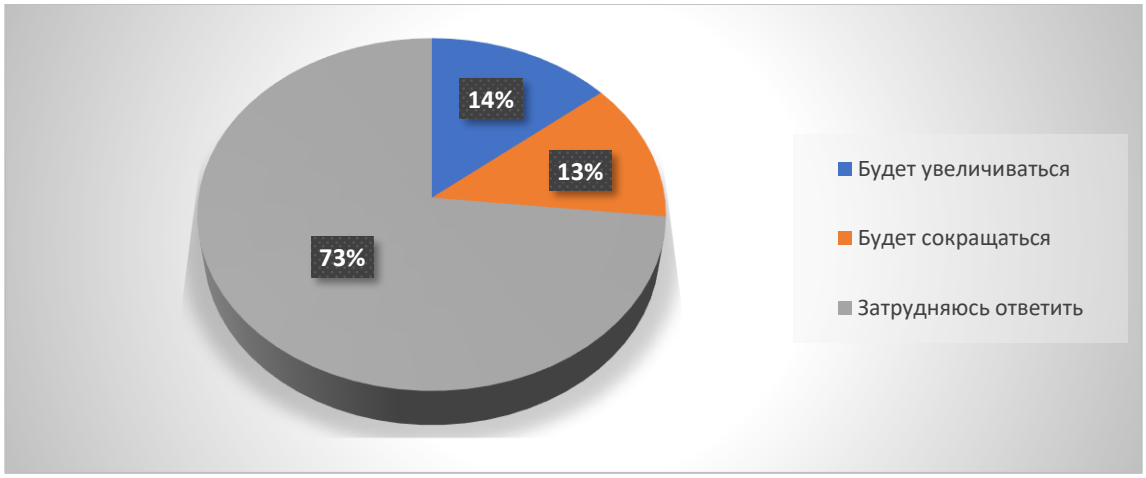


***Рис. 9**. Диаграмма распределения ответов на вопрос «Как Вам кажется, в ближайшие годы число людей, уезжающих за границу навсегда – то есть на постоянное место жительства, будет увеличиваться или сокращаться?»*

***Fig. 9**. Distribution chart of responses to the question: "Do you think the number of people moving abroad permanently – that is, for permanent residence – will increase or decrease in the coming years?"*

На вопрос «На Ваш взгляд, какие люди в наши дни уезжают за границу навсегда?» ответы опрошенных распределились следующим образом: 56 % респондентов указали «богатые, т.е. у кого есть деньги», 35 % респондентов – «умные, образованные, талантливые люди, интеллигенция», 24 % респондентов – «молодежь (целеустремленная молодежь моложе 30 лет)»

и по 1 % респондентов – «спортсмены, тренеры» и «затрудняюсь ответить» (рис. 10). Результаты ответов показывают, что уезжают в большей степени те, у кого есть деньги и кто может обеспечить себе существование за границей.

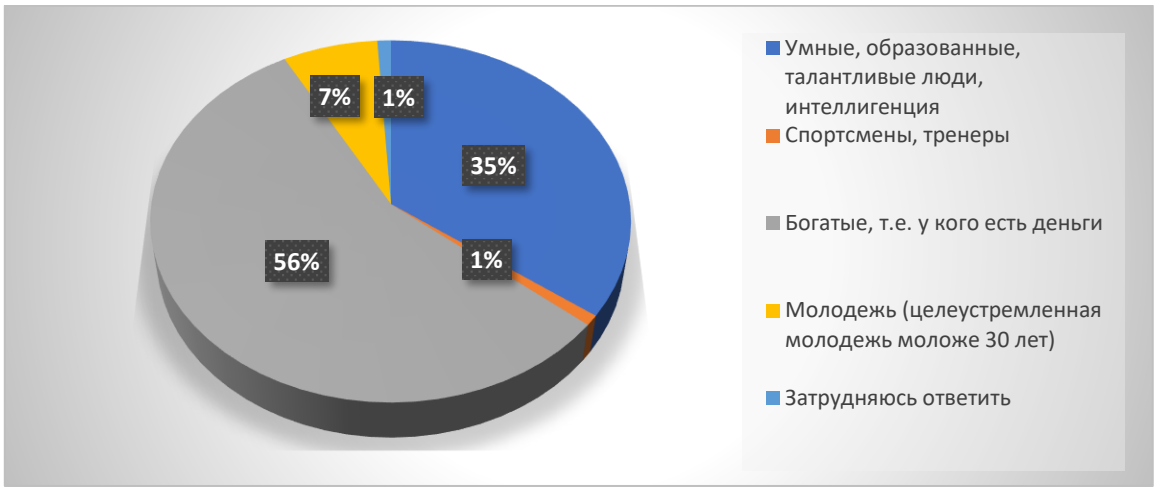


Рис. 10. *Диаграмма распределения ответов на вопрос «На Ваш взгляд, какие люди в наши дни уезжают за границу навсегда?»*

Fig. 10*. Distribution diagram of responses to the question "In your opinion, what kind of people are leaving abroad forever these days?"*

На вопрос «На Ваш взгляд, какие условия необходимо создать для привлечения бизнеса в КБР?» ответы опрошенных распределились следующим образом: 65 % респондентов – «гарантия сохранения за бенефициарами бизнеса без отчуждения», 11 % респондентов – «льготы на аренду», 5 % респондентов – «развитая логистика», 19 % респондентов – «льготная налоговая политика» (рис. 11). Таким образом, преобладающая часть респондентов указала, что им нужны гарантии сохранения за бенефициарами бизнеса без отчуждения.

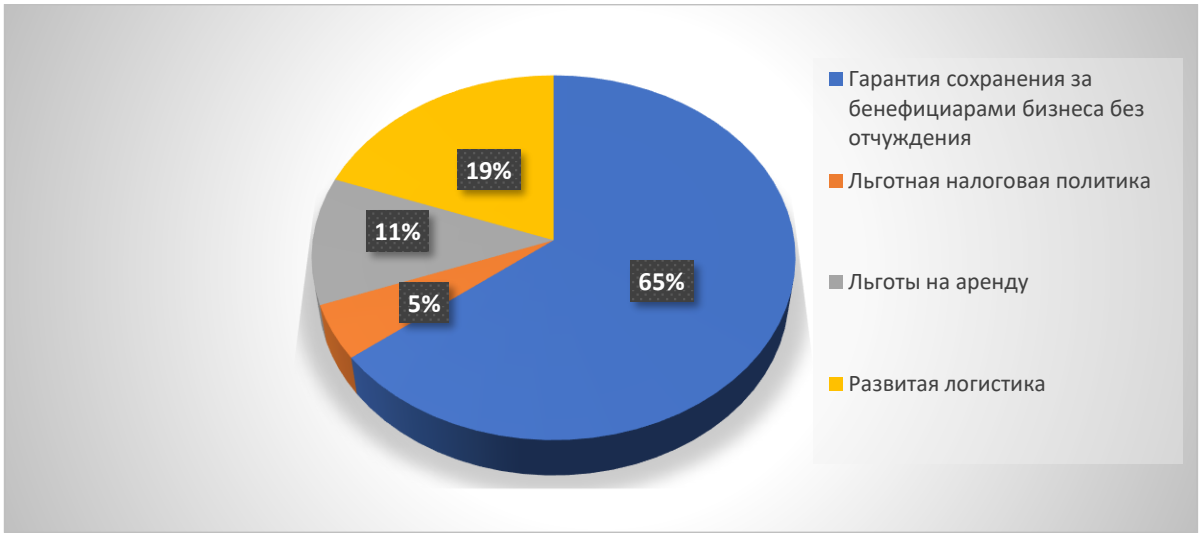


Рис. 11*. Диаграмма распределения ответов на вопрос «На Ваш взгляд, какие условия необходимо создать для привлечения бизнеса в КБР?»*

Fig. 11*. Distribution diagram of responses to the question "In your opinion, what conditions would need to be in place in order to attract businesses to the KBR?"*

Также необходимо обратить внимание на данные Северо-Кавказстата, в которых указываются основные демографические и миграционные данные за последние годы. По оценке Северо-Кавказстата, численность постоянного населения Кабардино-Балкарской Республики на 1 января 2022 г. составляла 870,5 тыс. чел., а в 2025 г. – уже 908 214 чел. Увеличение произошло как за счет естественного прироста населения, так и за счет миграционного прироста[4].

По данным Управления по вопросам миграции МВД по КБР, в 2021 г. на постоянное место жительства в КБР (без учета внутренней миграции, которая составила 2602 человека) прибыло 7722 человека (2020 г. – 8691 человек), выехало за ее пределы 7472 человека (2020 г. – 9567 человек). Миграционный прирост составил 250 человек.

В документе отмечается также, что по половой структуре из числа выбывших за пределы республики 49,2 % составляют мужчины, 50,8 % – женщины.

Увеличение миграционного прироста произошло за счет мигрантов, прибывших из стран ближнего и дальнего зарубежья и получивших временную регистрацию. Большая часть из временно зарегистрированных в республике (более 82 %) получили регистрацию на срок от 9 месяцев до 2 лет. Хотя этот показатель не является индикатором прироста постоянного населения, однако его учитывают. Также в последнее время было переселено из мест проведения СВО более 800 чел.

Ежегодно из КБР в другие регионы РФ выезжает больше мигрантов, чем приезжает из них. По данным статистки, это обусловлено главным образом семейными и личными причинами – 37,8 %, поиском новой высокооплачиваемой работы – 14,9 %, в связи с учебой – 7,4 %.

Из общего числа выбывших за пределы республики 73,7 % составляет население в трудоспособном возрасте. По сравнению с 2020 годом его доля сократилась на 5 %, дети в возрасте от 0 до 15 лет составляют 16,6 %, старше трудоспособного – 9,7 %.

Большая часть выбывших из республики в возрасте 14 лет и старше имели высшее и неполное высшее образование – 1934 человека (30,4 %), среднее профессиональное (специальное) – 1427 человек (22,5 %), начальное профессиональное – 215 человек (3,4 %), среднее общее – 1032 человека (16,2 %), неполное общее – 369 человек (5,8 %), имели начальное и не имели образования 126 человек (2 %). Не указал уровень образования 1251 человек (19,7 %).

Вместе с тем в Кабардино-Балкарскую Республику в 2021 году из Москвы и Московской области приехало 1689 человек, из Ставропольского края – 842 человека, из Санкт-Петербурга и Ленинградской области – 532 человека, из Краснодарского края – 402 человека.

В 2021 г. в Кабардино-Балкарской Республике сложилось положительное сальдо миграции в обмене населением с государствами – участниками СНГ и зарубежными странами.

Число прибывших из стран ближнего и дальнего зарубежья в 2021 году составило 2252 человека. Наибольшее количество прибывших из стран СНГ составляют граждане

[4]Кабардино-Балкария в цифрах. Краткий статистический сборник. 2025 / Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу [Электронный ресурс]. URL: https://26.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/BhDnA83o/Кабардино-Балкария%20в%20цифрах%202021.pdf

Узбекистана – 227 человек, Армении – 163 человека, Азербайджана – 94 человека. Большую часть прибывших из дальнего зарубежья в 2021 году составили граждане: Индии – 380 человек, Сирии – 245 человек, Иордании – 162 человека[5].

По данным Управления по вопросам миграции МВД по Кабардино-Балкарской Республике, число лиц, получивших временное убежище на конец 2021 года, составило 10 человек. Из них гражданами Сирии являлись 7 человек, Украины – 3 человека. Численность лиц в трудоспособном возрасте, получивших временное убежище, составила 6 человек. Свободно владеют русским языком – 3 человека, на бытовом уровне – 3 человека и 4 человека русским языком не владеют[6].

В 2023 году миграционный прирост населения республики составил 934 человека, из них 335 уехали в другие регионы страны, 428 – в страны СНГ, 171 человек – в другие зарубежные страны [3].

Выводы

Подводя итоги, следует отметить, что исследование миграционных процессов в современной Кабардино-Балкарии на основании результатов социологического опроса по оценке причин трудовой миграции населения республики свидетельствует о том, что уровень социально-экономической системы является основным фактором трудовой миграции населения.

Таким образом, можно сделать вывод, что вектор миграционных притяжений не изменился в сравнении с предыдущими десятилетиями исследований. Развитые социальные и экономические условия жизни и широкие возможности в столичном регионе притягивают миграционные потоки. Можно выделить несколько трендов, которые могут стать актуальными в результате протекающих процессов:

- нерегулируемый отток молодежи и как следствие снижение рождаемости и трансформация социальной структуры населения;
- потеря трудового потенциала в связи с оттоком квалифицированных специалистов;
- деформация этнической структуры населения региона;
- трансформация социальной структуры населения.

Снизить отток молодежи в крупные города с более привлекательными условиями едва ли возможно без проведения региональной политики по выравниванию уровня жизни в регионах РФ. Представляется целесообразным изучить опыт других стран, где применяют политику улучшения уровня жизни в депрессивных регионах и со значительной дифференциацией по заработной плате.

Создаваемые искусственные точки роста по всей стране не дают быстрых результатов по выравниванию трудовой миграции. Для привлечения высококвалифицированных специалистов в конкретной области необходимо создавать комфортные условия и социальные возможности для удовлетворения потребностей населения.

[5]Кабардино-Балкария в цифрах. Краткий статистический сборник. 2023 / Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу [Электронный ресурс]. URL: https://26.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/КАБАРДИНО-БАЛКАРСКАЯ%20РЕСПУБЛИКА,%202023.pdf

[6]Кабардино-Балкария в цифрах. Краткий статистический сборник. 2023 / Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу [Электронный ресурс]. URL: https://26.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/КАБАРДИНО-БАЛКАРСКАЯ%20РЕСПУБЛИКА,%202023.pdf

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Табаксоев И. А.* Миграционные процессы в современной Кабардино-Балкарии: основные факторы и тенденции // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 2(70). С. 171–177.

2. *Берова Ф. Ж., Табаксоев И. А.* Социально-демографические индикаторы национальной безопасности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 6. С. 279–286. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-279-286

3. *Табаксоев И. А.* Современные демографические и миграционные процессы в КБР и их влияние на социально-экономическое развитие // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 345–353. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-345-353

4. *Аккиева С. И., Тхамокова И. Х., Табаксоев И. А., Теммоев И. Ю.* Современное состояние и тенденции развития миграционных процессов в Кабардино-Балкарии // Успехи современной науки и образования. 2017. Том 7. № 2. С. 34–41.

5. *Табаксоев И. А.* Демографические процессы как предмет комплексного социологического исследования // Научные проблемы гуманитарных исследований. № 1 (8). 2008. С. 88–93.

REFERENCES

1. Tabaksoev I.A. Migration processes in modern Kabardino-Balkaria: main factors and trends. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 2(70). Pp. 171–177. (In Russian)

2. Berova F.Zh., Tabaksoev I.A. Socio-demographic indicators of national security. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 6. Pp. 279–286. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-279-286. (In Russian)

3. Tabaksoev I.A. Modern demographic and migration processes in the KBR and their impact on socio-economic development. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 345–353. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-345-353. (In Russian)

4. Akkieva S.I., Tkhamokova I.Kh., Tabaksoev I.A., Temmoev I.Yu. Current state and trends in the development of migration processes in Kabardino-Balkaria. *Successes of Modern Science and Education.* 2017. Vol. 7. No. 2. Pp. 34–41. (In Russian)

5. Tabaksoev I.A. Demographic processes as a subject of complex sociological research. *Scientific Problems of Humanitarian Research*. No. 1(8). 2008. Pp. 8–93. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Табаксоев Ибрагим Ахматович, канд. социол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории социально-демографических исследований Центра социально-политических исследований, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

tabaksoev1982@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3608-4882, SPIN-код: 7506-1674

Берова Фаризат Жамаловна, д-р экон. наук, зав. лабораторией социально-демографических исследований Центра социально-политических исследований, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

berova@list.ru, SPIN-код: 2186-2173

Information about the authors

Ibragim A. Tabaksoev, Candidate of Sociological Sciences, Senior Researcher, Center for Socio-Political Research, Laboratory of Social and Demographic Research, Kabardino-Balkarian Scientific Center RAS;

18, Pushkin street, Nalchik, 360000, Russia;

tabaksoev1982@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3608-4882, SPIN-code: 7506-1674

Farizat Zh. Berova, Doctor of Economics, Head of Laboratory of Socio and Demographic Researches, Center for Socio-Political Research, Kabardino-Balkarian Scientific Centre of the Russian Academy of Science;

18, Pushkin street, Nalchik, 360000, Russia;

berova@list.ru, SPIN-code: 2186-2173

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 338.43 Аналитическая статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-252-265
KZJPFS

Социально-экономическая оценка размещения и специализации животноводства в Российской Федерации

А. Г. Чураев

Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова
367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180

Аннотация. Импортная зависимость страны по отдельным видам продукции животноводства обусловлена недостаточными объемами производства молока и мяса. Одна из причин сокращения объемов производства продукции скотоводства связана с уменьшением поголовья крупного рогатого скота.

Цель исследования – дать предложения по обеспечению достижения показателей пороговых значений продовольственной безопасности страны в отношении продукции скотоводства.

Методы и материалы. В процессе исследования применялись статистические и монографические методы, а также методы анализа и обобщения. На основе статистических данных и материалов Росстата показано размещение производства говядины и основных видов мясной продукции по федеральным округам Российской Федерации. Анализ полученных данных позволил сделать вывод об основных тенденциях развития животноводства в стране. Изучение материалов официальных органов и научных публикаций по проблеме его рационального размещения и специализации обозначило актуальность исследования и позволило выделить оптимальные условия организации производства.

Результаты. За последние десять лет в животноводстве динамика производства мяса крупного рогатого скота существенно изменилась. Значительно сократилось число регионов, где поголовье составляет свыше 500 голов. Снизилась их концентрация в регионах с поголовьем скота 200 и 300 тыс. голов. Всего около 60 регионов сократили поголовье крупного рогатого скота. Одновременно регионы с наименее благоприятными условиями для эффективного ведения молочного скотоводства нарастили поголовье коров. К ним относятся Дагестан, Башкортостан, Калмыкия, то есть зоны со значительным потенциалом развития мясного скотоводства. Поэтому необходима оценка современного развития животноводства в стране, на базе которой должна развиваться подотрасль, направленная на максимальный учет как отдельных регионов, так и страны в целом, эффективное использование производственных ресурсов и биологического потенциала территорий, динамичный прирост продукции, повышение эффективности ее производства и конкурентоспособности, обеспечение продовольственной безопасности страны.

Выводы. В настоящее время основное производство мяса крупного рогатого скота сконцентрировано в Центральном, Южном, Приволжском и Сибирском федеральных округах. В перспективе, исходя из природных и экономических условий, рост производства говядины целесообразно сконцентрировать в этих же регионах.

Ключевые слова: рациональная организация, импортная зависимость, скотоводство, производство, специализированные породы, товаропроизводители, оптимизация, оптимальное размещение, молочный и мясной рынок, кормовые угодья, производственные мощности

Поступила 24.12.2025, одобрена после рецензирования 16.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Чураев А. Г. Социально-экономическая оценка размещения и специализации животноводства в Российской Федерации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 252–265. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-252-265

© Чураев А. Г., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Analytical article

Socioeconomic assessment of animal husbandry placement and specialization in the Russian Federation

A.G. Churaev

Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov
180, Magomet Gadzhiev street, Makhachkala, 367032, Russia

Abstract. The country's dependence on imports for certain livestock products is due to insufficient milk and meat production. One of the reasons for the decline in livestock production is the decline in the cattle population.

Aim. This study is to provide proposals for achieving the country's food security thresholds for livestock products.

Methods and materials. Statistical and monographic methods, as well as analytical and generalizing approaches, are used in the study. Based on statistical data and Rosstat materials, the distribution of beef production and key meat products across the federal districts of the Russian Federation is shown. Analysis of the obtained data allowed us to draw conclusions about the main trends in the development of livestock farming in the country. A review of official bodies and scientific publications on the rational distribution and specialization of livestock farming highlighted the relevance of the study providing identification optimal conditions for organizing production.

Results. Over the past ten years, the dynamics of cattle production in livestock farming have changed significantly. The number of regions with livestock populations exceeding 500 head has significantly decreased. Their concentration has decreased in regions with livestock populations of 200,000 and 300,000 head. In total, approximately 60 regions have reduced their cattle populations. At the same time, regions with the least favorable conditions for effective dairy farming have increased their cow populations. These include Dagestan, Bashkortostan, and Kalmykia–areas with significant potential for beef cattle development. Therefore, an assessment of the current state of livestock farming in the country is necessary, which should be used to develop a subsector aimed at maximizing the benefits of both individual regions and the country as a whole, the efficient use of production resources and the biological potential of the territories, dynamic production growth, improved production efficiency and competitiveness, and the country's food security.

Conclusions. Currently, the main production of beef is concentrated in the Central, Southern, Volga, and Siberian Federal Districts. In the future, given the current natural and economic conditions, it would be prudent to focus beef production growth in these regions.

Keywords: rational organization, import dependence, cattle breeding, production, specialized breeds, commodity producers, optimization, optimal placement, dairy and meat market, forage lands, production capacitys

Submitted 24.12.2025, approved after reviewing 16.01.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Churaev A.G. Socioeconomic assessment of animal husbandry placement and specialization in the Russian Federation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 252–265. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-252-265

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Введение

Оценка территориально-отраслевого разделения труда в производстве продукции сельского хозяйства является сложным процессом. Она предусматривает проведение анализа большого количества факторов, которые необходимо учитывать во взаимосвязи между собой. Рациональная организация разделения труда способствует более полному обеспечению продовольственной безопасности, повышению уровня конкурентоспособности сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, выходу продукции на внутренний и внешний рынок.

Сложившиеся макроэкономические изменения в развитии агропромышленного комплекса проявились в относительно высокой импортной зависимости продукции скотоводства, овощеводства и плодоводства; нестабильности и сохраняющемся недостатке действующего организационно-экономического механизма АПК; наличии проблем, связанных с рациональным сочетанием интенсивных и экстенсивных факторов производства.

Развитие отраслей мясной индустрии играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны. В 2024 г. объем производства мяса, по данным Росстата, увеличился на 2,1 % к 2023 г., составив 16,9 млн т в живом весе[1]. Наибольший удельный вес приходится на мясо птицы – 42,5 % (7,2 млн т) и свинины – 37,2 % (6,3 млн т), мясо говядины 17 % (2,9 млн т), баранины и козлятины 2,6 % (0,4 млн т), на остальные виды мяса – 0,7 %.

Цель исследования – дать предложения по увеличению производства мяса, мясных консервов, молока и молочных продуктов за счет рационального взаимодействия на сельскохозяйственных территориях мясного и молочного скотоводства со смежными отраслями.

Методы исследования

При проведении исследования, касающегося пространственного развития сельскохозяйственной продукции в стране, использовались аналитический, монографический, экономической статистики, экспертный и др. методы исследования. Материалами для решения данной проблемы послужили научная литература и труды ученых, занимающихся изучением данной проблемы, статистические данные Федеральной службы государственной статистики.

Результаты исследования

Развитие скотоводства в стране предусматривает увеличение производства мяса крупного рогатого скота. В настоящее время оно носит неустойчивый характер, то есть сокращается даже в регионах со значительным объемом производства. В 37 регионах с весомым производством говядины наибольший прирост наблюдается в Брянской и Орловской областях. В целом производство говядины сконцентрировано в Центральном (20,6 %), Южном (16,3 %), Приволжском (27,5 %) и Сибирском (13,4 %) федеральных округах (табл. 1).

В 2024 г. производство мяса крупного рогатого скота составило 2,86 млн т, что на 7,1 тыс. т больше уровня 2023 года. Однако при росте производства в сельскохозяйственных организациях на 4,5 % в хозяйствах населения произошло его снижение на 3,5 %.

В перспективе, исходя из природных и экономических условий ведения отрасли, на увеличение производства говядины должны быть сориентированы регионы Северного Кавказа, Поволжья, Южного Урала, Западной и Восточной Сибири [1].

[1]Российский рынок мяса: итоги 2024 года // ФГБУ «Центр Агроаналитики»: офиц. сайт. URL: https://new5.specagro.ru/202504/rossiyskiy-rynok-myasa-itogi-2024-goda (дата обращения: 25.09.2025).

Таблица 1. Размещение производства говядины по федеральным округам Российской Федерации в 2020–2024 гг.

Table 1. Beef production by federal district of the Russian Federation, 2020–2024

Федеральные округа	Поголовье крупного рогатого скота (без коров)		Объем производства говядины		Производство говядины на душу населения, кг	Коэффициент специализации
	тыс. гол.	%	тыс. т	%		
Российская Федерация	9656,7	100,0	1651,6	100,0	11,3	1,00
Центральный	1801.3	18,7	340,1	20,6	8,5	0,76
Северо-Западный	369,7	3,8	51,1	3,1	3,7	0,33
Южный	1124,4	11,6	269,6	16,3	16,3	1,44
Северо-Кавказский	1017,2	10,5	160,1	9,7	15,8	1,40
Приволжский	2743,4	28,4	454,0	27,5	15,8	1,40
Уральский	441,2	4,5	77,7	4,7	6,3	0,56
Сибирский	1515,9	15,7	221,9	13,4	13,2	1,17
Дальневосточный	643,6	6,7	77,2	4,7	9,7	0,86

Источник: составлено по данным Росстата[2]

К относительно неблагоприятным для эффективного развития скотоводства со слабой обеспеченностью кормовыми угодьями относятся республики Карелия, Коми и Сахалинская область. Кроме полной обеспеченности в регионах крупного рогатого скота кормами, особую роль играет разведение племенного скота.

В настоящее время почти 50 % коров мясных пород сконцентрированы в Южном и Центральном федеральных округах. В Поволжье, Сибири и на Северном Кавказе сосредоточено 10 % мясного скота. Однако в каждом регионе разведение пород значительно отличается. Например, в Южном и Сибирском федеральных округах мясо получают от казахской белоголовой породы. В Поволжье высокие результаты получают при разведении лимузинской породы. Наиболее продуктивной породой в Северо-Западном и Уральском федеральных округах считается абердин-ангусская. Таким образом, дальнейшее развитие мясного скотоводства требует оптимизации его структуры на базе районирования пород для каждого региона [2].

Эффективность развития скотоводства зависит и от уровня материально-технической базы, прежде всего от наличия вновь построенных и модернизированных ферм. За четыре года было введено 76 новых животноводческих объектов, 20 модернизированы. В результате дополнительно было получено 8,5 тыс. т продукции скотоводства.

За последние пять лет производство дополнительных объемов специализированного мясного и помесного крупного рогатого скота на убой на вновь построенных и модернизированных объектах по федеральным округам осуществлялось неравномерно. В 2024 г. было введено 2 новых, модернизированных и реконструированных объекта мясного скотоводства, которые позволили дополнительно произвести 0,4 тыс. т мяса крупного рогатого скота на убой (в живом весе) (табл. 2).

[2]Федеральная служба государственной статистики // Росстат: офиц. сайт. URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 08.09.2025).

Таблица 2. Прирост производства крупного рогатого скота на убой (в живом весе) на вновь построенных и модернизированных фермах

Table 2. Increase in cattle production for slaughter (live weight) on newly built and modernized farms

Показатели	Годы				
	2020	2021	2022	2023	2024
Число объектов, ед.: введенных новых	14	30	18	13	1
реконструированных и модернизированных	6	3	8	2	1
Всего	20	33	26	15	2
Объем производства крупного рогатого скота на убой (в живом весе), тыс. т:					
за счет ввода новых объектов	0,7	4,8	1,4	0,4	0,4
за счет реконструкции и модернизации	0,3	0,04	0,4	0,01	0,03
за счет ввода новых объектов, реконструкции и модернизации имеющихся объектов	1	4,8	1,8	0,4	0,4
Число созданных скотомест, ед.: за счет введенных новых объектов	28740	48271	19623	8250	500
за счет реконструкции и модернизации	684	180	370	200	150

Источник: составлено по данным[3]

В 2024 г. поголовье крупного рогатого скота специализированных мясных пород и помесного скота в хозяйствах всех категорий составило около 3,77 млн голов. Доля специализированного мясного и помесного скота составляла 23 % от общего поголовья крупного рогатого скота.

Продовольственная безопасность тесно связана с мясной промышленностью, обеспечивающей переработку сырья продукции скотоводства. Это интегрированная система технологически и экономически взаимосвязанных предприятий, ориентированных на надежное обеспечение населения страны не только мясом, но и мясопродуктами. Ее предприятия преимущественно заняты заготовкой и убоем животных для производства колбас, полуфабрикатов, множеством сопутствующих и промежуточных продуктов. Технологический процесс производства конечной продукции осуществляется на мясных и мясоперерабатывающих комбинатах, мясоперерабатывающих заводах и в колбасном производстве.

Мясная промышленность тесно связана также с кормопроизводством, торговлей, с производством для них технологического оборудования, а также с организациями, оказывающими необходимые услуги: специализированный транспорт для перевозки мясных продуктов, кормов и комбикормов, специализированные предприятия по ремонту технологического оборудования, выпуску тары для расфасовки и упаковки скоропортящейся продукции.

В 2024 г. в стране производство скота и птицы на убой в убойном весе составило 11,7 млн т, в том числе птицы – 5,5 млн, свиней – 4,9 млн, крупного рогатого скота – 1,7 млн, овец и коз – 0,2 млн тонн. Объем производства мяса и субпродуктов достиг 10107 тыс. т, продолжали расти производство и реализация полуфабрикатов, колбасных изделий и мясных консервов (табл. 3), увеличилась и обновилась номенклатура выпускаемой мясной продукции (табл. 4)[4].

[3]Национальный доклад о ходе и результатах реализации в 2024 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 04.07.2024 г. № 1755-р. МСХ, 2024. 136 с.

[4]Российский статистический ежегодник. 2025: Стат.сб./Росстат. М., 2025. 621 с.

Таблица 3. Производство основных видов мясной продукции в Российской Федерации, тыс. т

Table 3. Production of the main types of meat products in the Russian Federation in thousand of tons

Виды мясной продукции	Годы						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Мясо и субпродукты	8137	8261	8644	8919	9394	9751	10107
Мясо и субпродукты пищевые домашней птицы	4877	4847	4808	4870	5058	5065	5187
Полуфабрикаты мясные, мясосодержащие, охлажденные, замороженные[1)]	3275	3658	4175	4287	4396	4727	4937
Изделия колбасные вареные, в том числе фаршированные	1544	1552	1604	1669	1647	1661	1688
Консервы мясные (мясосодержащие), включая консервы для детского питания, млн усл. банок	603	669	736	643	838	896	914

[1)] Без продукции организаций общественного питания.

Источник: составлено по данным[5]

Таблица 4. Производство мяса и субпродуктов по видам в Российской Федерации, тыс. т

Table 4. Meat and offal production by type in the Russian Federation, in thousands of tons

Виды продукции	Годы						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Мясо и субпродукты	8137	8261	8644	8919	9394	9751	10107
из них: мясо крупного рогатого скота парное, остывшее или охлажденное	227	242	254	306	297	651	367
мясо крупного рогатого скота замороженное	71,4	67,0	84,3	95,0	105,7	117,0	154,0
свинина парная, остывшая или охлажденная	2415	2496	2826	2915	3141	3520	3428
свинина замороженная	254	323	358	421	464	524	620
баранина парная, остывшая или охлажденная	11,7	10,0	8,4	6,1	6,8	12,1	9,2
баранина замороженная, т	1563	1241	1042	1870	1603	3081	1973
козлятина парная, остывшая или охлажденная, т	0,9	17,3	29,2	15,5	27,5	18,3	33,0
козлятина замороженная, т	17,4	9,3	21,4	14,0	11,5	24,1	27,4
конина парная, остывшая или охлажденная	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5
мясо лошадей замороженное	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5	0,6
оленина парная, остывшая или охлажденная	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,2
оленина и мясо прочих животных семейства оленьих и субпродукты пищевые замороженные	3,2	3,6	3,6	4,1	4,0	4,3	5,3
субпродукты пищевые крупного рогатого скота, свинные, бараньи, козьи, лошадей парные, остывшие или охлажденные	275	263	294	2394	308	339	326
Мясо и субпродукты пищевые домашней птицы	4877	4847	4808	4870	5058	5065	5187
из них: мясо птицы охлажденное	3070	3253	3275	3372	3423	3425	3504
мясо сельскохозяйственной птицы замороженное	1273	1027	984	962	1063	1078	1133
субпродукты сельскохозяйственной птицы пищевые	534	567	550	536	572	562	550

Источник: составлено по данным[6]

Самообеспеченность мясом и мясопродуктами (в пересчете на мясо) составила 101,8 %, что на 16,8 процентных пункта выше порогового значения национальной Доктрины продовольственной безопасности. Практически насыщен внутренний рынок свинины и мяса птицы, что позволило нарастить экспорт этих видов мясной продукции.

[5]Там же.

[6]Российский статистический ежегодник. 2025: Стат. сб. / Росстат. М., 2025. 621 с.

Повысился уровень использования производственных мощностей предприятий по производству мясной продукции, который в зависимости от ее вида колебался от 51 до 76 %. Однако мясная промышленность испытывала дефицит отдельных видов сырья, частично покрывающийся за счет импортных поставок.

В перспективе развитие мясной промышленности связано с наращиванием производства товарной продукции животноводства, увеличением глубины переработки мясного сырья, расширением ассортимента вырабатываемой продукции, для чего необходимо:

– осуществить инновационно-технологическое обновление производства и внедрение новых технологических процессов по организации убоя, комплексной переработки животных и продуктов убоя на основе использования инновационных ресурсосберегающих технологий;

– увеличить сбор и переработку побочных сырьевых ресурсов, вовлечь в хозяйственный оборот вторичные ресурсы для выработки различных видов продукции;

– ускоренно развивать кормовую базу животноводства, инфраструктуру мясной промышленности, товаропроводящую и логистическую инфраструктуру рынка мяса и продуктов его переработки.

В среднем за пять лет (2020–2024) к регионам с высоким потенциалом развития скотоводства и обладающим необходимыми природными условиями относятся такие области, как Воронежская, Кировская, Калужская, Волгоградская, Саратовская, а также Республика Татарстан [3].

При наличии 7637,4 тыс. голов коров наибольший прирост производства продукции молочного скотоводства достигнут в республиках Татарстан и Удмуртия, в Пензенской, Калужской, Тверской, Самарской, Иркутской, Новосибирской и Омской областях, Алтайском крае. Снизился объем производства молока всего в 41 регионе (табл. 5).

Таблица 5. Размещение производства молока по федеральным округам Российской Федерации в 2020–2024 гг.

Table 5. Milk production by federal district of the Russian Federation, 2020-2024

Федеральные округа	Поголовье коров		Производство молока		Надой на 1 корову, кг/гол	Производство молока на душу населения, кг	Коэффициент специализации
	тыс. гол.	%	тыс. т	%			
Российская Федерация	7637,4	100,0	33078,8	100,0	5172	226	1,00
Центральный	1214,1	15,9	6629,4	20,0	7390	166	0,74
Северо-Западный	315,1	4,1	2093,3	6,3	7735	151	0,67
Южный	1138,5	14,9	3850,3	11,6	4481	232	1,03
Северо-Кавказский	1044,5	13,7	2924,9	8,8	3024	289	1,28
Приволжский	1922,4	25,2	10299,5	31,1	5876	358	1,58
Уральский	356,3	4,7	1964,1	5,9	6189	160	0,71
Сибирский	1173,8	15,4	4364,6	13,2	4618	260	1,15
Дальневосточный	472,8	6,2	952,7	2,9	2483	119	0,53

Источник: составлено по данным Росстата[7]

За прошедшие 9 месяцев 2025 года производство молока в хозяйствах всех категорий увеличилось на 0,27 % по сравнению с этим же периодом 2024 г. и составило 26,2 млн тонн. К регионам, достигшим наиболее высоких показателей в 2025 г., относятся Республика Татарстан (57,0 тыс. т), Удмуртская (50,0 тыс. т) и Пензенская области (43,0 тыс. т).

Сокращение валового производства молока на 388,0 тыс. т, или на 4,1 %, произошло за счет снижения на 4,7 %, или на 387 тыс. т., его объемов в хозяйствах населения и на 3,4 %,

[7]Федеральная служба государственной статистики // Росстат: офиц. сайт. URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 08.09.2025).

или на 74 тыс. т, в фермерских хозяйствах. В целом Сибирский, Уральский и Дальневосточный, а также Приволжский, Центральный и Южный федеральные округа в общем сократили производство на 4,1 %. В Ростовской области, Алтайском крае и Башкортостане отмечается наибольшее падение производства – на 88 тыс. т, 29 тыс. т и 23 тыс. т соответственно. В сельскохозяйственных организациях Московской, Курской, Новосибирской и ряде других областей также произошло снижение производства.

Одним из направлений увеличения производства молока является рациональное взаимодействие на сельских территориях молочного скотоводства со смежными отраслями. Так, в 2024 г. было построено, реконструировано, модернизировано и введено в эксплуатацию более 112 новых молочных ферм и комплексов. Это обеспечило дополнительное производство молока в объеме 303,9 тыс. тонн. Однако по сравнению с 2023 г. ввод новых объектов сократился на 36 % (табл. 6).

Таблица 6. Прирост производства молока на вновь построенных, реконструированных и модернизированных фермах

Table 6. Increased milk production on newly constructed, reconstructed, and modernized farms

Показатели	Годы				
	2020	2021	2022	2023	2024
Число объектов, ед.:					
введенных новых	105	131	145	126	89
реконструированных и модернизированных	67	41	58	50	23
Всего	172	172	203	176	112
Объем производства молока, тыс. т:					
за счет введенных новых объектов	319	407,5	463,1	242,6	286,9
за счет реконструкции и модернизации	41,3	38,9	27,4	24,2	17,0
за счет ввода новых объектов, реконструкции и модернизации имеющихся объектов	360,3	446,4	490,5	266,8	303,9
Число созданных скотомест, ед.:					
за счет введенных новых объектов	87995	88336	101124	76464	63600
за счет реконструкции и модернизации	12949	8906	14336	11432	7616
Всего	100944	97242	115460	87896	71216

Источник: составлено по данным[8]

Больше всего было построено и введено в эксплуатацию объектов молочного скотоводства в Приволжском федеральном округе (43 объекта, или 38 %). В Южном федеральном округе техническая модернизация практически не осуществлялась, составив 2 объекта, или 2 процента.

В 2025 г. планировалось реализовывать сразу 61 проект строительства и модернизации молочных ферм. Всего на них будет содержаться порядка 47,2 тыс. коров, что даст возможность увеличить объемы надоев на 174 тыс. тонн. Кроме того, на проектную мощность выводятся ранее введенные в эксплуатацию 72 фермы с поголовьем более 69 тыс. коров. Ожидается, что на них до конца года будет произведено порядка 186 тыс. т молока. Таким образом, объем молока от нововыведенных на проектную мощность ферм в 2025 г. составит 360 тыс. тонн. Всего же, по сведениям Центра отраслевой экспертизы Россельхозбанка, до 2030 г. запланировано реализовать 405 инвестиционных проектов по строительству молочных ферм, 60 % из которых активно реализуются [4].

[8]Национальный доклад о ходе и результатах реализации в 2024 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 04.07.2024 г. № 1755-р. МСХ, 2024. 136 с.

Рост производства сырого молока создал устойчивую базу для продолжения увеличения производства молока и молочной продукции. В 2024 г. производство основных видов молочных продуктов в России увеличилось на 4,9 %, достигнув 11478 тыс. тонн (табл. 7).

В 2024 г. при росте объемов производства товарного молока наибольший прирост в структуре продукции приходится на сливки, йогурт и творог, то есть 51, 70 и 49 тыс. т соответственно. Одновременно на 6,0 и 9,0 тыс. т снизилось производство масла и кефира. В целом при производстве 34,0 млн т молока его потребление составило 250 кг на душу населения. Увеличение спроса на молочную продукцию объясняется ростом реально получаемых доходов населения и эффективностью государственной политики, на которую своевременно отреагировали производители молока и перерабатывающие предприятия.

Наибольшее количество ведущих отечественных товаропроизводителей по переработке молока сосредоточено в г. Москве и Московской области – 49 предприятий, Нижегородской области – 17, г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области – 15, Краснодарском крае – 14, Новосибирской области – 13.

Таблица 7. Производство питьевого молока, йогурта, масла сливочного, сливок, сметаны, сыворотки, творога и сыра в России в 2020–2024 гг., тыс. т

Table 7. Production of drinking milk, yogurt, butter, cream, sour cream, whey, cottage cheese and cheese in the Russian Federation from 2020 to 2024 in thousands of tons

Показатель	Годы					Темп прироста 2024 г. к 2023 г., %
	2020	2021	2022	2023	2024	
Молоко жидкое обработанное	5514	5564	5730	5766	6100	5,80
Кефир	964	941	895	923	913	-1,00
Йогурт	810	819	692	721	791	9,63
Сыворотка	976	1044	1048	1080	1090	1,00
Сметана	532	536	534	583	589	1,00
Творог	491	491	457	441	475	7,66
Сыры	566	602	669	792	841	6,15
Масло сливочное	282	273	314	323	317	-2,00
Сливки	188	235	250	311	362	16,46
Итого	10322	10504	10588	10940	11478	4,92

Источник: составлено по данным Росстата[9]

Молоко в нашей стране является одним из самых важных продуктов. Однако отечественная молочная промышленность даже при имеющейся государственной поддержке не обеспечивает потребности населения в молоке и продукции его переработки.

Складывающийся дефицит молочного сырья и рост цен на него отражаются на эффективности отрасли. Сложным является и распределение сырья между перерабатывающими организациями. Причины этого заключаются в стремлении снизить затраты как на переработку молока, так и на продукцию переработки, удаленность перерабатывающих предприятий от сельскохозяйственных производителей, поскольку молоко является скоропортящимся продуктом. У производителей молока часто отсутствуют холодильники для хранения продукции, а постоянный рост цен на бензин приводит к высоким транс-

[9]Федеральная служба государственной статистики // Росстат: офиц. сайт. URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 08.09.2025).

портным расходам. Поэтому сельскохозяйственные организации пытаются найти перерабатывающие предприятия вблизи мест производства своей продукции. В результате замена крупного предприятия на ряд мелких приводит к уменьшению эффективности производства.

Примером эффективного производства продукции молочного скотоводства может служить Республика Беларусь. Молоко в объеме 4,0 тыс. т здесь перерабатывается на 57 головных предприятиях, включая филиалы. На долю цельномолочной продукции приходится 27 %, масла – 41 %, сыра – 22 %.

Позитивным тенденциям в области интенсификации производства, расширения ассортимента и повышения качества продукции, модернизации действующих предприятий способствует Программа социально-экономического развития Республики Беларусь. Достижению ее целей способствует также оптимальное размещение перерабатывающих предприятий, которое в свою очередь влияет на стоимость транспортировки молока-сырья и доставки молочной продукции к потребителям. Поэтому оптимизация размещения молочных предприятий должна осуществляться таким образом, чтобы обеспечивались минимальные затраты на всех стадиях производства продукции, начиная от доставки сырья к месту переработки, то есть должна быть обеспечена минимальная совокупность транспортных затрат. Данные расходы в себестоимости продукции предприятий молокоперерабатывающей промышленности занимают значительный удельный вес поэтому необходимо упростить заготовительный аппарат, наладить прочную и взаимовыгодную связь между поставщиками молока-сырья и перерабатывающими предприятиями. Основная цель управления молокоперерабатывающими предприятиями – обеспечение конкурентоспособности продукции посредством поставки качественного сырья в необходимые сроки и в необходимом количестве. Поскольку сырье обладает значительным объемом по отношению к конечному переработанному продукту (а конечный продукт дороже исходного), перерабатывающие предприятия молочного подкомплекса АПК теряют сырьевые зоны и не могут загрузить свои мощности, что приводит к снижению экономической эффективности. В связи с этим возможным выходом из сложившейся ситуации может стать создание агропромышленной интеграции, которая в свою очередь приведет к усилению производственных, экономических и социальных связей между промышленностью и сельским хозяйством.

Сочетание экономических интересов сельхозпроизводителей молока и перерабатывающих предприятий становится необходимостью. В настоящее время крайне низкие закупочные цены, по которым товаропроизводители продают молоко крупным перерабатывающим организациям, заставляют их сотрудничать с коммерческими структурами. Учитывая такую тенденцию, необходимо разработать концепцию, по которой будут организованы сбор и первичная переработка молока. Данная схема должна предусматривать наличие пунктов приема молока, увеличение сроков его хранения.

Молокоприемные пункты рационально формировать с целью доставки молока от нескольких сельхозпроизводителей, а организатором сбора продукции должны выступать потребители сырья, то есть молочные заводы. Они же должны обеспечить оснащение оборудованием, необходимыми приборами учета и контроля качества поступающего молока, предоставить средства транспортировки сырья.

Данные мероприятия будут способствовать стремлению как производить, так и перерабатывать, расширять взаимовыгодное сотрудничество между интегральными объединениями по производству и переработке молока и молочной продукции. Одно из условий такой интеграции – получение доходов после реализации продукции в зависимости от вклада в конечный результат.

Тогда будет заинтересованность всех участников не только в получении прибыли, но и в высоком качестве готовой продукции при сокращении производственных затрат.

Анализ рынка молока и молочной продукции показал, что ее ассортимент из года в год меняется. Традиционные молочные продукты, такие как сметана, ряженка, простокваша, вытесняются биокефиром, биомолоком, биойогуртом [5].

Следует отметить, что одной из проблем компаний по производству и переработке молока является большой объем импортной продукции, отличающейся более низкой стоимостью и как результат – высоким уровнем конкурентоспособности.

Кроме того, низкий технологический уровень производства ведет к росту производственных затрат, снижению качества и объемов производства, что не дает возможность снизить себестоимость продукции. Повысить уровень эффективности не удается также из-за низкого качества сырья, связанного с использованием растительных добавок, и его дефицита в определенный период времени.

В условиях дефицита сырьевых ресурсов для производства молочной продукции основным направлением должно стать привлечение всех видов молочного сырья в виде обезжиренного молока, пахты, сыворотки.

Размещение производства молочной продукции должно определяться наличием потребителей и возможностями животноводства – это Южный, Северо-Кавказский, Приволжский и Сибирский федеральные округа.

На развитие как мясного, так и молочного скотоводства значительное влияние оказывает обеспеченность кормовыми угодьями, то есть развитие смежной отрасли кормопроизводства. Самый высокий уровень обеспеченности кормами приходится на южные районы Центра европейской части страны, Поволжье, часть регионов Западной и Восточной Сибири, Северного Кавказа.

В настоящее время с 63,5 тыс. га убранной площади сельскохозяйственные организации получают сенаж, силос, травяную муку и гранулированные корма. Более 40,0 % кормов с улучшенных сенокосов и пастбищ заготавливают в Республике Татарстан, 11,3 % – в Ленинградской, 10,8 % – в Московской областях, 4,8 % – в Красноярском крае, 3,6 % – Свердловской и 3,2 % – в Волгоградской областях. Дальнейшее увеличение объема продукции скотоводства будет зависеть от продуктивности расширения и эффективности использования природных кормовых угодий и пашни, занятой кормовыми угодьями. Однако большая их часть засолена, луга закустарены. Это требует дополнительных затрат на проведение мелиоративных работ и удаление кустарников.

Наибольшей ценностью отличаются кормовые угодья, расположенные в Нечерноземной зоне, где преобладают пойменные луга. При наличии здесь более одного миллиона заливных сенокосов на долю Центрального федерального округа приходится 420,8 тыс. га, Северо-Западного – 308,8 тыс. га и Приволжского федерального округа – 289,3 тыс. гектаров.

Высокоплодородные заливные сенокосы и пастбища сосредоточены в Республике Коми, Рязанской, Архангельской, Нижегородской и Кировской областях. Дальнейшее развитие молочного скотоводства целесообразно расширять на землях, отличающихся высоким плодородием, способных возобновляться при наступлении паводков весной.

Выводы

Чтобы обеспечить достижение показателей пороговых значений продовольственной безопасности страны в отношении продукции животноводства, необходимо ускоренно развивать отечественную сырьевую базу отрасли, повысить качество и конкурентоспособность продукции за счет модернизации существующих мощностей и строительства новых заводов и цехов. Для этого предстоит повысить уровень инвестирования для развития

материально-технической базы отраслей и особенно для укрепления сырьевой базы, значительного сокращения потерь на всех стадиях производства, хранения, транспортировки, реализации и потребления.

Рост производства и располагаемых доходов населения в 2024 г. обеспечил рост среднедушевого потребления мяса до 83 кг, превысив средний показатель в развитых странах.

Выработку мясных консервов необходимо предусматривать преимущественно на предприятиях мясной промышленности, расположенных или намечаемых к строительству в сырьевых зонах страны: Центральном, Южном, Северо-Кавказском, Приволжском, Сибирском федеральном округах. Здесь целесообразно организовывать производство быстрозамороженных готовых мясных блюд, сохраняющих высокое качество.

Наращивание производственных мощностей необходимо также в наиболее отдаленных регионах Урала и Дальнего Востока. При этом в целях сокращения потерь сырья в процессе транспортировки и его переработки, повышения эффективности производства мяса и мясопродуктов строящиеся предприятия следует размещать в непосредственной близости от животноводческих хозяйств.

Развитие молочного скотоводства должно быть направлено на увеличение валового производства молока и расширение ассортимента выпускаемой молочной продукции. Основными регионами должны стать Приволжский, Северо-Кавказский, Сибирский и Южный федеральные округа с уровнем специализации выше среднероссийского показателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алтухов А. И.* Парадигма продовольственной безопасности России: моногр. М.: Фонд «Кадровый резерв», 2019. 685 с. ISBN: 978-5-6041260-1-1. EDN: JYYYLH

2. *Алтухов А. И.* Размещение и специализация сельского хозяйства – основа его пространственного развития // Научные труды Вольного экономического общества России. 2019. Т. 216. № 2. С. 272–282. EDN: ZYLSNF

3. *Силаева Л. П.* Основные тенденции пространственного развития сельского хозяйства России // Экономика сельского хозяйства России. 2022. № 3. С. 94–98. DOI: 10.32651/223-94. EDN: VZBSUF

4. *Алтухов А. И.* Развитие инфраструктуры и логистического обеспечения экспортных поставок российского зерна // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2020. № 8. С. 2–9. DOI: 10.31442/0235-2494-2020-0-8-2-9. EDN: XPXPYB

5. *Силаева Л. П., Пятинский А. С., Клепцова Н. А.* Размещение производства кормов для молочного и мясного скотоводства в условиях интенсификации сельского хозяйства // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2020. № 6(63). С. 81–87. DOI: 10.33938/206-81. EDN: AFTZRS

6. *Силаева Л. П., Чураев А. Г.* Пространственная организация производства продукции животноводства // Государственная аграрная политика: стратегические направления, организационно-экономические механизмы и меры реализации: материалы круглого стола в рамках XXVII Российской агропромышленной выставки «Золотая осень 2025», Москва, 09 октября 2025 года. М.: ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ, ООО «Сам Полиграфист», 2025. С. 250–260. EDN: RMAEHA

7. *Силаева Л. П.* Пространственная организация сельского хозяйства как основа рационального размещения и специализации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 163–172. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-163-172. EDN: VGEFXX

8. *Алтухов А. И., Семенова Е. И.* Роль и место сельского хозяйства в социально-экономическом развитии страны // Экономика сельского хозяйства России. 2025. № 10. С. 2–13. DOI: 10.32651/2510-2. EDN: NNSKNU

9. *Клепцова Н. А., Меньшова А. Е.* Пространственное развитие сельского хозяйства в регионах Урала, Дальнего Востока и Сибири // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2025. № 4(122). С. 198–204. DOI: 10.33938/254-198. EDN: FBAWKN

10. *Чураев А. Г.* Основные факторы создания специализированных высокотехнологичных зон // Развитие российской экономики в условиях создания технологического суверенитета: сборник научных трудов по итогам научной конференции, Москва, 10–11 сентября 2024 года. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2024. С. 284–290. EDN: KYBAFD

REFERENCES

1. Altukhov A.I. Paradigm of food security of Russia: monograph. Moscow: Fund "Personnel Reserve", 2019. 685 p. ISBN 978-5-6041260-1-1. EDN JYYYLH. (In Russian)

2. Altukhov A.I. Placement and specialization of agriculture – the basis of its spatial development. *Scientific works of the Free Economic Society of Russia*. 2019. Vol. 216. No. 2. Pp. 272–282. EDN ZYLSNF. (In Russian)

3. Silaeva L.P. Main trends in the spatial development of agriculture in Russia. *Economics of Agriculture in Russia.* 2022. No. 3. Pp. 94–98. DOI: 10.32651/223-94. EDN: VZBSUF. (In Russian)

4. Altukhov A.I. Development of infrastructure and logistics support for export deliveries of Russian grain. *Economics of agricultural and processing enterprises*. 2020. No. 8. Pp. 2–9. DOI: 10.31442/0235-2494-2020-0-8-2-9. EDN: XPXPYB. (In Russian)

5. Silaeva L.P., Pyatinsky A.S., Kleptsova N.A. Placement of feed production for dairy and beef cattle breeding in the context of agricultural intensification. *Economy, labor, management in agriculture*. 2020. No. 6(63). Pp. 81–87. DOI: 10.33938/206-81. EDN: AFTZRS. (In Russian)

6. Silaeva L.P., Churaev A.G. Spatial organization of livestock production. *Gosudarstvennaya agrarnaya politika: strategicheskiye napravleniya, organizatsionno-ekonomicheskiye mekhanizmy i mery realizatsii: materialy kruglogo stola v ramkakh XXVII Rossiyskoy agropromyshlennoy vystavki "Zolotaya osen' 2025", Moskva, 09 oktyabrya 2025 goda* [State agrarian policy: strategic directions, organizational and economic mechanisms and implementation measures: materials of the round table within the framework of the XXVII Russian agro-industrial exhibition "Golden Autumn 2025", Moscow, October 9, 2025]. Moscow: FGBNU FNTS VNIIESKH, OOO "Sam Poligrafist", 2025. Pp. 250–260. EDN: RMAEHA. (In Russian)

7. Silaeva L.P. Spatial organization of agriculture as a basis for rational placement and specialization. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 163–172. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-163-172. EDN: VGEFXX. (In Russian)

8. Altukhov A.I., Semenova E.I. The role and place of agriculture in the socio-economic development of the country. *Economics of agriculture in Russia.* 2025. No. 10. Pp. 2–13. DOI: 10.32651/2510-2. EDN: NNSKNU. (In Russian)

9. Kleptsova N.A., Menshova A.E. Spatial development of agriculture in the regions of the Urals, Far East and Siberia. *Economy, labor, management in agriculture.* 2025. No. 4(122). Pp. 198–204. DOI: 10.33938/254-198. EDN: FBAWKN. (In Russian)

10. Churaev A.G. Main factors in the creation of specialized high-tech zones. *Razvitiye rossiyskoy ekonomiki v usloviyakh sozdaniya tekhnologicheskogo suvereniteta: sbornik nauchnykh trudov po itogam nauchnoy konferentsii, Moskva, 10–11 sentyabrya 2024 goda* [Development of the Russian Economy in the Context of the Creation of Technological Sovereignty: A Collection of Scientific Papers Following the Results of a Scientific Conference, Moscow, September 10–11, 2024]. Moscow: Izdatel'sko-torgovaya korporatsiya “Dashkov i K”, 2024. Pp. 284–290. EDN: KYBAFD. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Чураев Абдурахман Гарунович, соискатель, Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова;
367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180;
churaev64@mail.ru, SPIN-код: 3067-0184

Information about the author

Abdurakhman G. Churaev, Applicant for a Degree Candidate Sciences, Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov;
180, Magomet Gadzhiev street, Makhachkala, 367032, Russia;
churaev64@mail.ru, SPIN-code: 3067-0184

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 330.341.1:332.1 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-266-282
YVMPUS

Структурная эффективность региональных инновационных систем: методологические и институционально-правовые основания

С. А. Махошева[✉1], А. А. Кумуков[2]

[1]Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а
[2]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В статье исследуется проблема структурной эффективности региональных инновационных систем (РИС) как ключевого условия устойчивого социально-экономического развития территорий в экономике знаний. Актуальность работы обусловлена тем, что в условиях усиления межрегиональной конкуренции и технологических трансформаций традиционные подходы к оценке инновационного развития, основанные преимущественно на количественных показателях, не позволяют выявить внутренние ограничения функционирования РИС.

Цель исследования. Обоснование теоретико-методологических и институционально-правовых оснований анализа структурной эффективности региональных инновационных систем и разработка подходов к ее оценке.

Научная новизна состоит в трактовке структурной эффективности как интегральной характеристики архитектуры РИС, отражающей согласованность элементов инновационного цикла, сетевую связность участников, институциональную устойчивость и функциональную полноту системы. В работе используются методы системного и структурно-функционального анализа, институционального и сетевого подходов, сравнительного анализа, а также интерпретация статистических данных Росстата и материалов НИУ ВШЭ.

Результаты. Обоснованы ключевые критерии структурной эффективности РИС, раскрыта роль институционально-правовой среды в формировании инновационных связей и предложены методические подходы к диагностике согласованности элементов региональных инновационных систем.

Выводы. Повышение инновационной результативности регионов требует не только наращивания ресурсов, но и оптимизации структуры взаимодействия науки, бизнеса и государства. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и корректировке региональной инновационной политики.

Ключевые слова: региональная инновационная система, структурная эффективность, инновационное развитие, институциональная среда, тройная спираль, кластеры, трансфер технологий, региональная политика

Поступила 12.12.2025, одобрена после рецензирования 05.02.2026, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Махошева С. А., Кумуков А. А. Структурная эффективность региональных инновационных систем: методологические и институционально-правовые основания // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 266–282. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-266-282

© Махошева С. А., Кумуков А. А., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

JEL: O30, O38, R11, R58 Original article

Structural efficiency of regional innovation systems: methodological and institutional-legal foundations

S.A. Makhosheva✉[1], A.A. Kumukov[2]

[1]Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia
[2]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia

Abstract. The article examines the problem of structural efficiency of regional innovation systems (RIS) as a key condition for sustainable socio-economic development of territories in the knowledge -based economy. The relevance of this study stems from the fact that, in the context of increased interregional competition and technological transformation, traditional approaches to assessing innovation based primarily on quantitative indicators fail to identify internal constraints in the RIS functioning.

Aim. The research is to substantiate the theoretical, methodological and institutional-legal foundations for analyzing the structural efficiency of regional innovation systems and to develop approaches to its assessment.

Scientific novelty lies in interpreting structural efficiency as an integral characteristic of the RIS architecture, reflecting the coherence of innovation cycle elements, network connectivity of actors, institutional sustainability and functional completeness of the system. The research employs methods of systems and structural-functional analysis, institutional and network approaches, comparative analysis, as well as interpretation of Rosstat statistics and analytical materials of the Higher School of Economics.

Results. Substantiate key criteria of RIS structural efficiency, reveal the role of the institutional and legal environment in shaping innovation linkages, and propose methodological approaches for diagnosing the coherence of regional innovation system elements.

Conclusions. It is concluded that increasing regional innovation performance requires not only resource accumulation but also optimization of the interaction structure between science, business and government. The findings can be used in designing and adjusting regional innovation policy.

Keywords: regional innovation system, structural efficiency, innovation development, institutional environment, triple helix, clusters, technology transfer, regional policy

Submitted 12.12.2025, approved after reviewing 05.02.2026, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Makhosheva S.A., Kumukov A.A. Structural efficiency of regional innovation systems: methodological and institutional-legal foundations. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 266–282. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-266-282

Введение

Современный этап социально-экономического развития характеризуется ускорением технологических изменений, усилением глобальной конкуренции и возрастанием роли знаний как ключевого фактора экономического роста. В этих условиях инновации становятся не просто элементом развития, а системообразующим ресурсом конкурентоспособности территорий. Региональный уровень приобретает особое значение, поскольку именно в пространстве региона формируются устойчивые связи между наукой, бизнесом и государством. Региональные инновационные системы выступают институциональной и организационной основой такого взаимодействия. Их качество определяет способность территорий

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

к долгосрочному росту. При этом в центре внимания все чаще оказывается не столько объем инновационной активности, сколько структура ее организации. Именно структурные характеристики определяют устойчивость инновационного воспроизводства. В условиях фрагментации экономического пространства проблема согласованности элементов РИС приобретает стратегический характер. Это делает исследование структурной эффективности особенно актуальным. В научном и практическом дискурсе она рассматривается как условие перехода к экономике знаний. Усиление межрегиональной дифференциации также требует переосмысления архитектуры инновационных систем. Следовательно, актуальность темы определяется объективными трансформациями пространственной экономики. Она усиливается необходимостью повышения результативности государственной инновационной политики.

В мировой экономической науке формирование концепции инновационных систем связано с работами К. Фримена, Б.-О. Лундваля и Р. Нельсона, заложивших основы системного анализа инновационного развития [1–3]. В дальнейшем региональный аспект был развит в трудах Ф. Кука, Б. Ашейма и А. Изаксена, где региональная инновационная система трактуется как совокупность институтов, генерирующих и распространяющих знания в территориальных границах [4, 5]. Существенный вклад внесла концепция «тройной спирали» Г. Ицковица и Л. Лейдесдорфа, интерпретирующая инновации как результат взаимодействия университета, бизнеса и государства [6]. В исследованиях М. Портера подчеркивается значение кластерной структуры для инновационной конкурентоспособности регионов [7]. В документах ОЭСР инновационные системы рассматриваются как инструмент пространственного развития и технологической модернизации [8]. Российская научная школа представлена трудами С. Ю. Глазьева, Л. Э. Миндели, О. С. Сухарева, А. А. Дынкина, посвященными институциональным и структурным аспектам инновационной экономики. Существенное внимание уделяется проблемам региональной политики в работах А. Г. Гранберга [9] и В. Н. Лексина [10]. Вместе с тем большинство исследований концентрируется на показателях инновационной активности. Недостаточно раскрыта именно структурная логика функционирования РИС. В результате категория структурной эффективности остается методологически разрозненной. Это формирует исследовательский разрыв. Его преодоление требует систематизации существующих подходов.

В прикладных исследованиях региональные инновационные системы анализируются через индексы, рейтинги и индикаторы, разрабатываемые Росстатом, Минэкономразвития и Высшей школой экономики. Они ориентированы на измерение затрат на НИОКР, численности исследователей и объемов инновационной продукции. Однако подобный подход отражает преимущественно количественную сторону процессов. Он слабо фиксирует качество взаимодействий между субъектами инновационной деятельности. Между тем именно согласованность структуры определяет устойчивость инновационного цикла. В исследованиях ОЭСР подчеркивается необходимость учета сетевых связей и институциональной плотности инновационной среды[1]. В работах Б. Ашейма отмечается, что региональные различия обусловлены не только ресурсами, но и архитектурой институтов [5]. Российские авторы также указывают на фрагментарность инновационной инфраструктуры регионов [10]. Тем не менее в научном поле пока не сформирована единая методология оценки структурной эффективности. Это ограничивает возможности управления инновационным развитием. Следовательно, проблема носит как теоретический, так и прикладной характер. Она требует интеграции методологических и институционально-правовых подходов. Это усиливает значимость настоящего исследования.

[1]OECD. Regional Innovation Systems: Policy Options for Regions in the New Economy. Paris: OECD, 1997. 182 p.
OECD. Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow. Paris: OECD Publishing, 2010. 234 p.

Актуальность темы усиливается трансформацией роли государства в инновационной политике. Современные модели регулирования ориентированы не на прямое вмешательство, а на формирование условий для кооперации. В этой связи институционально-правовые механизмы становятся ключевым элементом структурной эффективности. В трудах Д. Норта подчеркивается, что институты задают рамки экономического поведения и снижают трансакционные издержки [13]. Применительно к инновациям это означает необходимость правового обеспечения трансфера технологий и защиты интеллектуальной собственности. В российских условиях данные вопросы регламентируются стратегическими документами пространственного и инновационного развития. Однако между нормами и практикой часто возникает разрыв. Он проявляется в слабой связности науки и производства. Это снижает отдачу от вложений в инновационную сферу. Поэтому исследование институционально-правовых оснований РИС приобретает системное значение. Оно позволяет связать экономические и правовые аспекты развития территорий. В результате формируется комплексный взгляд на эффективность инновационных систем. Именно такой подход положен в основу настоящей статьи.

В контексте пространственной экономики регион выступает не просто административной единицей, а площадкой концентрации знаний, компетенций и сетей взаимодействия. В работах А. Г. Гранберга подчеркивается роль региона как мезоуровня экономического анализа [12]. На этом уровне проявляются эффекты агломерации и кластеризации. Они усиливают инновационную динамику. Однако без структурной согласованности эти эффекты не реализуются. Несбалансированность научного и производственного секторов приводит к утечке знаний. Слабость инфраструктуры препятствует коммерциализации разработок. Недостаток институциональных стимулов снижает мотивацию участников инновационного процесса. Все это формирует структурные деформации РИС. Их преодоление требует научного осмысления. Именно поэтому акцент на структурной эффективности позволяет выйти за рамки традиционных оценок. Он ориентирует исследование на качество организации инновационной деятельности. В этом заключается концептуальная значимость темы.

Целью настоящей статьи является развитие методологических подходов к анализу структурной эффективности региональных инновационных систем и обоснование институционально-правовых механизмов ее обеспечения. Для достижения поставленной цели предполагается решение ряда взаимосвязанных задач. Во-первых, необходимо раскрыть содержание категории «структурная эффективность» применительно к региональным инновационным системам. Во-вторых, требуется систематизировать существующие теоретические подходы к исследованию РИС. В-третьих, важно определить роль институтов и правового регулирования в формировании инновационной структуры региона. В-четвертых, предполагается выделить критерии и показатели структурной эффективности. В-пятых, необходимо обосновать направления совершенствования региональной инновационной политики. Реализация указанных задач позволяет сформировать целостное представление о качестве функционирования РИС. Она обеспечивает связь теории и практики. В результате создается основа для прикладных рекомендаций. Это повышает научную и управленческую значимость исследования.

Методологическую основу статьи составляют системный, институциональный и структурно-функциональный подходы. Системный подход позволяет рассматривать РИС как целостное образование, включающее взаимосвязанные элементы. Институциональный подход ориентирован на анализ правил и норм, определяющих поведение субъектов инновационной деятельности. Структурно-функциональный анализ используется для выявления роли отдельных подсистем в инновационном цикле. В работе применяются методы логического и сравнительного анализа. Используются элементы сетевого анализа для интерпретации взаимодействий акторов. Привлекаются статистические материалы Росстата и аналитические отчеты ОЭСР. Теоретической базой служат труды отечественных и зарубежных ученых. Комплексное использование методов обеспечивает многоаспектность исследования. Оно позволяет соединить экономические и правовые аспекты. В результате достигается высокая объяснительная способность модели анализа РИС.

Информационную базу исследования образуют официальные статистические данные, материалы стратегических документов, а также публикации научных журналов. Используются данные Росстата о научно-исследовательской и инновационной деятельности. Привлекаются обзоры Высшей школы экономики по инновационному развитию регионов. Анализируются рекомендации ОЭСР по формированию инновационной политики. В качестве теоретических источников используются монографии и статьи К. Фримена, Б.-О. Лундваля, Ф. Кука, Г. Ицковица и российских авторов. Такой подход обеспечивает достоверность выводов. Он исключает использование гипотетических или недостоверных данных. Это соответствует требованиям академического исследования. В результате формируется надежная эмпирическая и концептуальная база. Она позволяет интерпретировать процессы развития РИС с высокой степенью обоснованности.

Научная новизна статьи заключается в развитии представления о структурной эффективности как интегральной характеристике качества региональной инновационной системы. В отличие от традиционных оценок акцент делается на согласованности элементов и институциональной плотности взаимодействий. Предлагается интерпретация РИС как структурно организованной сети акторов. Обосновывается необходимость учета правовых механизмов в анализе инновационной структуры. Формируется логика связи между институциональной средой и результативностью инновационного цикла. Уточняются критерии структурной эффективности с позиций системного анализа. Делается попытка синтеза экономических и правовых подходов. Это позволяет расширить методологический инструментарий исследования РИС. В результате статья вносит вклад в развитие теории регионального инновационного развития. Она создает предпосылки для практического применения полученных выводов.

Практическая значимость исследования определяется возможностью использования его результатов в деятельности органов регионального управления. Предложенные подходы могут применяться при разработке стратегий инновационного развития. Они позволяют выявлять структурные диспропорции РИС. Это облегчает формирование адресных мер поддержки. Результаты могут быть использованы в образовательном процессе при подготовке специалистов в области региональной экономики. Материалы статьи могут служить базой для дальнейших эмпирических исследований. Таким образом, введение формирует концептуальную рамку анализа структурной эффективности региональных инновационных систем.

Теоретико-методологические основания исследования

Современное понимание инноваций как эндогенного фактора роста сложилось в рамках эволюционной экономической теории. В отличие от неоклассического подхода инновации трактуются не как внешний шок, а как результат накопления знаний и организационных изменений. В работах Й. Шумпетера инновации впервые были интерпретированы как источник «созидательного разрушения». Его идеи заложили основу для анализа структурных сдвигов в экономике. В дальнейшем эволюционный подход был развит в трудах Р. Нельсона и С. Уинтера, которые показали роль рутин, обучения и институциональной среды в технологической динамике [14]. Для регионального уровня эти положения имеют принципиальное значение, поскольку именно в пространстве региона формируются устойчивые траектории технологического развития. Таким образом, теоретическая рамка исследования исходит из признания инноваций как системного и институционально обусловленного процесса.

Ключевым элементом методологии выступает концепция инновационных систем. Впервые системный характер инновационного развития был обоснован К. Фрименом при анализе японской модели технологического роста [1]. В его интерпретации инновации возникают в результате взаимодействия фирм, научных организаций и государства. Б.-О. Лундвалль развил эти идеи, введя понятие национальной инновационной системы как совокупности институтов, участвующих в создании и распространении знаний [2]. Р. Нельсон показал многообразие национальных моделей инновационного развития и роль государственной политики в их формировании [3]. Эти подходы заложили методологический

фундамент для исследования инноваций как сетевого процесса. Они позволяют рассматривать инновационную деятельность не фрагментарно, а как целостную структуру. Для настоящего исследования принципиально важно, что инновационная система понимается как совокупность взаимосвязанных элементов. Именно структура этих связей определяет результативность инновационного воспроизводства.

Региональный уровень анализа был концептуализирован в работах Ф. Кука, который ввел понятие региональной инновационной системы как подсистемы национальной инновационной системы [4]. Он показал, что регионы различаются не только ресурсами, но и институциональной архитектурой. Б. Ашейм и А. Изаксен дополнили этот подход, выделив типы региональных инновационных систем в зависимости от характера знаний и отраслевой специализации [5]. Они показали, что инновационная динамика определяется плотностью взаимодействий между бизнесом, наукой и инфраструктурой. В региональном контексте особенно важны неформальные институты и локальные сети. Эти положения позволяют рассматривать РИС как пространственно локализованную форму организации инновационного процесса. В рамках настоящего исследования они используются для интерпретации структуры РИС как системы устойчивых взаимодействий. Это задает логику анализа структурной эффективности.

Существенное место в методологии занимает концепция «тройной спирали», разработанная Г. Ицковицем и Л. Лейдесдорфом [6]. В ее рамках инновационное развитие рассматривается как результат коэволюции университета, бизнеса и государства. Каждый из этих акторов выполняет не только традиционные, но и гибридные функции. Университет становится предпринимательским, бизнес участвует в генерации знаний, государство формирует институциональные условия. Данная модель позволяет анализировать не отдельные элементы РИС, а их взаимное проникновение. Для исследования структурной эффективности это особенно важно, поскольку речь идет о согласованности функций и ролей. Нарушение баланса между элементами «спирали» приводит к снижению результативности инновационного цикла. Следовательно, концепция тройной спирали используется как инструмент анализа институциональной структуры региона.

Важным методологическим источником является теория кластеров М. Портера [7]. Он показал, что конкурентоспособность территорий формируется через концентрацию взаимосвязанных фирм, научных центров и инфраструктуры. Кластеры усиливают инновационную активность за счет эффектов агломерации и обмена знаниями. В региональной экономике кластерный подход стал одним из базовых инструментов инновационной политики. Однако для настоящего исследования важно не только наличие кластеров, но и их структурная интеграция в РИС. Кластер выступает элементом инновационной системы, а не изолированной формой организации. Это позволяет анализировать структурную эффективность через степень встроенности кластеров в региональную архитектуру инноваций. Таким образом, кластерная теория дополняет системный подход.

Методологическое значение имеет институциональная экономическая теория. В работах Д. Норта институты рассматриваются как правила игры, формирующие стимулы экономических агентов [8]. Институциональная среда определяет уровень трансакционных издержек и возможности кооперации. Применительно к инновациям это означает, что без адекватных правовых и организационных механизмов инновационная активность не воспроизводится устойчиво. В российских исследованиях О. С. Сухарев подчеркивает роль институциональных изменений в технологическом развитии экономики [11]. Л. Э. Миндели анализирует институциональные ограничения инновационной деятельности в регионах [12]. Эти подходы позволяют связать структуру РИС с правовым и нормативным контекстом. В рамках настоящего исследования институциональный подход используется для анализа согласованности формальных и неформальных правил в инновационной системе региона.

Значимое место в теоретической базе занимают пространственная экономика и регионалистика. В трудах А. Г. Гранберга регион рассматривается как мезоуровень анализа, на

котором проявляются специфические закономерности развития [12]. Он показал, что пространственная организация экономики влияет на распределение инновационного потенциала. В работах В. Н. Лексина [10] и А. Н. Швецова [15] подчеркивается роль региональной политики в формировании условий инновационного роста. Эти исследования позволяют интерпретировать РИС как элемент пространственного развития. Структура инновационной системы определяется не только экономическими, но и территориальными факторами. Это особенно важно для оценки структурной эффективности, поскольку пространственная разобщенность элементов снижает интенсивность взаимодействий. Следовательно, пространственный подход интегрируется в методологию исследования.

С точки зрения методов анализа РИС важную роль играет системный подход. Он предполагает рассмотрение инновационной системы как целостного образования с входами, выходами и внутренними связями. В рамках системного анализа выявляются функции элементов и характер их взаимодействий. Для оценки структурной эффективности используется структурно-функциональный метод. Он позволяет определить, насколько полно реализуются функции генерации знаний, трансфера, коммерциализации и диффузии инноваций. Дополнительно применяется сетевой подход, ориентированный на анализ плотности и направленности связей между акторами. В зарубежных исследованиях сетевой анализ активно используется для оценки инновационных экосистем. Он позволяет перейти от количественных показателей к качеству взаимодействий. В настоящей работе данные методы используются в логико-аналитической форме.

Теоретико-методологические основания исследования опираются на интеграцию эволюционной теории, концепции инновационных систем, институциональной экономики и регионалистики. В центре внимания находится структура как форма организации инновационного процесса. Использование системного, институционального, сетевого и индикаторного подходов позволяет рассматривать РИС как многоуровневую и динамичную систему. Это создает основу для анализа структурной эффективности не как частного показателя, а как интегральной характеристики качества функционирования региональной инновационной системы. Сформированная методология обеспечивает научную обоснованность дальнейшего исследования.

Сущность и критерии структурной эффективности РИС

Понятие структурной эффективности региональной инновационной системы (РИС) формируется на пересечении системного, институционального и регионально-экономического подходов. В классических работах по инновационным системам подчеркивается, что инновации возникают не как сумма разрозненных действий, а как результат взаимодействия множества акторов [1–3]. Следовательно, эффективность РИС не может оцениваться исключительно через объемы затрат на НИОКР или выпуск инновационной продукции. Существенное значение приобретает конфигурация связей между элементами системы. Именно структура определяет способность региона обеспечивать непрерывность инновационного цикла. В документах ОЭСР инновационная система трактуется как сеть институтов, создающих, распространяющих и использующих знания[2]. Такая трактовка переносит акцент с отдельных субъектов на их взаимосвязи. В региональном контексте это означает необходимость анализа пропорций между наукой, бизнесом, инфраструктурой и государственным управлением. Структурная эффективность отражает не только наличие элементов, но и качество их согласованности. Она проявляется в устойчивости потоков знаний,

[2]OECD. Regional Innovation Systems: Policy Options for Regions in the New Economy. Paris: OECD, 1997. 182 p.
OECD. Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow. Paris: OECD Publishing, 2010. 234 p.

технологий и ресурсов. Тем самым структурная эффективность выступает интегральной характеристикой организации инновационного процесса на территории.

С теоретической точки зрения категория структуры восходит к системному анализу, где система рассматривается как совокупность элементов и отношений между ними. Применительно к инновациям эта логика развита в работах Р. Нельсона и С. Уинтера, показавших, что технологическая динамика определяется не только ресурсами, но и устойчивыми рутинами и институциональными связями [14]. В региональных инновационных системах данные связи приобретают пространственную форму. Ф. Кук подчеркивает, что РИС функционирует как территориально локализованная сеть организаций и институтов [4]. Б. Ашейм показывает, что различия в развитии регионов объясняются типами знаний и архитектурой взаимодействий [5]. Следовательно, структура РИС – это не просто набор организаций, а способ их координации. Эффективность в данном случае определяется тем, насколько эта координация способствует трансформации знаний в экономические результаты. Если структура фрагментирована, инновационный цикл разрывается. Если же структура интегрирована, возникает эффект синергии. Именно этот эффект лежит в основе понятия структурной эффективности.

Важным элементом интерпретации структурной эффективности является модель «тройной спирали». Г. Ицковиц и Л. Лейдесдорф рассматривают инновационное развитие как процесс коэволюции университета, бизнеса и государства [6]. Каждая подсистема выполняет как собственные, так и взаимодополняющие функции. Университеты участвуют в предпринимательской активности, бизнес вовлекается в генерацию знаний, государство формирует условия для кооперации. Структурная эффективность РИС в этом контексте проявляется в балансе ролей и интенсивности взаимодействий между элементами спирали. Доминирование одного сектора при слабости других приводит к институциональным перекосам. Например, сильная наука при слабом бизнесе не обеспечивает коммерциализации разработок. Напротив, развитый бизнес без исследовательской базы снижает технологическую устойчивость региона. Следовательно, критерий сбалансированности является ключевым для оценки структурной эффективности. Он отражает согласованность функций в инновационном цикле.

Существенное значение для раскрытия сущности структурной эффективности имеет кластерная теория М. Портера. В его работах показано, что конкурентоспособность территорий формируется через концентрацию взаимосвязанных фирм, научных центров и инфраструктуры [7]. Кластеры усиливают инновационную активность за счет обмена знаниями и снижения трансакционных издержек. Однако для РИС важно не только наличие кластеров, но и их включенность в общую инновационную архитектуру региона. Кластер, изолированный от научной и институциональной среды, не формирует системного эффекта. Поэтому структурная эффективность предполагает функциональную интеграцию кластеров в РИС. Она выражается в плотности кооперационных связей, совместных проектах и институциональной поддержке. В этом контексте критерий сетевой связности приобретает особую значимость. Он отражает способность системы генерировать коллективные инновационные результаты.

Институциональный подход позволяет дополнить анализ структурной эффективности правовым и нормативным измерением. В работах Д. Норта подчеркивается, что институты формируют стимулы и ограничения экономического поведения [13]. Применительно к РИС это означает, что структура инновационной системы определяется не только экономическими, но и правовыми механизмами. Защита интеллектуальной собственности, правила трансфера технологий, формы государственно-частного партнерства задают рамки взаимодействия акторов. О. С. Сухарев указывает, что институциональные дисфункции способны блокировать технологическое развитие даже при наличии ресурсов [11]. Л. Э. Миндели отмечает, что слабость институциональной среды регионов снижает отдачу от инновационных инвестиций [10]. Следовательно, одним из критериев структурной эффективности выступает институциональная согласованность. Она проявляется в соответствии формальных правил реальным практикам инновационной деятельности. Без такого соответствия структура РИС теряет устойчивость.

С методологической точки зрения структурная эффективность может быть интерпретирована через функциональную полноту инновационного цикла. В рекомендациях ОЭСР подчеркивается, что инновационная система должна обеспечивать генерацию знаний, их трансфер, коммерциализацию и диффузию[3]. Каждая из этих стадий требует специфических институтов и инфраструктуры. Если в структуре РИС отсутствует хотя бы одно звено, инновационный процесс становится разорванным. Например, наличие исследовательских организаций без механизмов внедрения приводит к накоплению невостребованных разработок. Поэтому критерий функциональной замкнутости является базовым. Он показывает, в какой мере структура РИС обеспечивает непрерывность инновационного воспроизводства. Дополнительно используется критерий адаптивности, отражающий способность системы перестраиваться под технологические изменения. В условиях ускоренной цифровизации этот аспект приобретает особую значимость.

В практическом анализе структурная эффективность должна дополняться измеримыми параметрами. В исследованиях Высшей школы экономики по инновационному развитию регионов России используются показатели взаимодействия науки и бизнеса, развитости инфраструктуры и коммерциализации результатов НИОКР[4] [13]. Росстат публикует данные о затратах на технологические инновации, численности исследователей и объемах инновационной продукции[5] [16]. Однако в рамках структурного подхода данные индикаторы интерпретируются не изолированно, а во взаимосвязи. Например, расходы на НИОКР сопоставляются с числом внедренных разработок. Численность персонала анализируется через участие в кооперационных проектах. Таким образом формируется критерий пропорциональности структуры. Он отражает соответствие ресурсов и результатов. В совокупности критерии сбалансированности, сетевой связности, институциональной согласованности, функциональной полноты, адаптивности и пропорциональности образуют концептуальную основу оценки структурной эффективности РИС.

В итоге сущность структурной эффективности региональной инновационной системы заключается в способности ее архитектуры обеспечивать устойчивое воспроизводство инноваций за счет согласованности элементов, плотности взаимодействий и институциональной поддержанности процессов. В отличие от традиционных показателей инновационной активности структурная эффективность ориентирована на качество организации системы. Она позволяет выявлять скрытые деформации РИС, не фиксируемые агрегированными статистическими индикаторами. Теоретическое осмысление данной категории опирается на эволюционную теорию, концепцию инновационных систем, модель тройной спирали, кластерный и институциональный подходы. Сформулированные критерии создают методологическую основу для последующего анализа и разработки управленческих решений в сфере региональной инновационной политики.

Институционально-правовые основания развития РИС

Институционально-правовые основания развития региональных инновационных систем (РИС) формируют нормативную и организационную среду, в рамках которой осуществляется взаимодействие акторов инновационного процесса. В современной экономической теории институты трактуются как совокупность формальных правил и неформальных ограничений,

[3]OECD. Regional Innovation Systems: Policy Options for Regions in the New Economy. Paris: OECD, 1997. 182 p. OECD. Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow. Paris: OECD Publishing, 2010. 234 p.

[4]Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации / под ред. Л. М. Гохберга. М.: НИУ ВШЭ, 2023. 276 с.

[5]Регионы России. Социально-экономические показатели. 2025: Стат. сб. / Росстат. М., 2025. 1035. https://www.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2025.pdf (дата обращения: 10.11.2025)

определяющих поведение экономических агентов. Такое понимание получило развитие в работах Д. Норта, где подчеркивается роль институтов в снижении неопределенности и трансакционных издержек [13]. Применительно к инновационной сфере это означает, что качество правового регулирования напрямую влияет на интенсивность генерации и коммерциализации знаний. Инновации требуют высокой степени доверия между участниками. Они также предполагают защиту результатов интеллектуальной деятельности. Без адекватных правовых механизмов инновационная активность не воспроизводится устойчиво. Поэтому институциональная среда является базовым условием структурной эффективности РИС. Она определяет рамки кооперации науки, бизнеса и государства. В этом контексте анализ институционально-правовых оснований позволяет связать экономическую структуру региона с механизмами регулирования. Тем самым формируется целостное представление о развитии РИС.

Существенный вклад в формирование подходов к инновационной политике вносит Организация экономического сотрудничества и развития. В документах ОЭСР инновационные системы рассматриваются как объект целенаправленного государственного регулирования, ориентированного на создание условий для сетевого взаимодействия[6]. Подчеркивается, что современная политика должна быть направлена не столько на прямое финансирование, сколько на формирование институтов сотрудничества. В обзорах ОЭСР по инновационной политике России акцентируется необходимость усиления связей между исследовательским сектором и бизнесом, а также развития регионального измерения инноваций [17]. Эти положения имеют принципиальное значение для РИС, поскольку именно на региональном уровне реализуются эффекты локализации знаний. Институционально-правовая среда региона должна быть согласована с национальной инновационной стратегией. При этом она должна учитывать специфику территориальной структуры экономики. Таким образом, рекомендации ОЭСР задают рамку для интерпретации институциональных оснований развития РИС.

В российской практике правовое обеспечение инновационной деятельности базируется на ряде федеральных нормативных актов. Базовым документом является Федеральный закон № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике»[7], определяющий принципы организации научной и инновационной деятельности. Он закрепляет формы поддержки исследований, механизмы финансирования и права участников инновационного процесса. Существенное значение имеет часть IV Гражданского кодекса Российской Федерации, регламентирующая охрану интеллектуальной собственности[8]. Она задает правовые условия коммерциализации результатов НИОКР. Дополнительно функционирование инновационной инфраструктуры обеспечивается Федеральным законом № 216-ФЗ «Об инновационном центре „Сколково“»[9], который создает особый правовой режим для технологических проектов. Эти акты формируют нормативный каркас РИС. Они задают формальные правила взаимодействия науки, бизнеса и государства. Следовательно, структурная эффективность РИС во многом определяется качеством правоприменения данных норм на региональном уровне.

Стратегическое измерение институционально-правового обеспечения РИС связано с документами долгосрочного развития. В России к таким документам относится Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ № 2227-р[10]. В ней определены приоритеты технологической модернизации, развитие человеческого капитала и стимулирование кооперации

[6]OECD. Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow. Paris: OECD Publishing, 2010. 234 p.
OECD. Regional Innovation Systems: Policy Options for Regions in the New Economy. Paris: OECD, 1997. 182 p.

[7]Федеральный закон «О науке и государственной научно-технической политике»: Федер. закон Рос. Федерации от 23.08.1996 № 127-ФЗ (ред. действующая).

[8]Гражданский кодекс Российской Федерации (часть четвертая) от 18.12.2006 № 230-ФЗ (ред. действующая).

[9]О проекте «Сколково»: Федер. закон Рос. Федерации от 28.09.2010 № 244-ФЗ (ред. действующая).

[10]Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 08.12.2011 № 2227-р.

науки и бизнеса. Существенное значение имеет также Стратегия пространственного развития Российской Федерации до 2025 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ № 207-р[11]. В этом документе подчеркивается роль регионов как центров концентрации инновационного потенциала. Он ориентирует политику на снижение территориальных диспропорций. В совокупности данные стратегии формируют институциональные ориентиры развития РИС. Они задают цели, инструменты и механизмы координации на разных уровнях управления. Для структурной эффективности важно, чтобы стратегические установки реализовывались через региональные программы и нормативные акты. Несогласованность стратегий и практики снижает результативность инновационной политики.

Значимым элементом институциональной среды РИС выступают механизмы трансфера технологий. В международной практике ключевым примером является закон Байя–Доула в США (Bayh–Dole Act, 1980), закрепивший права университетов на результаты исследований, финансируемых государством. Его принятие существенно усилило коммерциализацию научных разработок. Этот опыт активно анализируется в работах Г. Ицковица при изучении предпринимательского университета [6]. В российском контексте аналогичную функцию выполняют центры трансфера технологий, бизнес-инкубаторы и технопарки. Их деятельность регламентируется подзаконными актами и региональными программами поддержки инноваций. Эффективность данных институтов зависит от правовой определенности процедур передачи прав на результаты НИОКР. При слабой регламентации возрастает неопределенность и снижается мотивация участников. Поэтому критерий институциональной определенности трансфера технологий является важным для оценки структурной эффективности РИС.

Финансово-правовые механизмы также входят в институциональные основания развития РИС. Государственная поддержка инноваций осуществляется через гранты, субсидии, венчурные фонды и механизмы государственно-частного партнерства. В аналитических докладах Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ подчеркивается роль региональных инструментов финансирования инноваций. Они позволяют учитывать специфику территорий и стимулировать локальные проекты. Однако эффективность таких инструментов зависит от прозрачности процедур и стабильности нормативной базы. При частой смене правил инвестиционные риски возрастают. Это снижает структурную устойчивость РИС. Следовательно, одним из институциональных критериев является предсказуемость и согласованность финансово-правового регулирования инновационной деятельности.

Особое значение для развития РИС имеет согласование формальных и неформальных институтов. Формальные нормы задаются законами и стратегиями. Неформальные институты проявляются в практике взаимодействия, уровне доверия и культуре кооперации. В региональных исследованиях ВШЭ подчеркивается, что даже при наличии развитой инфраструктуры слабость сетевых коммуникаций ограничивает инновационный эффект[12] [13]. Это означает, что институционально-правовая среда должна дополняться мерами по развитию партнерств, кластерных инициатив и совместных проектов. Таким образом, институциональные основания развития РИС выходят за рамки сугубо юридического регулирования. Они включают организационные и социальные механизмы кооперации. В этом проявляется комплексный характер институциональной поддержки инноваций.

В итоге институционально-правовые основания развития региональных инновационных систем формируют фундамент их структурной эффективности. Они обеспечивают защиту интеллектуальной собственности, регламентацию трансфера технологий, стратегическую

[11]Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 13.02.2019 № 207-р.

[12]Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации / под ред. Л. М. Гохберга. М.: НИУ ВШЭ, 2023. 276 с.

координацию и финансовое сопровождение инновационной деятельности. Опора на рекомендации ОЭСР, нормы федерального законодательства и стратегические документы пространственного и инновационного развития позволяет рассматривать РИС как объект целенаправленной политики. Качество институтов определяет плотность взаимодействий и устойчивость инновационного цикла. Следовательно, развитие РИС требует не только наращивания ресурсов, но и совершенствования институционально-правовой архитектуры региона. Именно через нее обеспечивается согласованность элементов инновационной системы и ее способность к долгосрочному развитию.

Методические подходы к оценке структурной эффективности

Оценка структурной эффективности региональных инновационных систем (РИС) требует перехода от традиционного измерения инновационной активности к анализу качества организации инновационного процесса. В международной практике подчеркивается, что простая фиксация затрат на НИОКР или выпуск инновационной продукции не отражает реальной способности территории к воспроизводству знаний. В методологии ОЭСР инновационная система трактуется как совокупность ресурсов, процессов и результатов, связанных устойчивыми взаимодействиями[13]. Следовательно, объектом оценки становится не отдельный показатель, а архитектура связей между элементами РИС. Структурная эффективность в этом контексте интерпретируется как способность системы обеспечивать непрерывный инновационный цикл. Это предполагает учет пропорциональности элементов, плотности сетевых коммуникаций и институциональной согласованности. Методический инструментарий должен фиксировать именно эти характеристики. Поэтому оценка РИС требует комплексного и многомерного подхода. Он должен объединять статистический, структурно-функциональный и институциональный анализ. Такой синтез позволяет перейти от описания к интерпретации механизмов развития.

Базовым элементом методики выступает индикаторный подход, используемый в аналитических докладах ОЭСР и НИУ ВШЭ. В исследованиях Института статистических исследований и экономики знаний предлагается система показателей, отражающих ресурсы, процессы и результаты инновационной деятельности регионов[14] [13]. К ресурсным индикаторам относятся расходы на НИОКР, численность исследователей, уровень подготовки кадров. Процессные индикаторы фиксируют взаимодействие науки и бизнеса, участие организаций в совместных проектах, развитие инфраструктуры. Результативные индикаторы включают объем инновационной продукции, число патентов и внедренных разработок. Однако в рамках структурного подхода данные показатели анализируются во взаимосвязи. Например, сопоставляется объем НИОКР с уровнем коммерциализации. Это позволяет выявлять диспропорции структуры РИС. Следовательно, индикаторный подход приобретает аналитический, а не описательный характер.

Существенную роль в оценке структурной эффективности играет структурно-функциональный анализ. Он ориентирован на выявление полноты реализации функций инновационного цикла. В документах ОЭСР подчеркивается необходимость оценки стадий генерации знаний, трансфера технологий, коммерциализации и диффузии инноваций[15]. Каждая стадия требует наличия специфических институтов и инфраструктуры. Методически это реализуется через сопоставление исследовательского потенциала региона с

[13]OECD. Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow. Paris: OECD Publishing, 2010. 234 p.

[14]OECD. Regional Innovation Systems: Policy Options for Regions in the New Economy. Paris: OECD, 1997. 182 p.

Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации / под ред. Л. М. Гохберга. М.: НИУ ВШЭ, 2023. 276 с.

OECD. Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow. Paris: OECD Publishing, 2010. 234 p.

[15]OECD. Regional Innovation Systems: Policy Options for Regions in the New Economy. Paris: OECD, 1997. 182 p.

возможностями внедрения разработок. Например, высокая концентрация вузов без развитых механизмов трансфера свидетельствует о структурном разрыве. Структурно-функциональный анализ позволяет выявлять такие «узкие места». Он показывает, какие элементы системы не обеспечивают воспроизводство инноваций. В результате формируется представление о функциональной замкнутости РИС. Это является ключевым параметром структурной эффективности.

Перспективным направлением является применение сетевого подхода к оценке РИС. В зарубежных исследованиях инновационные системы интерпретируются как сети взаимодействий между организациями. Плотность и направленность связей определяют скорость распространения знаний. В работах Б. Ашейма подчеркивается значение локальных сетей для регионального развития [5]. Методически сетевой анализ предполагает изучение кооперационных проектов, партнерств, кластерных инициатив. В практическом измерении используются данные о совместных НИОКР, консорциумах, участии в технологических платформах. Чем выше плотность связей, тем выше структурная эффективность. Сетевой подход позволяет перейти от агрегированных показателей к анализу реального взаимодействия акторов. Он особенно важен для оценки согласованности науки, бизнеса и государства. Тем самым обеспечивается качественное измерение архитектуры РИС.

Значимое место в методике занимает институциональная диагностика. В ее основе лежит анализ соответствия формальных правил и фактических практик инновационной деятельности. В институциональной теории Д. Норта подчеркивается, что эффективность экономики определяется качеством институтов [13]. Применительно к РИС это означает необходимость оценки правового обеспечения трансфера технологий, защиты интеллектуальной собственности и механизмов поддержки инноваций. Методически это реализуется через анализ региональных программ, нормативных актов и инструментов финансирования. Сопоставляются заявленные меры поддержки и реальные результаты. Если институты не обеспечивают стимулы к кооперации, структура РИС теряет устойчивость. Следовательно, институциональная диагностика позволяет выявлять латентные ограничения инновационного развития. Она дополняет количественные методы качественной интерпретацией.

В рамках методики оценки структурной эффективности используется сравнительный анализ. В рекомендациях ОЭСР подчеркивается, что инновационная политика должна учитывать территориальные различия[16]. Сравнение регионов позволяет выявлять типовые модели РИС и структурные деформации. Методически сопоставляются показатели ресурсов, процессов и результатов, а также архитектура институтов. Это дает возможность выделять группы регионов с различным уровнем структурной зрелости инновационной системы. Сравнительный анализ позволяет не только ранжировать территории, но и объяснять причины различий. Он ориентирован на выявление факторов устойчивости инновационного развития. В результате формируется база для типологизации РИС. Это усиливает прикладную направленность методики.

Дополнительно применяется метод пропорционального анализа структуры. Он ориентирован на выявление соответствия между элементами РИС. Например, сопоставляются численность исследователей и объем внедренных разработок, расходы на НИОКР и выпуск инновационной продукции, развитие инфраструктуры и интенсивность кооперации. В исследованиях ВШЭ подчеркивается, что несоответствие ресурсов и результатов свидетельствует о структурных дисбалансах [13]. Методически это реализуется через коэффициенты

[16]OECD. Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow. Paris: OECD Publishing, 2010. 234 p.

соотношений и динамический анализ. Такой подход позволяет фиксировать не только уровень, но и качество использования потенциала региона. Пропорциональный анализ усиливает диагностическую функцию методики оценки. Он позволяет выявлять неэффективную конфигурацию элементов РИС.

В совокупности методические подходы к оценке структурной эффективности РИС включают индикаторный, структурно-функциональный, сетевой, институциональный, сравнительный и пропорциональный анализ. Их интеграция позволяет рассматривать инновационную систему как целостную и динамичную структуру. В отличие от традиционных рейтингов, ориентированных на количественные параметры, структурный подход фокусируется на качестве организации инновационного процесса. Он выявляет согласованность элементов, плотность взаимодействий и институциональную устойчивость. Это создает основу для разработки адресных управленческих решений в сфере региональной инновационной политики. Таким образом, методика оценки структурной эффективности становится инструментом не только анализа, но и стратегического управления развитием РИС.

Заключение

Проведенное исследование позволило систематизировать теоретические, методологические и институционально-правовые основания анализа структурной эффективности региональных инновационных систем. В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на количественные параметры инновационной активности, в статье обоснована необходимость рассмотрения РИС как сложной пространственно локализованной архитектуры взаимодействий науки, бизнеса, государства и инновационной инфраструктуры. Такой подход позволяет перейти от оценки объемов инноваций к анализу качества организации инновационного процесса. В центре внимания оказывается не столько уровень затрат на НИОКР, сколько способность региона обеспечивать непрерывность инновационного цикла и устойчивую трансформацию знаний в социально-экономические результаты.

В работе показано, что теоретической основой исследования структурной эффективности выступают эволюционная теория инноваций, концепция инновационных систем, модель «тройной спирали», кластерный и институциональный подходы. Их интеграция позволяет интерпретировать региональную инновационную систему как динамичную сеть взаимодействий, в которой ключевую роль играет согласованность функций и институтов. Обосновано, что структура РИС формируется не только экономическими ресурсами, но и качеством институциональной среды, уровнем кооперации и плотностью сетевых коммуникаций. Тем самым подтверждается вывод о том, что инновационное развитие территорий носит системный и институционально обусловленный характер.

Содержательный анализ сущности структурной эффективности позволил определить ее как интегральную характеристику способности архитектуры РИС обеспечивать устойчивое воспроизводство инноваций за счет сбалансированности элементов, функциональной полноты инновационного цикла, сетевой связности и институциональной согласованности. В отличие от показателей инновационной активности структурная эффективность отражает внутреннюю логику организации системы. Показано, что диспропорции между научным, производственным и инфраструктурным секторами приводят к разрывам инновационного цикла и снижению отдачи от инвестиций в НИОКР. Следовательно, повышение эффективности РИС требует не только наращивания ресурсов, но и целенаправленной оптимизации структуры взаимодействий.

Особое место в исследовании занимает институционально-правовой контур развития региональных инновационных систем. Обосновано, что качество правового регулирования, защита интеллектуальной собственности, механизмы трансфера технологий и финансовой поддержки определяют плотность и устойчивость инновационных связей. Для Российской Федерации это имеет принципиальное значение в условиях высокой межрегиональной дифференциации инновационного потенциала. Несмотря на наличие стратегических документов и федерального законодательства, в ряде регионов сохраняется разрыв между формальными нормами и практикой кооперации науки и бизнеса. Это проявляется в слабой коммерциализации результатов исследований, фрагментарности инфраструктуры и недостаточной интеграции кластеров в региональные инновационные системы.

С управленческой точки зрения результаты исследования позволяют сформулировать ряд приоритетных направлений развития РИС в российских регионах. Во-первых, региональная инновационная политика должна быть переориентирована с поддержки отдельных проектов на формирование целостной архитектуры взаимодействий. Это предполагает развитие сетевых форм кооперации, поддержку совместных НИОКР, консорциумов и технологических платформ. Во-вторых, требуется усиление институтов трансфера технологий при университетах и научных организациях, а также их интеграция с региональными кластерами. Во-третьих, необходимо повышение согласованности региональных программ с федеральными стратегическими документами, что позволит снизить институциональные разрывы и дублирование мер поддержки.

В-четвертых, для повышения структурной эффективности РИС целесообразно развивать механизмы государственно-частного партнерства и региональные инструменты венчурного финансирования с учетом отраслевой специализации территорий. Во-пятых, важным направлением является формирование человеческого капитала для инновационной экономики, включая поддержку мобильности исследователей, развитие предпринимательских компетенций в университетах и вовлечение молодежи в инновационную деятельность. Реализация данных мер позволяет повысить не только инновационную активность, но и качество организации инновационного процесса в регионах.

Методические подходы к оценке структурной эффективности РИС, разработанные в статье, ориентированы на использование данных Росстата и аналитических материалов НИУ ВШЭ[17] в сочетании со структурно-функциональным, сетевым и институциональным анализом. Такой инструментарий позволяет органам управления выявлять латентные деформации инновационных систем, оценивать пропорциональность ресурсов и результатов, а также диагностировать слабые звенья инновационного цикла. Это превращает оценку РИС в элемент стратегического управления пространственным развитием, а не только в инструмент мониторинга.

Перспективы дальнейших исследований связаны с эмпирической апробацией предложенной методологии на материале конкретных субъектов Российской Федерации, использованием эконометрических и сетевых методов, а также расширением сравнительных исследований с учетом международного опыта. Углубление анализа структурной эффективности позволит уточнить типологию региональных инновационных систем и разработать более адресные инструменты государственной политики. В целом результаты исследования подтверждают, что именно качество структуры и институтов, а не только объем ресурсов определяет долгосрочную конкурентоспособность российских регионов в экономике знаний.

[17]Российский статистический ежегодник. 2023: стат. сб. М.: Росстат, 2023. 701 с.

О науке и государственной научно-технической политике: Федер. закон Рос. Федерации от 23.08.1996. № 127-ФЗ (ред. действующая).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Freeman Ch. The economics of industrial innovation. 2nd ed. London: Pinter, 1982. 250 p.

2. Lundvall, Bengt-Ake, ed. National systems of innovation: toward a theory of innovation and interactive learning. Anthem Press, 2010. http://www.jstor.org/stable/j.ctt1gxp7cs

3. Nelson R.R. National innovation systems: a comparative analysis. New York: Oxford University Press, 1993. 541 p.

4. Cooke P. Regional innovation systems: competitive regulation in the New Europe. *Geoforum*. 1992. Vol. 23. No. 3. Pp. 365–382.

5. Asheim B., Gertler M. The geography of innovation: regional innovation systems. *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford: Oxford University Press, 2005. Pp. 291–317.

6. Etzkowitz H., Leydesdorff L. The Triple Helix – university–industry–government relations: A Laboratory for knowledge based economic development. *EASST Review*. 1995. Vol. 14. No. 1. Pp. 14–19.

7. Porter M.E. The competitive advantage of nations. New York: Free Press, 1990. 855 p.

8. North D.C. Institutions, institutional change and economic performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 159 p.

9. *Гранберг А. Г.* Движение регионов России к инновационной экономике. М., 2006.

Granberg A.G. *Dvizheniye regionov Rossii k innovatsionnoy ekonomike* [The movement of russian regions toward an innovative economy]. Moscow, 2006. (In Russian)

10. *Лексин В. Н., Швецов А. Н. и др.* Региональная политика России: концепции, проблемы, решения: серия: в 10 кн. Проект «Социал. последствия экон. реформ и приватизации в РФ» М.: УРСС, 1999. 21 см. Кн. 3: Новые проблемы российских городов: муниципализация социал. объектов: правовые и фин. решения. 1999. 254 с. ISBN 5-88417-165-X

Leksin V.N., Shvetsov A.N. et al. *Regional'naya politika Rossii: kontseptsii, problemy, resheniya: seriya: v 10 kn* [Regional policy of Russia: concepts, problems, solutions: series: in 10 books]. Project "Social consequences of economic reforms and privatization in the Russian Federation" Moscow: URSS, 1999. 21 cm. Book 3: New problems of Russian cities: municipalization of social facilities: legal and financial solutions. 1999. 254 p. ISBN 5-88417-165-X. (In Russian)

11. *Сухарев О. С.* Инвестиции в экономический рост и структурную трансформацию России. Финансы: теория и практика. 2025. № 29(2). С. 181–193. DOI: 10.26794/2587-5671-2025-29-2-181-193

Sukharev O.S. Investments in economic growth and structural transformation of Russia. *Finansy: teoriya i praktika* [Finance: Theory and Practice]. 2025. No. 29(2). Pp. 181–193. DOI: 10.26794/2587-5671-2025-29-2-181-193. (In Russian)

12. *Миндели Л. Э., Черных С. И. и др.* Российская наука и ее ресурсное обеспечение: инновационная парадигма. М.: Ин-т проблем развития науки РАН, 2016. 260 с. https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1770896474&tld (дата обращения: 12.12.2025)

Mindeli L.E., Chernykh S.I. et al. *Rossiyskaya nauka i yeye resursnoye obespecheniye: innovatsionnaya paradigma* [Russian science and its resource support: an innovative paradigm]. Moscow: In-t problem razvitiya nauki RAN, 2016. 260 p. https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1770896474&tld (accessed: 12/12/2025). (In Russian)

13. Индикаторы инновационной деятельности: статистический сборник. М.: НИУ ВШЭ, 2023. 356 с.

Indikatory innovatsionnoy deyatel'nosti: statisticheskiy sbornik [Innovation Activity Indicators: a statistical digest]. Moscow: National Research University Higher School of Economics, 2023. 356 p. (In Russian)

14. Эволюционная экономика Нельсона и Уинтера // Образовательный портал «Справочник». Дата последнего обновления статьи: 01.11.2025. URL: https://spravochnick.ru/ekonomika/evolyucionnaya_ekonomika_nelsona_i_uintera/ (дата обращения: 12.12.2025).

Nelson and Winter's evolutionary economics. *Obrazovatel'nyy portal «Spravochnik»* [Educational Portal “Handbook”]. Last updated: 1/11/2025. URL: https://spravochnick.ru/ekonomika/evolyucionnaya_ekonomika_nelsona_i_uintera/ (accessed: 12/12/2025). (In Russian)

15. *Швецов А. Н.* Российское пространство: исторические особенности обретения и основное противоречие его современной организации // Федерализм. 2020. № 3. С. 5–18. DOI: 10.21686/2073-1051-2020-3-5-18

Shvetsov A.N. Russian space: historical features of its acquisition and the main contradiction of its modern organization. *Federalizm*. 2020. No. 3. Pp. 5–18. DOI: 10.21686/2073-1051-2020-3-5-18. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Махошева Салима Александровна, д-р экон. наук, профессор, зав. отделом «Экономика знаний и опережающее региональное развитие», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

salima@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4249-9906, SPIN-код: 8414-5036

Кумуков Амирхан Азноровичч, аспирант, Научно-образовательный центр, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

amirkum07@gmail.com

Information about the authors

Salima A. Makhosheva, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department “Knowledge Economy and Advanced Regional Development”, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

salima@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4249-9906, SPIN-code: 8414-5036

Amirkhan A. Kumukov, Postgraduate Student, Scientific and Educational Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia;

amirkum07@gmail.com

ФИЛОЛОГИЯ

УДК 821.351.12 Научная статья
https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-1-283-292
YJXQVX

Метафорические эпитеты в поэзии Расула Гамзатова

М. Н. Набигулаева

Институт языка, литературы и искусства имени Г. Цадасы
Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН
367000, Россия, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 45

Аннотация. Актуальность исследования заключается в недостаточном описании особенностей функционирования метафорических эпитетов в поэзии Р. Гамзатова, в необходимости изучения способов их образования и бытования с учетом морфологических, структурно-семантических характеристик образных иносказательных определений. Научная новизна статьи состоит в том, что в ней впервые предпринята попытка описания и изучения метафорических эпитетов в поэзии Р. Гамзатова, раскрытия их роли и значимости в поэтическом пространстве конца XX века.

Цель исследования – выявление и анализ метафорических эпитетов в поэзии Р. Гамзатова, являющихся одним из доминирующих художественных приемов и отличительной стилистической особенностью поэтики его творчества 1980-х годов.

Материалы и методы исследования. Нами использованы следующие методы системного научного описания: систематизация, сопоставление и интерпретация результатов анализа; метод сплошной выборки, контекстуальный анализ.

Материалом исследования послужили метафорические эпитеты (прилагательные, причастия), представленные в поэтических текстах Р. Гамзатова 1980-х годов.

Результаты. Рассмотрены метафорические эпитеты, привлеченные для создания ярких и выразительных художественных образов, обрисовки героев, явлений и реалий времени, а также выражения авторского отношения к происходящим общественно-политическим событиям в стране. Характерные отличия тематики и проблематики метафорических эпитетов в поэзии Р. Гамзатова состоят в том, что они ярко и реалистично символизируют эпоху, ее социально-политические и экономические преобразования, активизировавшиеся в стране в конце XX века.

Заключение. Главными мотивами метафорических высказываний автора в этот период стали горькие размышления о духовном, политическом и экономическом упадке страны. С помощью данного приема через переносное значение слов Р. Гамзатов выражает свое негативное отношение к результатам перестроечных преобразований, приведших страну к разрухе, обнищанию народа, а также жестокости, меркантильности и равнодушию в обществе.

Ключевые слова: Р. Гамзатов, аварская поэзия 1980-х годов, метафорические эпитеты, общеязыковые и индивидуальные метафоры, пессимистические мотивы, образность, эмоциональная оценка, персонификация, олицетворение

Поступила 06.10.2025, одобрена после рецензирования 30.12.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Набигулаева М. Н. Метафорические эпитеты в поэзии Расула Гамзатова // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 283–292. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-283-292

© Набигулаева М. Н., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Original article

Metaphorical epithets in the poetry of Rasul Gamzatov

M.N. Nabigulaeva

G. Tsadasa Institute of Language, Literature and Art
Dagestan Scientific Center of RAS
45, M. Gadzhieva street, Makhachkala, 367000, Russia

Abstract. The significance of this study stems from the lack of a comprehensive analysis of the use of metaphorical epithets in the poetry of R. Gamzatov and the need to explore the methods of their creation and application, considering the morphological, structural, and semantic features of figurative and allegorical descriptions. The scientific novelty of this article lies in its attempt to describe and analyze metaphorical epithets used in R. Gamzatov's poetry for the first time, revealing their role and importance in the poetic landscape of the late 20th century.

Aim. The study aims to identify and analyze metaphorical epithets in Gamzatov's poetry, which are a dominant artistic device and a distinctive stylistic feature of his poetics in the 1980s.

Research materials and methods. We use a variety of methods for systematic scientific description, including systematization, comparison, interpretation of analytical results, continuous sampling, and contextual analysis.

The study's material consists of adjective metaphors found in the poetic texts of R. Gamzatov from the 1980s.

Results. This article examines the use of metaphorical epithets to create vivid and expressive artistic images, portray heroes, phenomena, and the realities of the time, as well as to express the author's attitude towards current socio-political events in the country. The distinctive themes and topics of metaphorical epithets in R. Gamzatov's poetry vividly symbolize the socio-political and economic reforms that intensified in the country at the end of the 20th century.

Conclusions. The author's metaphorical statements during this period were primarily motivated by bitter reflections on the spiritual, political, and economic decline of the country. Using this technique, R. Gamzatov conveys his negative feelings about the outcome of Perestroika through figurative language. showing how it has led to the destruction, impoverishment, and rise of cruelty, commercialism, and apathy in society.

Keywords: metaphorical epithets, common language and individual metaphors, realities of time, pessimistic motives, imagery, emotional assessment, personification, personification

Submitted 06.10.2025, approved after reviewing 30.12.2025, accepted for publication 10.02.2026

For citation. Nabigulaeva M.N. Metaphorical epithets in the poetry of Rasul Gamzatov. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 283–292. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-283-292

Введение

Эпитет является одним самых распространенных средств выразительности в художественной литературе и занимает в ней особое место. Данный прием художественной выразительности в творчестве многих авторов присутствует и в поэзии, и в прозе, только в «первой он обычнее и рельефнее, отвечая поднятому тону речи» [2, с. 59]. Существует ряд работ разных исследователей (А. Квятковский [1], А. Н. Веселовский [2], В. М. Жирмунский [3], М. А. Рыбников [4], Б. В. Томашевский [5] и др.), посвященных изучению истории и развития эпитета в литературах разных народов, в том числе и в русской, формулированию его определения, выделению основных видов.

Content is available under license Creative Commons Attribution 4.0 License

Одним из распространенных эпитетов является метафорический, который некоторые авторы (А. Квятковский [1, с. 359], А. Н. Веселовский [2, с. 61], Б. В. Томашевский [5, с. 36–37]) выделяют в отдельную группу. Его отличительной чертой ученые считают элемент сопоставления [5, с. 36] или «параллелизм впечатлений, их сравнение и логический вывод уравнения» [2, с. 61]. Более точное и развернутое определение данного тропа предлагает А. А. Клиппа: «Метафорический эпитет – это стилистический прием, указывающий не только на признак определенного явления, но и придающий этому признаку символическое или образно-переносное значение» [6, с. 179].

Метафорический эпитет, его бытование, способы образования в поэзии Р. Гамзатова до настоящего времени не становились объектом специального изучения. Впервые иносказательное значение эпитетов в поэзии Р. Гамзатова было отмечено нами в нашей работе [7], в которой рассмотрено функционирование эпитетов в поэзии Р. Гамзатова на примере сборника его стихов «В полдневный жар в долине Дагестана» (1990). На сегодняшний день имеются и другие исследования, посвященные бытованию эпитета в целом в прозе и поэзии Р. Гамзатова. К ним относятся статьи З. С. Омаровой [8], в которой рассмотрены эпитеты-прилагательные в поэзии Р. Гамзатова, М. Д. Ваджибова [9], где описаны случаи и возможные способы применения дагестанскими студентами эпитетов из книги Расула Гамзатова «Мой Дагестан», и С. М. Магомедовой, в которой представлен результат предварительных наблюдений относительно выявления и описания особенностей использования прилагательных-эпитетов для создания образа женщины в поэзии Расула Гамзатова.

Основная часть

Поэзия Р. Гамзатова 1980-х годов отличается по тематике, проблематике и идейно-художественному содержанию. Она наполнена тревогами времени в период демократического переустройства страны, общественным настроением, напрямую связанным с реформами перестройки и их разрушительными итогами, повлекшими за собой смену общественных, политических и экономических реалий в стране. Относительно этого периода исследователь творчества Р. Гамзатова Ч. С. Юсупова отмечает: «Чуткий сейсмограф своего времени, Расул Гамзатов первым почувствовал и назревавшие в 80-е годы в советском обществе тревожные изменения, тенденции к размыванию, казалось бы, незыблемых устоев и представлений, к разрушению самих основ жизни» [11, с. 83]. Поэзия этого периода во многом является откликом поэта на процессы и результаты реформ, к которым он открыто выражает свое негативное отношение. Его поэтическое слово зазвучало по-особенному ярко, выразительно и реалистично, отличаясь особой эмоциональностью и душевной откровенностью, критичным отношением автора к наблюдаемому вокруг. Важную роль при передаче эмоций и содержания произведений играет метафорический эпитет, определяющий идейно-тематическую и смысловую организацию поэтических текстов Р. Гамзатова.

Метафорические определения в поэзии Р. Гамзатова выполняют образно-выразительную и эмоционально-оценочную функции, свидетельствуют об индивидуально-авторском восприятии поэтом окружающего мира. Через его метафорические словосочетания можно представить общественно-политическую и историческую действительность эпохи больших преобразований, воспринять социально-экономическое время и человека в нем.

Рассматривая процесс метафоризации в поэтике произведений Р. Гамзатова названного периода, следует учитывать, что во многом особенности функционирования метафорического эпитета зависят от происходящих вокруг поэта процессов и тесно с ними связаны. «Эпитет, как и всякий другой стилистический факт, определяется эпохой, средой, тематикой произведения. Словарем писателя в целом» [4, с. 195], – отмечал в свое время

М. А. Рыбников. Так и Р. Гамзатов, ассоциативно связывая личные и общественные переживания с внешними реалиями, выбирает данный троп главным средством отражения собственных размышлений, внутренних переживаний относительно современной ему действительности, характерных для него явлений, символов, героев и предметов. Думы поэта неразрывно связаны с активизировавшимися негативными проявлениями социального и экономического характера, разобщающими и разрушающими отношения между людьми и целыми народами: хищение, коррупция, спекуляция, продажность чиновников (судей), алчность, меркантильность, эгоизм, межнациональные конфликты, войны, кровопролития и т. д.

Представленные в поэзии Р. Гамзатова 1980-х годов метафорические образы и характеристики естественно и органично вырастают из его наблюдений над происходящими вокруг событиями, возникающими обстоятельствами. Они изображают особый общественный мир, в котором царят жестокие нравы и правила жизни, меркантильные интересы, негативные проявления человеческой души. Потому метафора в этот период приобретает резкий и критический характер, она становится философски насыщенной, в ней усиливаются скорбные и грустные мотивы духовного и экономического упадка страны и общества, уничтожения былого ее могущества, которым поэт когда-то гордился, и идеалов в которые верил и защищал.

Основной круг метафорических определений поэзии 1980-х годов для наглядности и простоты восприятия мы оформили в виде таблицы. В ней представлены наиболее яркие и частотные примеры употребления анализируемого тропа, с помощью которого автор создает необычные словесные образы, привлекающие внимание читателя своей особой выразительностью, глубиной содержания и меткостью выражения.

В большинстве случаев использованы одинаковые эпитеты, которые в одном произведении могут встретиться не раз. Прием повторов автор использует для усиления эмоциональной составляющей произведения и его воздействия на читателя. Однако эти повторы не слишком заметны благодаря умелой их расстановке в тексте.

ГIасияб («Жестокий»)

«ГIасиял гудрал» («Жестокие капканы»)
«ГIасияб гъал» («Жестокая коса»)
«ГIасияб гIалхулаб релъи» («Жестокий дикий смех»)
«ГIасияб магIарул рокьи» («Жестокая аварская любовь»)
«ГIасилъараб ццин» («Ожесточившийся гнев»)
«ГIасияб накIкIилаб рохь» («Жестокий сосновый лес»)
«ГIасияб сурав» (2) («Жестокий допрос»)
«ГIасияб мех» («Жестокое время»)
«ГIасияб ярагъ» («Жестокое оружие»)
«ГIасияб дунял» («Жестокий мир»)
«ГIасияв цIогьор» («Жестокий вор»)
«ГIасияб тушман» («Жестокий враг», война)
«ГIасиял хIасратал сагIатал» («Жестокие страстные часы»)
«ГIасияб гIадалаб рагъ» («Жестокая безрассудная война»)
«ГIасияб хьвада-чIвади» («Жестокое поведение»)

Гьегьаб («Легковесный, пустой, незначительный, поверхностный»)

«Гьегьал ермоловал, паскевичал» («Пустые ермоловы, паскевичи»)
«Гьегьал шапакъатал» («Пустые подарки»)
«Гьегьал шагьарал» («Легковесные города»)

«Гьегьал секциял» («Легковесные секции»)
«Гьегьал трибунал» (2) («Легковесные трибуны»)
«Гьегьал чиновникал» («Пустые чиновники»)
«Гьегьал миллатал» («Пустые нации»)
«Гьегьал компаниял» («Легковесные компании»)
«ХIинкъарал къоял» («Испуганные дни»)
«Гьегьал кабинаби» («Легковесные кабины»)
«Гьегьал ремонтал» («Поверхностные ремонты»)
«Гьегьал ракьал» («Легковесные земли»)
«Гьегьал чанахъаби» («Легковесные охотники»)
«Гьегьал сухъмахъал» («Легковесные тропинки»)

СогIаб («Жесткий»)

«СогIаб гIакълу» («Жесткий разум»)
«СогIаб кьуру» («Жесткий утес»)
«СогIал чапарал» («Жесткие вестники»)
«СогIал мехал» («Жесткие времена»)
«ХъачIал согIал санал» («Грубые жесткие годы»)
«СогIав судияв» («Жесткий судья», о времени)
«ХъачIал согIал ргIаби» («Грубые жесткие слова»)
«СогIаб дунял» («Жесткий мир»)
«СогIаб гIамал» («Жесткий характер»)

Унтараб («Больной»)

«Унтарал къасдал» («Больные мечты»)
«Унтараб гIасру» («Больной век»)
«Унтараб Волга» («Больная Волга»)
«Унтараб шигIру» («Больной стих»)
«Унтарал лъимал» («Больные дети»)
«Унтараб рокьи» («Больная любовь»)
«Унтараб дуниял» (3) («Больной мир»)
«Унтараб керен» («Больная душа»)
«Унтараб пикру» («Больная мысль»)

ЧIегIераб («Черный»)

«ЧIегIерал къоял» («Черные дни»)
«ЧIегIерал сонал» («Черные годы»)
«ЧIегIераб гIазу» («Черный снег»)
«ЧIегIераб грим» («Черный грим»)
«ЧIегIерабгин хъахIаб оц» («Черно-белый бык») (Ночь – день)

ХIинкъараб («Испуганный»)

«ХIинкъарал къоял» («Испуганные дни»)
«ХIинкъараб бухIи» («Испуганный жар»)
«ХIинкъараб гIишкъу» («Испуганная страсть»)
«ХIинкъараб очередь» («Испуганная очередь»)
«ХIинкъарал кваркьаби» («Испуганные крылья»)

КьогIаб («Горький»)

«КьогIал амруял» («Горькие приказы»)
«КьогIаб гъвел, гаргар» («Горькие пересуды, разговоры»)
«КьогIаб гIурхъи» («Горькая граница»)
«КьогIаб сайигъат» («Горький подарок»)

Ццидалаб («Злой, гневный»)

«Ццидалал чIорал» («Гневные стрелы»)
«Ццидалал гIорал» («Гневные реки»)
«Ццидалаб дунял» («Злой мир»)
«Ццидалал гьурал» («Злые ветры)»

Лъукъараб («Раненый»)

«Лъукъарал ганчIал» («Раненые камни»)
«Лъукъарал сиял» («Раненые башни»)
«Лъукъараб ччугIа» («Раненая рыба»)
«Лукъарал къасдал» («Раненые мечты»)

Анализ метафорических определений показал, что Р. Гамзатов тяготеет к лексике, описывающей «печальные» эмоциональные настроения как в душе поэта, так и в обществе, с которым он неразрывно себя связывает: *«гIасияб»* («жестокий»), *«гьегьаб»* («легковесный, пустой»), *«согIаб»* («жесткий»), *«унтараб»* («больной»), *«чIегIераб»* («черный»), *«хIинкъараб»* («испуганный»), *«кьогIаб»* («горький»), *«ццидалаб»* («злой, гневный»), *«лъукъараб»* («раненый»), *«пашманаб»* («грустный»), *«бидулаб»* («кровавый»). Это самые частые метафорические эпитеты, в которых находят свое выражение мотивы одиночества, разочарования, неприятия существующих реалий и разлада с ними.

Дир лирикаялъул томазда тIасан
ТIухьидул ццидалаб цоги *гIел* гIуна.
Гьезул гIасилъидуй гIайиб щиб ккараб? –
Кинго ниж цоцада лъалеб х1ал гьечIо. [12, с. 18]

На моих томах лирики
Выросло *свинцовое злое*, другое *поколение*.
Что стало виной их жестокости? –
Никак мы друг друга не узнаем[1].

Однако запас иносказательных определений поэта не ограничивается представленными примерами. Он вводит оригинальные метафорические словосочетания, свидетельствующие о неисчерпаемом богатстве поэтического языка поэта, его таланте и творческом потенциале. Ища новые способы выразительности, работая над словом, он находит неожиданные и непривычные для более ранней его поэзии метафорические определения, подчеркивающие особенность его художественного сознания в данный период времени: *«янгъизал рукьби»* («одинокие кости»), *«кьалул горду»* («окно раздора»), *«тIухьидул ццидалаб гIел»* («свинцовое злое поколение»), *«чабххил иццал»* («щебневые родники»), *«сварал ихал»* («погасшие весны»), *«кьижарал пикраби»* («спящие раздумья»), *«пикру гьечIеб ццин»* («бездумный гнев»), *«лълъурдул гьечIеб мех»* («безрогое время»), *«хIинкъарал кваркьаби»*

[1]Здесь и далее перевод наш.

(«испуганные крылья»), *«накIкIилаб пардав»* («туманный занавес»), *«кIкIуйдулал санал»* («дымные годы»), *«гьерсилал монетал»* («лживые монеты»), *«лъукъараб ччугIа»* («раненая рыба»), *«мехтараб гьогьен»* («пьяная прохлада») и т. д.

Нух чIван лъутун унеб *лълъурдул гьечIеб мех*,
Гьелъ рачI хьвагIулеб куц ккараб-аралде.
Эхеде унезги эхей унезги
Бухулеб куц къали, жидер къо щванин. [12, с. 48]

Как быстро бежит *безрогое время*,
Как оно виляет хвостом былому-ушедшему.
Кто поднимается и кто спускается
Бьют радостно в барабаны: «Пришел наш день».

Бытующие в поэзии Р. Гамзатова 1980-х годов образные иносказательные определения чаще всего выражены прилагательными (качественными и относительными), причастиями и реже глаголами с семантикой разрушения, бурного волнения: *«гьелчолеб Каспий»* («волнуется Каспий»), *«гьалдолеб улка»* («кипит страна») *«хIанчIелеб макъала»* («кусается статья») и др. Встречающиеся примеры анализируемой группы эпитетов различаются не только по семантике и грамматике, но и по стилистике. С этой точки зрения выделяются такие разновидности, как **общеязыковые** (*«пашманаб бакъан»* («печальная музыка»), *«гьуинаб гьереси»* («сладкая ложь»), *«цIорораб гъасда»* («у холодного очага»), *«кьогIаб рагIи»* («горькое слово»), *«бакIал пикраби»* («тяжелые мысли»), **фольклорные** (*«жавгьарул жаназа»* («янтарное тело»), *«меседил цIад»* («золотой дождь»), *«маржанул магIил гарал»* («жемчужные слезы»), *«бацIилал берал»* («волчьи глаза») и **индивидуально-авторские** (*«ганчIил хоботал»* («каменные хоботы»), *«кьогIаб гIурхъи»* («горькая граница»), *«лъукъарал рохьал»* («раненые леса»), *«хIинкъарал къоял»* («испуганные дни») и др.). Последняя группа метафорических эпитетов доминирует в поэзии обозначенного времени и свидетельствует об особой выразительности, оригинальности языка произведений, специфике поэтического самовыражения Р. Гамзатова.

Кроме того, часто встречаются **фразеологические обороты, устойчивые выражения**, образующие целые предложения метафорического характера (*«ХIинкъарал къасдазул къваридав асир»* («Испуганных мечтаний унылый пленник»), *«Ригьищ гьаб мехтараб, мехищ гьетIараб»* («Время ли пьяное, пора ли кривая»), *«ЦIадулал хIалтIаби цIадулаз гьаре»* («Огненные дела пусть огненные совершают»), *«Гьедин ццидалаб цIа цIорораб гъасда»* («Вот так злой огонь у бездушного очага») и др.

Ригьищ гьаб мехтараб, мехищ гьетIараб,
Гьокойищ бекулеб чIаголъиялъул?
Гьанже кучIдулги тун, палихъан гIадин,
ГIумруялъул чIинхал рехулев вуго. [12, с. 68]

Время ли пьяное, пора ли кривая,
Разве ломается колесо жизни?
Оставив песни, как гадалка,
Теперь бросаю камни жизни.

Образно-выразительные метафорические эпитеты в поэзии Р. Гамзатова выполняют следующие стилистические функции:

1. Олицетворение природы: *«мехтарал карачелал»* («пьяные волны»), *«лъукъарал ганчIал»* («раненые камни»), *«бецлъарал иццал»* («ослепшие родники»), *«унтараб Волга»* («больная Волга»), *«кьижарал кьураби»* («спящие скалы»), *«ццидалал гьурал»* («злые ветры»), *«гьалагал океанал»* («взбудораженные океаны»), *«гIакъилаб рогьел»* («мудрый рассвет»), *«гIашикъал ихал»* («страстные весны») и др.

2. Олицетворение предметов, объектов и явлений: *«гIенеккун чIарал гIарадаби»* («молчаливые орудия»), *«пашманал моцIал»* («грустные месяцы»), *«гIасиял гудрал»* («жестокие капканы»), *«понцIорал чунтби»* («раздутые кошельки» (о людях), *«гIасияб тушман»* («жестокий враг» (о войне»), *«гIасияб гIадалаб рагъ»* («жестокая безрассудная война»), *«гьалдолеб улка»* («кипит страна»), *«хIинкъараб очередь»* («испуганная очередь») и др.

3. Персонификация различных состояний, поступков, характера, атрибутов человека: *«гьерсилаб хIалимлъи»* («лживое милосердие»), *«мехтараб гIасилъи»* («пьяная жестокость»), *«бахIараб мехтел»* («молодое пьянство»), *«недегьаб хIилла-рекIкI»* («ласковая хитрость-зависть»), *«хIалимаб хIусуд»* («кроткая зависть»), *«сабураб хIалимлъи»* («терпеливая кротость»), *«гьаглъи чIухIараб»* («глупость горделивая»), *«ахIмакъаб кеп»* («глупое веселье»), *«пикру гьечIеб ццин»* («бездумная злость»), *«согIаб гIакълу»* («жесткий разум»), *«гуккарал хIисабал»* («обманутые мечты») и др.

Реже всего встречаются примеры персонификации органов человека: *«унтараб керен»* («больная грудь»), *«бецлъарал ракIал»* («ослепшие сердца»), *«ракI унтараб къваридаб»* («сердце больное, печальное»).

Заключение

В процессе анализа установлено, что поэзия Р. Гамзатова 1980-х годов изобилует примерами метафорического эпитета. Он стал одним из основных приемов реалистического видения мира и его оценки, чаще всего в негативном свете. Об этом свидетельствует оценочная эпитетная лексика поэта с отрицательной семантикой осуждения, критики, разочарования, вплоть до сатирического изображения и изобличения примет и реалий времени.

Использованные Р. Гамзатовым метафорические определения носят преимущественно индивидуально-авторский характер. Они образуют новые необычные смысловые ассоциации, метко характеризующие поколение, время и новые идеи, свидетельствуют о мастерстве и богатстве поэтического языка автора, его нестандартном мышлении. Часто в переносных определениях поэта сочетаются семантически несовместимые слова, создавая при этом необычные, художественные образы. Употребление Р. Гамзатовым оригинальных иносказательных эпитетов способствует персонификации и олицетворению объектов окружающего мира в его поэзии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Квятковский А.* Поэтический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1966. 375 с.
2. *Веселовский А. Н.* Историческая поэтика. М.: Высшая школа, 1989. 406 с.
3. *Жирмунский В. М.* Теория литературы. Поэтика. Стилистика. Л.: Наука, 1977. 405 с.
4. *Рыбников М. А.* Введение в стилистику. М.: Сов. писатель, 1937. 276 с.
5. *Томашевский Б. В.* Теория литературы. Поэтика. М.; Л.: Гос. изд-во, 1930. 238 с.
6. *Клиппа А. А.* Цветовые перифразы на основе метафорических эпитетов и сравнений в творчестве И.С. Никитина как средство обогащения словарного запаса младших школьников // Инновационная наука. 2017. № 01-1. С. 179–180. EDN: XIRLSH

7. *Набигулаева М. Н.* Эпитеты в поэзии Расула Гамзатова (На примере книги «В полдневный жар в долине Дагестана») // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 2. Гуманитарные науки. 2025. Т. 40. Вып. 2. С. 35–40. DOI: 10.21779/2542-0313-2025-40-2-35–40

8. *Омарова З. С.* Эпитеты-прилагательные в поэзии Расула Гамзатова // Вестник ДГУ. Сер. 2: Гуманитарные науки. 2019. Т. 34. Вып. I. С. 48–55. DOI: 10.21779/2542-0313-2019-34-1-48-55

9. *Ваджибов М. Д.* Об использовании дагестанскими студентами эпитетов из книги Расула Гамзатова «Мой Дагестан» // «Наука. Мысль: электронный периодический журнал». 2016. № 6–1. EDN: VZJKSB

10. *Магомедова С. М.* Роль эпитетов в создании образа женщины в поэзии Расула Гамзатова // Современные проблемы кавказского языкознания и тюркологии. Махачкала: Изд-во ДГУ, 2010. Вып. 9. С. 132–135.

11. *Юсупова Ч. С*. Расул Гамзатов в расколотом мире (1985–2000). Махачкала, 2007. 384 с.

12. *Гамзатов Р*. В полдневный зной в долине Дагестана. Махачкала: Дагкнигоиздат, 1990. 388 с. На авар. яз.

REFERENCES

1. Kvyatkovsky A. *Poeticheskiy slovar* [Poetic Dictionary]. Moscow: Sovetskaya enciklopediya, 1966. 375 p. (In Russian)

2. Veselovsky A.N. *Istoricheskaya poetika* [Historical Poetics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 406 p. (In Russian)

3. Zhirmunsky V.M. *Teoriya literatury. Poetika. Stilistika* [Theory of Literature. Poetics. Stylistics]. Leningrad: Nauka, 1977. 405 p. (In Russian)

4. Rybnikov M.A. *Vvedenie v stilistiku* [Introduction to stylistics]. Moscow: Sov. pisatel`, 1937. 276 p. (In Russian)

5. Tomashevsky B.V. *Teoriya literatury*. *Poetika* [Theory of Literature. Poetics]. Moscow, Leningrad: Gos. izd-vo, 1930. 238 p. (In Russian)

6. Klippa A.A. Color periphrases based on metaphorical epithets and comparisons in the works of I.S. Nikitin as a means of enriching the vocabulary of younger schoolchildren. *Innovacionnaya nauka* [Innovative Science]. 2017. No. 01-1. Pp. 179–180. (In Russian)

7. Nabigulaeva M.N. Epithets in the poetry of Rasul Gamzatov (as exemplified in the collection of poems "In the half-day heat in the valley of Dagestan"). *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2. Gumanitarnye nauki* [Bulletin of Dagestan State University. Series 2. Humanities]. 2025. Vol. 40. No. 2. Pp. 35–40. DOI: 10.21779/2542-0313-2025-40-2-35–40. (In Russian)

8. Omarova Z.S. Epithets-adjectives in the poetry of Rasul Gamzatov. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2. Gumanitarnye nauki* [Bulletin of Dagestan State University. Series 2. Humanities]. 2019. Vol. 34. No. 1. Pp. 48–55. DOI: 10.21779/2542-0313-2019-34-1-48-55. (In Russian)

9. Vadzhibov M.D. About the use of epithets by Dagestani students from Rasul Gamzatov's book "My Dagestan". *World Ecology Journal.* 2016. No. 6–1. EDN: VZJKSB. (In Russian)

10. Magomedova S.M. The role of epithets in creating the image of a woman in the poetry of Rasul Gamzatov. *Sovremennye problemy kavkazskogo yazykoznaniya i tyurkologii* [Modern Problems of Caucasian Linguistics and Turkology]. Makhachkala: Izd-vo DGU, 2010. No. 9. Pp. 132–135. (In Russian)

11. Yusupova Ch.S. *Rasul Gamzatov v raskolotom mire (1985–2000)* [Rasul Gamzatov in a Divided World (1985–2000)]. Makhachkala, 2007. 384 p. (In Russian)

12. Gamzatov R. *V poldnevnyy znoy v doline Dagestana* [In the Midday Heat in the Valley of Dagestan]. Makhachkala: Dagknigoizdat, 1990. 388 p. [In Avar language]

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Набигулаева Маржанат Набигулаевна, канд. филол. наук, стар. научн. сотр. Центра по изучению литературного наследия Р. Гамзатова Института языка, литературы и искусства имени Г. Цадасы, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН;

367000, Россия, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 45;

nabmar2012@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2841-4665, SPIN-код: 3972-5396

Information about the author

Marzhanat N. Nabigulayeva, Candidate of Philological Sciences, Senior Researcher, G.Tsadasa Institute of Language, Literature and Art, Dagestan Scientific Centre of RAS.

45, M. Gadzhieva street, Makhachkala, 367000, Russia

nabmar2012@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2841-4665, SPIN-code: 3972-5396

ЮБИЛЯРЫ

Владимиру Мицаховичу Гукежеву – 85 лет



Гукежев Владимир Мицахович родился 25 января 1941 г. в с. Морзох Урванского района КБР.

Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории животноводства Института сельского хозяйства – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» (ИСХ КБНЦ РАН). Является действительным членом-академиком Международной академии информационных процессов и технологий и Адыгской международной академии наук.

Занимается научно-исследовательской и педагогической деятельностью 55 лет, работая в академических и научно-исследовательских учреждениях.

Окончил Высший Костромской сельскохозяйственный институт «Караваево» по специальности ученый зоотехник. В 1970 г. защитил кандидатскую, а в 1988 г. – докторскую диссертацию «Повышение эффективности отбора молочного скота в племенных и товарных стадах». В. М. Гукежев прошел путь от старшего преподавателя до профессора и от старшего научного сотрудника до директора научно-исследовательского института. За этот период проявил себя талантливым организатором, педагогом, крупным ученым.

За период работы им подготовлено более 250 дипломников, опубликовано 339 печатных работ, в т.ч. 4 монографии, 48 рекомендаций, 18 учебных и учебно-методических разработок.

Под руководством В. М. Гукежева подготовлены и успешно защищены 17 кандидатских и 4 докторские работы. В настоящее время руководит двумя соискателями ученой степени доктора наук.

Благодаря профессиональным знаниям и организаторским способностям внес большой вклад в развитие животноводства Кабардино-Балкарской Республики, является одним из признанных педагогов-аграриев, обладающих глубокими профессиональными знаниями, широкой эрудицией, прекрасно владеет ситуацией в отрасли как в республике, так и в стране и за рубежом. Инициатор и организатор первого в Российской Федерации Селекционного центра по совершенствованию костромской породы, им создана научная школа, объединяющая ученых Костромской и Тверской областей, Кабардино-Балкарской Республики по решению одной из важнейших проблем регионов – совершенствование воспроизводительных и продуктивных качеств плановых пород.

В. М. Гукежев – научный руководитель по региону и ответственный исполнитель комплексной программы научных исследований «Улучшение генетического потенциала крупного рогатого скота молочных пород» Департамента координации деятельности организаций в сфере сельскохозяйственных наук Министерства науки и высшего образования РФ. С 1994 по 1999 г. возглавлял Кабардино-Балкарский НИИ сельского хозяйства РАСХН РФ, где проявились его организаторские способности по разработке и внедрению в производство достижений сельскохозяйственной науки и практики, с июня

2001 по 2017 г. был председателем Диссертационного совета при Кабардино-Балкарской государственной сельскохозяйственной академии по защите докторских и кандидатских диссертаций. Он член редакционной коллегии журналов «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» и «Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова».

В. М. Гукежев за достигнутые успехи и участие в ВДНХ награжден бронзовой медалью (1987), медалью за развитие Нечерноземья (1982), знаком «За активную работу» Всесоюзного общества «Знание» (1986). За многолетний добросовестный труд и плодотворную научно-педагогическую деятельность В. М. Гукежеву присвоены почетные звания «Заслуженный деятель науки Кабардино-Балкарской Республики» (2016) и «Почетный работник науки и высоких технологий РФ» (2021), в 2023 году получил Благодарность Министерства сельского хозяйства РФ.

Уважаемый Владимир Мицахович, коллектив Кабардино-Балкарского научного центра РАН от всей души поздравляет Вас с 85-летием! Желаем крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов на благо российской науки!

ЮБИЛЯРЫ

Анатолию Беталовичу Иванову – 75 лет



Иванов Анатолий Беталович родился 9 февраля 1951 года в с. Старый Черек Кабардино-Балкарской Республики.

Доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАЕН, заслуженный деятель науки КБР. Общий научно-педагогический стаж работы – 52 года, в том числе в Кабардино-Балкарском государственном университете – 43 года. С 1993 по 2022 г. был заведующим кафедрой нормальной и патологической физиологии медицинского факультета Кабардино-Балкарского государственного университета, в настоящее время – профессор этой кафедры.

В течение многих лет активно совмещает преподавательскую работу в КБГУ с научной деятельностью в Кабардино-Балкарском научном центре РАН. Являлся заведующим лабораторией биологической и медицинской информатики, где под руководством доктора медицинских наук, профессора А. З. Колчинской проводились исследования по адаптации организма к нормобарической интервальной гипоксической тренировке у здоровых и больных с наиболее распространенными в Кабардино-Балкарской Республике заболеваниями. Эти исследования завершились защитой в 2002 году в Кубанской медицинской академии диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук по специальности 03.00.13 – Физиология.

С 2003 года и по настоящее время профессор, член-корреспондент Российской академии естественных наук А. Б. Иванов продолжает сотрудничество с Институтом информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, являясь ведущим научным сотрудником. Многие годы ему доверяли членство в Ученом совете института. Член редколлегии журнала «Известия КБНЦ РАН» более 10 лет.

Под руководством А. Б. Иванова подготовлены и успешно защищены 5 кандидатских диссертаций, 4 из них – сотрудниками практического здравоохранения. А. Б. Иванов являлся членом двух докторских диссертационных советов: при Северо-Осетинской государственной медицинской академии по специальности 14.03.03 – Патологическая физиология (медицинские науки) и Адыгейском государственном университете по специальности 03.03.01 – Физиология (биологические науки).

Анатолий Беталович принимает активное участие в общественной жизни республики: был депутатом Парламента КБР III и IV созывов, членом Комитета по образованию, науке и здравоохранению, участвовал в разработке «Закона об образовании в КБР» в составе рабочей группы.

Профессор А. Б. Иванов неоднократно являлся официальным оппонентом и выступал с докладами на защите кандидатских и докторских диссертаций.

За период научно-педагогической деятельности им опубликовано 170 работ, в том числе: в базах данных SCOPUS и WEB of Science – 15 статей, ВАК – более 50 статей, РИНЦ –

более 50 статей, монографии – 4. С 2017 по 2025 год издал (в соавторстве) 5 учебников «Физиология», рекомендованных учебными медицинскими объединениями по медицинскому и фармакологическому образованию в качестве основного учебного пособия для студентов медицинских специальностей.

Анатолий Беталович постоянно принимает участие в российских и международных конференциях, семинарах и съездах физиологического общества им. И. П. Павлова с докладами.

Плодотворная научно-педагогическая, организаторская и активная общественно-политическая деятельность А. Б. Иванова отмечена Почетной грамотой Парламента КБР (2019), званиями «Заслуженный деятель науки РСО – Алания» (2011) и «Заслуженный деятель науки КБР» (2013), за многолетний и добросовестный труд неоднократно (2006, 2011, 2016, 2021) награждался Почетной грамотой КБГУ.

Уважаемый Анатолий Беталович, коллектив Кабардино-Балкарского научного центра РАН поздравляет Вас с 75-летним юбилеем! Желаем крепкого здоровья, счастья и плодотворной реализации новых идей и проектов, сил и удачи, дальнейших успехов на благо российской науки!

ЮБИЛЯРЫ

Кибирову Алихану Яковлевичу – 75 лет



Кибиров Алихан Яковлевич – доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела экономических отношений в организациях АПК Всероссийского научно-исследовательского института организации производства, труда и управления в сельском хозяйстве – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства», является одним из ведущих ученых Российской Федерации в сфере аграрной экономики. Им сформированы принципы и обоснованы направления развития механизма инвестиционной деятельности крупных, средних и малых аграрных товаропроизводителей; доказана необходимость государственного регулирования процессов ценообразования на агропродовольственные товары и соблюдения эквивалентности обменных отношений в отраслях АПК.

А. Я. Кибиров осуществлял исследования по ключевым направлениям фундаментальных и прикладных научных разработок в части формирования и развития инвестиционного рынка, привлечения и стимулирования притока долгосрочных инвестиций в агропромышленный комплекс. По непосредственному заданию Министерства сельского хозяйства России им разработана «Методика расчета потребности АПК в инвестициях», с помощью которой обоснована и рассчитана ежегодная потребность в инвестициях сельского хозяйства на возмещение основного капитала в размере около одного триллиона рублей и свыше 900 миллиардов в оборотный капитал (в ценах 2003 года). Это позволило выявить резервы для формирования как собственных, так и привлеченных источников финансирования инвестиций, и послужило основой для выработки ключевых ориентиров при реализации приоритетного национального проекта «Развитие АПК» и принятых в последующие годы государственных программ развития сельского хозяйства.

А. Я. Кибиров – один из идеологов становления и развития фермерства в России, он использовал собственный большой опыт и знания о принципах, формах и тенденциях направления его формирования, полученные при непосредственном изучении организации и управления фермерской деятельностью во многих развитых в аграрном отношении странах. Это позволило во взаимодействии с Российской академией кадрового обеспечения агропромышленного комплекса разработать программу подготовки российских фермеров и активно участвовать в научно-практическом сопровождении их самостоятельной деятельности в качестве научного консультанта.

Алихан Яковлевич разработал, апробировал и внедрил принципиально новую трудосберегательную технологию выращивания картофеля для малых форм хозяйствования аграрного производства. Эта разработка позволила исключить две самые трудоемкие операции при выращивании картофеля – прополку всходов и их окучивание.

А. Я. Кибиров – соавтор учебного пособия «Организация инвестиционной деятельности в АПК», используемого при подготовке кадров высшей квалификации в ведущих

аграрных вузах России, автор 201 научной работы (индекс Хирша по публикациям: на eLibrary.ru – 21, в РИНЦ – 19, по ядру РИНЦ – 3, по Scopus – 2).

Профессор А. Я. Кибиров более 20 лет является председателем Государственной аттестационной комиссии Российской академии кадрового обеспечения, возглавляет Государственную экзаменационную комиссию ФГБОУ ВО «Российский государственный университет народного хозяйства им. В. И. Вернадского». Активно участвует в научной международной деятельности, регулярно выступает с лекциями во время зарубежных стажировок и командировок, на международных семинарах и симпозиумах по вопросам аграрного бизнеса и агропромышленного производства.

За многолетнюю плодотворную деятельность на благо российской науки Алихан Яковлевич награжден дипломами и золотой медалью Российской агропромышленной выставки «Золотая осень» (2017, 2019, 2020, 2021), благодарственными письмами от Государственной Думы ФС РФ (2020, 2022), благодарностями Комитета Совета Федерации по агропродовольственной политике и природопользованию (2015, 2016), Почетной грамотой Правительства Москвы и денежной премией, юбилейной медалью «300 лет Российской академии наук» (2024).

Уважаемый Алихан Яковлевич, коллектив Кабардино-Балкарского научного центра РАН от всей души поздравляет Вас с 75-летием! Желаем крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов!

ЮБИЛЯРЫ

Махти Зейтуновичу Улакову – 75 лет



Улаков Махти Зейтунович родился 26 февраля 1951 года в с. Дон-Арик Чуйского района Киргизской ССР. После возвращения балкарского народа из депортации на историческую родину, в Кабардино-Балкарию, семья Улаковых поселилась в с. Кёнделен. Окончив среднюю школу, М. Улаков поступил на русско-балкарское отделение ИФФ Кабардино-Балкарского госуниверситета (КБГУ) и успешно окончил его в 1974 г. В сентябре того же года он был принят старшим лаборантом в сектор карачаево-балкарского языка Кабардино-Балкарского института истории, филологии и экономики (КБИГИ).

Осенью 1976 г. М. Улаков поступил в аспирантуру сектора тюркских и монгольских языков Института языкознания АН СССР. За время учебы в аспирантуре он написал кандидатскую диссертацию.

Научную деятельность М. Улаков продолжил в КБИГИ: младшим научным сотрудником, старшим научным сотрудником, главным научным сотрудником, заведующим сектором карачаево-балкарского языка, заведующим отделом карачаево-балкарской филологии.

С июня 1993 г. по декабрь 1998 г. Махти Зейтунович Улаков – заместитель директора КБИГИ по научной работе, с января 1999 г. по март 2021 г. – заместитель председателя Кабардино-Балкарского научного центра РАН по научной работе; в настоящее время – советник генерального директора КБНЦ РАН.

В 1983 г. в Баку защитил кандидатскую диссертацию на тему «Термины животноводства в карачаево-балкарском языке». В 1996 году – докторскую диссертацию «Проблемы стилистики карачаево-балкарского языка: лексический и лексикографический аспекты» в Институте языкознания РАН (г. Москва). В 2009 году ему присвоено ученое звание профессора по специальности «Языки народов РФ (тюркские языки)».

За время научной деятельности им опубликовано более 200 научных трудов, в том числе 20 работ вышли отдельными изданиями:

1. Проблемы лексической стилистики карачаево-балкарского языка. Нальчик: Эльбрус, 1994. 116 с.
2. Толковый словарь карачаево-балкарского языка (кол. авт.). Т. 1 (А-Ж). Нальчик: Эль-Фа, 1996. 1016 с.
3. Толковый словарь карачаево-балкарского языка (кол. авт.). Т. II (З-Р). Нальчик: Эль-Фа, 2002. 1168 с.
4. Толковый словарь карачаево-балкарского языка (кол. авт.). Т. III (С-Я). Нальчик: Эль-Фа, 2005. 1157 с.
5. Школьный русско-балкарский словарь (кол. авт.). Нальчик: Эльбрус, 1992. 288 с.
6. Школьный русско-балкарский словарь (кол. авт.). Доработанное издание. Нальчик: Эльбрус, 1997. 397 с.
7. Школьный русско-балкарский словарь (кол. авт.). Доработанное, исправленное издание. Нальчик: Эльбрус, 2008. 408 с.
8. История карачаево-балкарского языка (курс лекций). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2001. 78 с.

9. Письменные памятники тюркских языков как источник истории современного карачаево-балкарского языка (спецкурс) (в соавт. с А. А. Чеченовым). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2003. 51 с.

10. Современные принципы и методы лингвистических исследований и дальнейшее развитие национальных языков (спецкурс) (в соавт. с А. И. Геляевой). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2003. 30 с.

11. Очерки истории карачаево-балкарского языка (учебное пособие). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2005. 105 с.

12. Карачаево-балкарско-русский словарь лингвистических терминов (в соавт. с Л. Х. Махиевой). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2008. 104 с.

13. Избранные труды. Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2010. 364 с.

14. Языковая ситуация в Кабардино-Балкарской Республике: состояние и проблемы (в соавт. с С. К. Башиевой, Ж. М. Хамдоховой). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2016. 172 с.

15. Современный карачаево-балкарский язык. Ч. 1 (колл. авторов) / Руководитель проекта и автор нескольких разделов – проф. М. З. Улаков. Нальчик: ООО «Печатный двор», 2016. 445 с.

16. Словарь синонимов карачаево-балкарского языка (колл. авторов). Нальчик: ООО «Печатный двор», 2017. 558 с.

17. Современный карачаево-балкарский язык. Ч. 2 (колл. авторов) / Руководитель проекта и автор нескольких разделов – проф. М. З. Улаков. Нальчик: ООО «Печатный двор», 2018. – 480 с.

18. Трансформация системы ценностей населения Кабардино-Балкарии в современных условиях (колл. авторов). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2019. 192 с.

19. Проблемы терминологии карачаево-балкарского языка (в соавт. с Л. Х. Махиевой). Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2019. 120 с.

20. Русско-карачаево-балкарский словарь. Т. 1: А-Ж. / Руководитель проекта. Нальчик, 2024. 552 с.

Под редакцией М. З. Улакова изданы десятки монографий. В его работах обширный материал, извлеченный из многочисленных и разнообразных источников, разработан с такой достоверностью и скрупулезностью, что стал образцом для многих исследователей.

М. З. Улаков – крупный специалист в области тюркской лексикологии и лексикографии. Он является одним из составителей и организатором издания «Толкового словаря карачаево-балкарского языка» (в трех томах), «Школьного русско-балкарского словаря», соавтором «Карачаево-балкарско-русского словаря лингвистических терминов». В последние годы под руководством Махти Улакова создано несколько совместных с коллегами проектов, в числе которых фундаментальный труд «Современный карачаево-балкарский язык» и «Словарь синонимов карачаево-балкарского языка».

Особо следует отметить изыскания ученого в области стилистики, которые объединены общей оригинальной концепцией. В целом же круг научных интересов ученого весьма широк: он разрабатывает темы, связанные с проблемами истории языка, тюркской лексикологии и лексикографии, диалектологии, культуры речи, социолингвистики. При этом особое внимание уделяется эволюционным процессам, происходящим в современной гуманитарной науке.

Профессор М. З. Улаков заботится о подрастающем поколении, его глубоко волнует общеобразовательный уровень молодежи: вузовское обучение и послевузовское повышение квалификации. С 2000-го по 2006 год он (по совместительству) занимал должность профессора кафедры карачаево-балкарского языка и литературы КБГУ и издал адресованные студентам, аспирантам и соискателям работы: «История карачаево-балкарского языка» (курс лекций), «Современные принципы и методы лингвистических исследований» (спецкурс), «Очерки истории карачаево-балкарского языка» (учебное пособие) и др. В настоящее время ученый совмещает научно-организационную работу в Кабардино-Балкарском научном центре РАН и должность главного научного сотрудника КБИГИ, где, помимо исследовательской работы,

руководит аспирантами и соискателями: под его руководством успешно защитились десять диссертантов. В этом институте результативно работает научная школа профессора М. З. Улакова. Неоднократно был председателем государственных экзаменационных комиссий в Кабардино-Балкарском и Карачаево-Черкесском госуниверситетах. Работая в КБИГИ, М. З. Улаков организовал и лично участвовал в нескольких научных экспедициях, в том числе и зарубежных (Сирия, Иордания, Турция). По итогам экспедиций были опубликованы сборники и статьи, которые получили высокую оценку специалистов. Летом 1992 года в г. Самсун (Турция) он прошел курс изучения турецкого языка.

Известный ученый и талантливый организатор науки М. З. Улаков вносит весомый вклад в процесс интеграции академической и вузовской науки. Будучи бессменным заместителем главного редактора журнала «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» со дня его основания, членом редколлегии журналов «Российская тюркология» и «Вестник тюркского мира», энциклопедии «Люблю я Кавказ» – северокавказского регионального проекта, членом редакционного совета «Родной язык», членом Российского комитета тюркологов при Отделении историко-филологических наук РАН, действительным членом (академиком) Российской академии естественных наук по секции «энциклопедии» (РАЕН), более 15 лет ученым секретарем Кабардино-Балкарского отделения РАЕН, академиком Международной тюркской академии (МТА), более 10 лет председателем Кабардино-Балкарского отделения МТА, многократным делегатом годичных собраний РАН, он ведет активную работу по пропаганде научных знаний на Юге России и нацеливает молодых ученых на повышение уровня исследований до планки мировых достижений.

М. З. Улаков является активным участником общественно-политической жизни Кабардино-Балкарии: он был членом Избирательной комиссии КБР, членом комиссии по вопросам помилования при Президенте КБР и членом Общественного экспертного совета при комитете по межнациональным отношениям Парламента КБР, заместителем председателя Общественного совета Министерства образования и науки КБР; в настоящее время является руководителем группы по непроизводственной сфере экспертного совета при Главе КБР, доверенным представителем Уполномоченного по правам человека в КБР по городскому округу Нальчик, членом Общественного совета при Министерстве образования и науки, членом Общественной палаты КБР (V и VI состава).

М. З. Улаков пользуется большим авторитетом в регионе, в российских научных кругах и среди тюркологов мира.

За многолетнюю плодотворную научную, научно-организационную и активную общественно-политическую деятельность М. З. Улаков награжден: Почетной грамотой КБР (1996), Почетной грамотой РАН (1999), Почетной грамотой Парламента КБР (2011), Почетной грамотой Избирательной комиссии КБР (2007), Почетной грамотой Президиума КБНЦ РАН (2011), Почетной грамотой КБИГИ (2016), Почетной грамотой КБНЦ РАН (2021), медалями И. Крымшамхалова и К. Кулиева (2019), «250 лет единения Ингушетии с Россией» (2021), «За мир и гуманизм на Кавказе» (2021), «За защиту прав человека» (2022), получил Благодарность Председателя Общественной палаты КБР (2025). Признан лучшим наставником 2025 года Кабардино-Балкарского научного центра РАН. Ему присвоены почетные звания «Заслуженный деятель науки Карачаево-Черкесской Республики» (1998), «Заслуженный деятель науки Кабардино-Балкарской Республики» (2001), «Почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации» (2021).

Уважаемый Махти Зейтунович, коллектив Кабардино-Балкарского научного центра РАН поздравляет Вас с 75-летним юбилеем! Желаем крепкого здоровья, счастья и дальнейших успехов на благо российской науки!

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ АВТОРАМИ В ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН»

1. Журнал **«Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН»** публикует оригинальные научные, обзорные, аналитические статьи отечественных и зарубежных авторов, рецензии на книги и статьи, персоналии по следующим группам специальностей:

1.1. Математика и механика; 1.2. Компьютерные науки и информатика; 1.3. Физические науки; 1.6. Науки о Земле и окружающей среде; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации; 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство; 4.2. Зоотехния и ветеринария; 5.2. Экономика; 5.4. Социология; 5.5. Политические науки; 5.6. Исторические науки; 5.9. Филология.

Журнал предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов. Периодичность – шесть выпусков в год. Журнал публикует статьи на русском и английском языках объемом не менее 8 и не более 20 страниц макетного формата (не менее 18 000 символов). Работы, превышающие объем, принимаются к публикации по специальному решению главного редактора журнала.

Журнал «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» вошел в Единый государственный перечень научных изданий – «Белый список» (решение Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов, 09.09.2025), 4-й уровень.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки, категория журнала – К2 (распределение журналов по категориям, п. 1320):

<u>группа специальностей 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации:</u>

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки),

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки),

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (физико-математические науки),

2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки);

<u>группа специальностей 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство:</u>

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки),

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные науки),

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки);

<u>группа специальностей 5.2. Экономика:</u>

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (экономические науки),

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки),

5.2.6. Менеджмент (экономические науки).

2. К публикации в журнале «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» принимаются статьи, содержащие новые результаты. Статьи должны быть посвящены актуальным проблемам науки, содержать четкую постановку цели и задач исследования, строгую научную аргументацию, обобщения и выводы, представляющие интерес своей новизной, научной и практической значимостью. Журнал также публикует специальные выпуски, посвященные конференциям разного уровня по тематике журнала, обзорные

статьи. Не допускается направление в редакцию статей, уже опубликованных или посланных на публикацию в другие журналы. Результаты иных авторов, использованные в статье, следует должным образом отразить в ссылках. Представляя статью в журнал, авторы обязаны выполнять все требования по оформлению.

3. Направляя статью в журнал, каждый из авторов подтверждает, что она соответствует наивысшим стандартам публикационной этики для авторов и соавторов, разработанным COPE (Committee on Publication Ethics), см. http://publicationethics.org/about. Всем статьям, опубликованным в журнале, присваиваются идентификаторы цифрового объекта (DOI) для лучшего поиска и идентификации. Поступающие в редакцию статьи проходят проверку на плагиат через систему ***Антиплагиат*** (https://www.antiplagiat.ru), для принятия они должны иметь не менее 75 % уникальности текста.

4. Принятые к публикации в журнале «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» статьи проходят двойное слепое рецензирование, редакционную подготовку, после чего макет направляется на корректуру. Окончательный вариант предоставляется автору на вычитку. Срок предоставления статьи на вычитку автору – 3 рабочих дня.

5. Полнотекстовые версии статей, публикуемых в журнале, размещаются в Интернете в свободном доступе на официальном сайте журнала https://www.kbncran.ru/izvestiya-htm/, на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Научной электронной библиотеки «Киберленинка», в Российской государственной библиотеке, ВИНИТИ, Google Scholar, Российском центре научной информации (РЦНИ). Статьи по сельскому хозяйству размещаются в AGRIS. Статьи по математике, физике, информатике, математическому моделированию в экономике и по наукам о земле размещаются на Общероссийском математическом портале Math-Net.Ru www.mathnet.ru (http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=izkab&optionlang=rus). Срок размещения редакцией очередного номера журнала – в течение 3 месяцев с даты выхода в свет номера.

6. Публикации в журнале для сотрудников КБНЦ РАН бесплатные, для сторонних авторов – 500 руб. за страницу (за оказание услуг по редакционно-издательской обработке статей). Для рецензентов (не членов редколлегии) предусмотрены льготы для опубликования.

7. Требования к рукописи статьи.

Рукопись статьи подается вместе с сопроводительным письмом, подписанным всеми авторами статьи, в котором авторы в том числе подтверждают, что подаваемая в журнал статья ранее не была опубликована, а также не представлена для рассмотрения и публикации в другом журнале. Число и состав авторов после подачи статьи на рецензирование не меняются.

Материалы предоставляются в редакцию журнала по адресу: 360010, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2 или на электронную почту ired07@mail.ru.

Все страницы, включая рисунки, таблицы и список литературы, следует пронумеровать.

В тексте статьи **обязательно** указывается:

- УДК https://teacode.com/online/udc/; ORCID; тип статьи (научная, обзорная, аналитическая,…); коды JEL (специальности: 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике, 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, 5.2.6. Менеджмент); AMS Subject Classification (по специальностям в областях математики, информатики, физики);

- название статьи на русском и английском языках;

- фамилия и инициалы автора (авторов) на русском и английском языках; электронная почта авторов (если несколько авторов, то указать * автора, ответственного за переписку);

- полное официальное название учреждения с указанием полного почтового адреса на русском и английском языках, адрес электронной почты (E-mail) **организации**;

- аннотация на русском и английском языках – в ней четко должны отражаться актуальность, цель, материалы и методы, результаты научного исследования, заключения (выводы), объем – 150–200 слов;

- ключевые слова на русском и английском языках – не более 10–15 слов;

- основной текст статьи (структура): введение, цели и задачи исследования, методы исследования, результаты исследования, выводы (заключение);

- финансирование;

- вклад авторов.

В аннотации и заключении не допускается использование громоздких формул, ссылок на текст работы или список литературы.

Сведения об авторах (на русском и английском языках): фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, название подразделения, полное название места работы (может быть более одного), рабочий адрес, ORCID, SPIN-код E–library.

Для связи с редакцией – **контактный телефон** одного из авторов.

8. Список литературы должен содержать только ссылки на научные статьи (периодические журналы, монографии, труды конференций и т.д.), которые упоминаются в тексте работы, расположенные в порядке цитирования, не менее 15. Ссылки на неопубликованные работы, результаты которых используются в доказательствах, не допускаются. Недопустимо использование ссылок на авторефераты, диссертации, газеты, интернет-сайты журналов, электронные газеты. Список литературы печатается в конце статьи, оформляется в соответствии с правилами, предусмотренными журналом. Все остальные источники, использованные при написании статьи, выносятся в сноски в конце каждой страницы (при необходимости). В списке литературы необходимо указывать не менее 50 % от общего количества источников за последние 5 лет (как самого автора, так и сторонних авторов, работающих в данном направлении; в том числе зарубежных источников), не более 20 % ссылок на собственные работы. Исключение составляют статьи, которые посвящены исследованиям конкретных документов.

В списке литературы должны быть указаны источники по образцу:

• статья – Фамилия И. О. Название статьи // Название журнала. Год. Том. Номер. С. …-… DOI…

• книга – Фамилия И. О. Название книги: монография. Город: Издательство, Год. … с.

• коллективная монография – Фамилия И. О. Название книги / под ред. Фамилия И. О. Город: Издательство, Год. … с.

• статья в сборнике конференций – Фамилия И. О. Название статьи // Название конференции: материалы конференции * / Название организации. Город, Год. С. …-… DOI…

• статья в электронном издании – Фамилия И. О. Название статьи [Электронный ресурс] // Название журнала, Год. Том. Номер. С. …-… URL:… (дата обращения: число, месяц, год).

9. Список литературы **полностью** дублируется на **английском языке** независимо от того, имеются в нем иностранные источники или нет.

Пояснения по формированию Списка литературы и References.

Если статья, на которую указывает ссылка, была переведена на английский язык и опубликована в английской версии журнала, необходимо указывать ссылку из переводного источника! Указания (учебное пособие, монография, перевод, количество томов и т.д.) в References можно опускать. При цитировании оригинального источника на английском языке в названии с прописной буквы пишется первое слово. В названии журнала пишется каждое полнозначное слово с прописной буквы.

Библиографические описания публикаций в References составляют в следующей последовательности:

журнальная статья

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Zaglavie jurnala* [Title of Journal]. Year. Vol. ... No. ...iss. … Pp. ...-… DOI (In Russian);

в случае, если у журнала есть официальное название на английском языке, источник оформляется в таком виде:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Title of Journal*. Year. Vol. ... No. ...iss. … Pp. ...-… DOI (In Russian);

монография, книга, глава из книги, препринт

Author A.A., Author B.B., Author C.C. *Nazvanie* [Title of Book]. Gorod: Izdanie. Year. Pages p. (In Russian);

статья в материалах конференции

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie konferensii.* Gorod, Organizacia. Year. Pages p. (In Russian);

статья в электронном издании

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie zhurnala,* Year, Pages p., available at: http…. (accessed Data Year).

На сайте http://translit-online.ru/ можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста в латиницу.

10. Требования к электронному носителю:

- к статье прилагается электронный вариант в формате Microsoft Office Word 2007, Windows XP, Windows 7, 10;
- статья должна быть набрана в формате А4 с полями: верхнее и нижнее – 2,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2 см, шрифтом Times New Roman, размер 14, полуторный интервал;
- таблицы, алгоритмы, рисунки, схемы и т.п. должны быть редактируемые и выполнены в формате А4 книжной ориентации;
- формулы должны быть набраны в программе MathType, нумеровать следует те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

11. Решение о публикации или отклонении авторских материалов принимается редколлегией в соответствии с правилами рецензирования статей. Для экспертной оценки статей привлекаются ведущие специалисты по основным научным направлениям (рубрикам) выпуска журнала.

12. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

13. В каждом выпуске публикуется, как правило, не более одной статьи одного и того же автора. Решение о публикации более одного материала принимается редакционной коллегией и главным редактором журнала.

14. Статьи, оформленные без соблюдения указанных правил, не рассматриваются.

15. Авторы могут использовать искусственный интеллект (ИИ) при написании текстов, однако при этом они должны указать, если такие технологии применялись, и в какой степени. ИИ может помочь авторам в анализе и визуализации данных, что может повысить качество представленных результатов. Перед направлением статьи в редакцию журнала авторы обязаны проверить материал на корректность и достоверность. Если инструменты ИИ были использованы для сбора данных, анализа или написания текста, это должно быть указано в разделе статьи «Материалы и методы». В случае неуказания автором использования ИИ и его обнаружения в ходе работы со статьей в редакции журнала статья отклоняется.

FORMATTING RULES FOR ARTICLES TO BE SUBMITTED BY AUTHORS TO THE JOURNAL "NEWS OF THE KABARDINO-BALKARIAN SCIENTIFIC CENTER OF RAS"

1. The journal **"News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS"** publishes original scientific, review, analytical articles by domestic and foreign authors, reviews of books and articles, personalities in the following groups of specialties:

1.1. Mathematics and Mechanics; 1.2. Computer Science and Informatics; 1.3. Physical Sciences; 1.6. Earth and Environmental Sciences; 2.3. Information Technologies and Telecommunications; 4.1. Agronomy, Forestry and Water Management; 4.2. Zootechnics and Veterinary Medicine; 5.2. Economics; 5.4. Sociology; 5.5. Political Sciences; 5.6. Historical Sciences; 5.9. Philology.

The journal is intended for researchers, teachers, postgraduate students, undergraduates, students. Frequency – six issues per year. The journal publishes articles in Russian and English with a volume of no less than 8 and no more than 20 pages of the layout format (at least 18 000 characters). Papers exceeding that volume may be accepted for publication by special decision of the Editor-in-chief of the journal.

The journal "News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS" has been added to the Unified State List of Scientific Publications – the "White List", level 4 (decision of the Interdepartmental Working Group on Formation and Update of the "White List" of Scientific journals, September 9, 2025).

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science, for the degree of Doctor of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published, category of the journal – K2 (distribution of journals according to categories, par. 1320):

group of specialties 2.3. Information technology and telecommunications:

2.3.1. System analysis, management and information processing, statistics (technical sciences),

2.3.3. Automation and control of technological processes and productions (technical sciences),

2.3.7. Computer modeling and design automation (physical and mathematical sciences),

2.3.8. Informatics and information processes (technical sciences);

group of specialties 4.1. Agronomy, forestry and water management:

4.1.1. General farming and crop production (agricultural sciences),

4.1.2. Breeding, seed production and plant biotechnology (agricultural sciences),

4.1.3. Agrochemistry, agrosoil science, plant protection and quarantine (agricultural sciences);

group of specialties 5.2. Economy:

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in economics (economic sciences),

5.2.3. Regional and sectoral economics (economic sciences),

5.2.6. Management (economic sciences).

2. Articles are accepted for publication in the journal "News of the Kabardino-Balkarian scientific center of RAS" if they contain new results. Articles should be devoted to topical problems of science, contain a clear statement of the goal and objectives of the study, rigorous scientific argumentation, generalizations and conclusions that are of interest for their novelty, scientific and practical significance. The journal also publishes special issues devoted to conferences of various levels on the subjects of the journal, review articles. It is not allowed

to send to the editorial office articles that have already been published or sent for publication to other journals. The results of other authors used in the article should be duly reflected in the references. Submitting an article to the journal, authors are obliged to fulfill all the requirements of the journal for their formatting.

3. By submitting an article to the journal, each author confirms that it meets the highest standards of publication ethics for authors and co-authors, developed by COPE (Committee on Publication Ethics), see http://publicationethics.org/about. All articles published in the journal are assigned digital object identifiers (DOIs) for better search and identification. Articles submitted to the editorial office are checked for plagiarism through the ***Antiplagiat*** system (https://www.antiplagiat.ru); for acceptance they must have at least 75 % of the uniqueness of the text.

4. Articles accepted for publication in the journal "News of the Kabardino-Balkarian scientific center of RAS" undergo double blind peer review, editorial preparation, after which the final layout is sent for correction. The final version is provided to the author for proofreading. The time period for submitting the article to the author for proofreading is 3 working days.

5. Full-text versions of articles published in the journal are posted on the Internet in free access on the official website of the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU, Scientific electronic library “Cyberleninka”, in the Russian state library, VINITI, Google Scholar. Russian Center for Scientific Information (RCSI). Articles on agriculture are posted on AGRIS. Articles on mathematics, physics, computer science, mathematical modeling in economics and geosciences are posted on the All-Russian portal Math-Net.Ru www.mathnet.ru (https://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=izkab&option_lang=eng). The time for posting of the journal in the web must be within 3 months from the date of issue.

6. Publications in the journal for KBSC RAS employees are free, for outside authors – 500 rubles per page (for providing articles editing and publication services). For reviewers (not members of the editorial board) privileges for publication are provided.

7. Requirements for the manuscript of the article.

The manuscript of the article is submitted together with a covering letter signed by all authors of the article, in which the authors, among other things, confirm that the article submitted to the journal has not been previously published, and has not been submitted for consideration and publication in another journal. The number and composition of authors does not change after submitting an article for reviewing.

Materials are submitted to the Editorial and Publishing Department: 360010, Russia, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Balkarov street, 2, or email: ired07@mail.ru.

All pages, including figures, tables and references, should be numbered.

The following indications in the text of the article are **mandatory**:

- UDC https://teacode.com/online/udc/; ORCID; type of article (scientific, review, analytical, ...); JEL codes (specialty 5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in Economics, 5.2.3. Regional and sectoral economics, 5.2.6. Management); AMS Subject Classification (in the fields of mathematics, computer science, physics);
- the title of the article in Russian and English;
- surname and initials of the author(s) in Russian and English; e-mail of authors (if there are several authors, then indicate * the author responsible for the contact correspondence);
- the full official name of the institution, indicating the full postal address in Russian and English, the electronic mail address (E-mail) of the **organization;**
- abstract in Russian and English – it should clearly reflect the relevance, aim, materials and methods, results of the scientific research, conclusions (conclusion), volume – 150–200 words;
- keywords in Russian and English – no more than 10–15 words;

- main text of the article (structure): introduction, goals and objectives of the research, research methods, research results, conclusions;

- financing;

- contribution of the authors.

The abstract and conclusion should not contain cumbersome formulas, references to the text of the work or the list of references.

Information about the authors (both in Russian and English): last name, first name, patronymic, academic degree, academic title, position, department name, full name of the place of work (there may be more than one), work address, contact phone number, ORCID, SPIN-code E–library.

The contact phone number of one of the authors to contact the editorial office.

8. The list of references should contain only links to scientific articles (periodicals, monographs, conference proceedings, etc.) to which there are references in the text of the work, arranged in the order of citation, not less than 15. References to unpublished works, the results of which are used in the proofs, are not allowed. It is unacceptable to use links to abstracts, dissertations, newspapers, websites of journals, electronic newspapers. The list of references is printed at the end of the article, drawn up in accordance with the rules provided by the journal. All other sources used in the article are placed in footnotes at the end of each page (if necessary). At least 50 % of the total number of sources in the list of references should be of the last 5 years (both the author's himself and other authors working in this direction as well as foreign sources) and not more than 20 % references to own works. The exception is made for articles that are devoted to the study of specific documents.

In the list of references, sources should be indicated according to the sample:

• article – Surname and initials of the name and patronymic. Title of the article // Title of the journal. Year. Volume. Number. Pp. ... - ... DOI ...

• book – Surname and initials of the name and patronymic. Book title: monograph. City: Publisher, Year. … p.

• collective monograph – Surname and initials of the name and patronymic. Title of the book. editor – Surname and initials of the name and patronymic. City: Publisher, Year. … p.

• article in the collection of conference materials – Surname and initials of the name and patronymic. Title of the article // Title of the conference: materials of the conference * / Name of the organization. City, Year. Pp. ... - ... DOI

• article in the electronic edition – Surname and initials of the name and patronymic, The title of the article [Electronic source] // Journal name, Year. Volume. Number. Pp.… -… URL:… (date of access: date, month, year).

9. The list of references is **fully** duplicated in **English,** regardless of whether it contains foreign sources or not.

Explanations on the formation of the list of literature and References.

If the article to which the reference points was translated into English and published in the English version of the journal, you must provide the link from the translated source! Descriptions (tutorial, monograph, translation, number of volumes, etc.) in References may be omitted. When citing an original source in English, the first word is capitalized in the title. Each full-valued word is capitalized in the title of the journal.

Bibliographic descriptions of publications in References are in the following sequence:

journal article

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Zaglavie jurnala* [Title of Journal]. Year. Vol. ... No. ...iss. … Pp. ...-… DOI (In Russian);

if the journal has an official name in English, then the reference is formatted in the following way:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Title of Journal*. Year. Vol. ... No. ...iss. … Pp. ...-… DOI (In Russian);

monograph, book, chapter from a book, preprint

Author A.A., Author B.B., Author C.C. *Nazvanie* [Title of Book]. Gorod [City], Izdanie [Publisher]. Year. Pages p. (In Russian);

article in conference materials

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Nazvanie [Title of paper]. *Nazvanie konferensii* [Title of the conference]. Gorod [City], Organizacia [Organization]. Year. Pages p. (In Russian);

article in electronic edition

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie zhurnala,* Year, Pages p., available at: http…. (accessed Data Year).

On the site http://translit-online.ru/ you can use the program of transliteration of the Russian text into the Latin alphabet for free.

10. Requirements for electronic media:

- an electronic version in the format of Microsoft Office Word 2007, Windows XP, Windows 7, 10 is attached to the article;
- the article should be typed in A4 format with margins: top and bottom – 2.0 cm; left – 2.5 cm; right – 2 cm, the article should be typed in Times New Roman, size 14, one and a half spacing;
- editable tables, algorithms, figures, diagrams, etc. must be in A4 format, portrait orientation;
- Equations must be typed using the MathType program and equations that are referenced in the text should be numbered.

11. The decision to publish or reject author(s) materials is made by the editorial board in accordance with the rules for reviewing articles. Leading experts in the main scientific directions (headings) of the journal are involved in the expert assessment of the articles.

12. The editorial office does not enter into discussions with the authors of the rejected materials.

13. As a rule no more than one article by one and the same author is published in an issue. The decision to publish more than one material is made by the editorial board and the chief editor of the journal.

14. Articles violating these formatting rules are not considered.

15. Authors can use artificial intelligence (AI) in their writing, but they should disclose if such technologies were used and to what extent. AI can assist authors in analyzing and visualizing data, which may enhance the quality of the results presented. Before submitting an article to the journal's editorial office, authors are required to ensure that the material has been checked for accuracy and reliability. If AI-powered tools were used for data collection, analysis, or text generation, this should be clearly indicated in the "Materials and Methods" section of the paper. Failure to disclose the use of AI may result in the article being rejected if it is discovered during the review process.

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

Том 28 № 1 2026

Сквозной номер выпуска – 129

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

Зав. редакционно-издательским отделом КБНЦ РАН – ***А. М. Бейтуганова***

Компьютерная верстка – ***А. И. Токова***

Техническое редактирование – ***А. И. Токова***

Корректор – ***Л. Б. Канукоева***

Перевод – ***М. А. Дышекова***

ISSN 1991-6639

9 771991 663000 >

Подписано в печать 20.02.2026 г. Дата выхода в свет: 27.02.2026 г.
Формат бумаги 60x84 1/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 36,04. Тираж 300 экз.

Цена свободная

Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77-90616 от 29.12.2025 выдано Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Учредитель: Кабардино-Балкарский научный центр РАН

Адрес редакции и издателя: 360010, КБР, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2





DOI: 10.35330/1991-6639