

Print ISSN 1991-6639
Online ISSN 2949-1940

Том 28 № 3



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 № 3 2026

Сквозной номер выпуска – 131

Журнал основан в 1998 г. Выходит 6 раз в год

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

Регистрационный номер СМИ Эл № ФС 77-90616 от 29.12.2025 выдан 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. 3 2026

Continuous issue number – 131

The journal was founded in 1998, 6 issues per year

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

Media Registration No. FS 77-90616, dated December 29, 2025, issued by the Federal Service
for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

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 № 3 2026

Редакционная коллегия	5
------------------------------------	---

Компьютерные науки и информатика

Искусственный интеллект и машинное обучение

Концептуальные основы создания системы имитационного проектирования физико-химических характеристик робототехнических изделий <i>К. Ч. БЖИХАТЛОВ, И. А. ПШЕНОКОВА</i>	11
--	----

Информационные технологии и телекоммуникации

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Параметрический синтез непрерывных САУ с неоднозначными нелинейными характеристиками <i>Н. Л. ГРЕЧКИН, Е. Ю. БАТАЕВА</i>	23
---	----

Построение единого информационного пространства системы управления производственным оборудованием в территориально распределенных энергетических компаниях <i>А. Р. ДЕНИСОВ, А. Е. НИКУЛИН, Р. В. МИХАЙЛОВ, В. МИРИДАШТАКИ</i>	34
---	----

Прогнозирование нагрузки на каждый час суток с помощью PatchTST и Temporal Fusion Transformer: сравнительный системный анализ с традиционными методами бустинга (CatBoost) и нейросетевыми моделями на базе N-HiTS <i>А. Э. ДЗГОЕВ, Е. В. КЛИМКИН, В. В. ЧЕРНЯУСКАС, А. В. БРАЙЛОВСКИЙ, Р. Н. РЕЗЕНЬКОВ</i>	49
--	----

Веб-приложение для диагностики опухолей головного мозга на основе сверточных нейронных сетей <i>М. Р. КИЯСОВ, И. А. ПШЕНОКОВА</i>	71
--	----

Анализ используемых технологий межмодульного взаимодействия в одноплатных многопроцессорных системах <i>А. В. СМИРНОВ</i>	84
--	----

Программно-алгоритмическая поддержка процессов обработки и анализа электронных нормативных документов в области информационной безопасности <i>И. Р. ЧЕКАНОВ, А. С. КУЗНЕЦОВ, С. В. ПИВНЕВА</i>	96
--	----

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Имитационное моделирование системы управления смесителями комбикорма <i>А. М. ТРАМОВА, Н. В. МОКРОВА, В. С. АРТЕМЬЕВ</i>	107
---	-----

Информатика и информационные процессы

Архитектура и методы построения интеллектуальной системы мониторинга центра оператора безопасности <i>В. Р. ИКСАНОВ, С. В. ДАРАГАН</i>	122
---	-----

Агрономия, лесное и водное хозяйство

Общее земледелие и растениеводство

Влияние нормы высева и экспозиции склона на продуктивность гибрида кукурузы Шихан в условиях Бугульмино-Белебеевской возвышенности

*Б. Г. АХИЯРОВ, Г. Р. АБДУЛВАЛЕЕВА,
Р. Р. АБДУЛВАЛЕЕВ, Л. М. АХИЯРОВА, Б. Х. ГАЗИЗОВ*.....132

Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

Оценка влияния сроков использования антидота Лигноумат при химической прополке посевов озимой пшеницы на аминокислотный состав зерна

*Л. А. АЛАКАЕВА, А. Х. ЗАНИЛОВ, М. Р. АЗНАЕВА,
А. М. ЛЕШКЕНОВ, Т. Б. ШАЛОВ*.....143

Динамика содержания азота, фосфора и калия в черноземе обыкновенном и роль минеральных удобрений в повышении урожайности и улучшении качественных показателей зерна озимой пшеницы

*А. Ю. ОЖЕРЕДОВА, В. Н. СИТНИКОВ, А. Н. ЕСАУЛКО,
В. А. БОРОДИН, М. Ю. АЗАРОВА*.....153

Биометрическое обоснование эффективности роботизированной СВЧ-системы предпосевной обработки почвы: вегетационный опыт с кукурузой

Марат А. ШЕРЕУЖЕВ, Мадин А. ШЕРЕУЖЕВ, А. Ю. КИШЕВ.....165

Экономика

Региональная и отраслевая экономика

Модели и методы прогнозирования объемов потребления энергоресурсов в экономике Российской Федерации до 2030 года

Н. Н. ВОЛОДИНА, М. В. КРОТОВА.....181

Теоретические модели миграции врачей, устойчивое развитие региона и их проявление в контексте Кабардино-Балкарской Республики

А. Х. ДУМАНОВА, М. М. КАМБИЕВ.....193

Перспективы развития биоэкономики в Российской Федерации

Н. И. КОМКОВ, Н. Н. ЛАНТЕР.....205

Анализ потребительского поведения в Санкт-Петербурге на рынке услуг частных байеров: выгоды, доверие и риски

Г. Ю. МИТЯШИН, К. П. КОРНИЛОВА, А. В. ФИЛАТОВА.....217

Некролог

Георгий Борисович Клейнер (08.05.1946 – 04.06.2026).....239

Правила для авторов журнала.....241

CONTENTS

News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS Vol. 28 No. 3 2025

Editorial Board	5
------------------------------	---

Computer Science and Information Technology

Artificial intelligence and machine learning

Conceptual foundations for simulating the physical and chemical properties in robotic systems design <i>K.Ch. BZHIKHATLOV, I.A. PSHENOKOVA</i>	11
--	----

Information Technologies and Telecommunications

System analysis, management and information processing, statistics

Parametric synthesis of continuous control systems with hysteresis nonlinearities <i>N.L. GRECHKIN, E.Yu. VATAEVA</i>	23
--	----

Building a unified information space for the enterprise asset management system in distributed energy companies <i>A.R. DENISOV, A.E. NIKULIN, R.V. MIKHAILOV, V. MIRIDASHTAKI</i>	34
--	----

Hourly load forecasting via PatchTST and Temporal Fusion Transformers: comparative system analysis with CatBoost and N-HiTS network models <i>A.E. DZGOEV, E.V. KLIMKIN, V.V. CHERNYAUSKAS, A.V. BRAILOVSKY, R.N. REZENKOV</i>	49
--	----

Web application for brain tumor diagnosis based on convolutional neural networks <i>M.R. KIYASOV, I.A. PSHENOKOVA</i>	71
---	----

Analysis of inter-module communication technologies in single-board multiprocessor systems <i>A.V. SMIRNOV</i>	84
--	----

Software and algorithmic support for processing and analyzing electronic regulatory documents in information security <i>I.R. CHEKANOV, A.S. KUZNETSOV, S.V. PIVNEVA</i>	96
--	----

Automation and control of technological processes and productions

Simulation modeling of a feed mixer control system <i>A.M. TRAMOVA, N.V. MOKROVA, V.S. ARTEMYEV</i>	107
--	-----

Informatics and information processes

Architecture and methods for building an intelligent monitoring system for operator safety centers <i>V.R. IKSANOV, S.V. DARAGAN</i>	122
--	-----

Agronomy, Forestry and Water Management

General farming and crop production

Influence of seeding rate and slope aspect on the productivity of 'Shikhan' corn hybrid in the Bugulma-Belebey Upland

*B.G. AKHIYAROV, G.R. ABDULVALEEVA, R.R. ABDULVALEEV,
L.M. AKHIYAROVA, B.Kh. GAZIZOV*.....132

Agrochemistry, agrosoil science, plant protection and quarantine

Impact of Lignohumate antidote application timing on the amino acid composition of winter wheat grain during chemical weeding

*L.A. ALAKAEVA, A.Kh. ZANILOV, M.R. AZNAEVA,
A.M. LESHKENOV, T.B. SHALOV*.....143

NPK in ordinary chernozem and the role of mineral fertilizers in enhancing winter wheat yield and grain quality

*A.Yu. OZHEREDOVA, V.N. SITNIKOV, A.N. ESAULKO,
V.A. BORODIN, M.Yu. AZAROVA*.....153

Biometric substantiation of the efficacy of pre-sowing microwave soil treatment: a pot experiment using maize

Marat A. SHEREUZHEV, Madin A. SHEREUZHEV, A.Yu. KISHEV.....165

Economy

Regional and sectoral economics

Models and methods for forecasting energy consumption in Russian economy until 2030

N.N. VOLODINA, M.V. KROTOVA.....181

Physician migration and regional sustainable development: a case study of the Kabardino-Balkarian Republic

A.Kh. DUMANOVA, M.M. KAMBIEV.....193

Perspectives on bioeconomy development in the Russian Federation

N.I. KOMKOV, N.N. LANTER.....205

Consumer behavior analysis in the market of private buying agents' services in Saint Petersburg: benefits, trust, and risks

G.Yu. MITYASHIN, K.P. KORNILOVA, A.V. FILATOVA.....217

Obituary

Georgy Borisovich Kleiner (08.05.1946 – 04.06.2026).....239

Publishing regulations for the authors 241

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 Магомедовна, 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 Хасанович, 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

Гукеев 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

Кибилов 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

Махосева 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. Dзамikhov, 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 Computer Science and Problems of Regional Management – 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 Computer Science and Problems of Regional Management – 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

УДК 004.853

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-11-22>

 EXNDXR

Концептуальные основы создания системы имитационного проектирования физико-химических характеристик робототехнических изделий

К. Ч. Бжихатлов, И. А. Пшенокова[✉]

Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. В статье рассматривается проблема разработки комплексной системы имитационного моделирования физико-химических свойств для проектирования робототехнических систем.

Цель исследования – разработка модульной многомодальной системы моделирования физико-химических свойств для интеллектуальной коллаборативной системы проектирования и прототипирования изделий и устройств робототехники с возможностью настройки требуемой точности и вычислительной сложности моделирования.

Методы исследования. В качестве основных методов исследования применяются мультиагентные системы и имитационное моделирование. Предложена концепция использования интеллектуальных программных агентов для моделирования физико-химических свойств, основанная на нейрокогнитивных архитектурах.

Результаты. В работе представлен комплексный подход к проектированию изделий робототехники, основанный на совместной работе человеко-машинного коллектива. Разработана архитектура системы, состоящая из трех основных групп модулей: моделирование свойств, поведения и визуализация. Особое внимание уделяется созданию подсистемы моделирования физико-химических процессов, реализованной в виде серверной архитектуры с возможностью обмена данными между различными модальностями. Для обмена информацией между отдельными подпрограммами вводятся «узлы обмена сообщениями», являющиеся отдельными открытыми каналами обмена сообщениями с возможностью подключения редактора мультиагентных архитектур, пользователя и системы управления базами данных.

Заключение. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента, позволяющего обеспечить комплексное моделирование физических, химических и информационных процессов при проектировании роботов. Применение модульной многомодальной системы моделирования физических взаимодействий, химических процессов и информационных потоков данных с возможностью обмена данными между модальностями позволит обеспечить достаточную полноту модели и гибкость в настройке САПР с целью подбора требуемой точности и вычислительной сложности процесса моделирования. Использование интеллектуальных систем прогнозирования физико-химических свойств объектов может обеспечить процесс разработки без необходимости самостоятельного описания всех возможных физических процессов, связанных с эксплуатацией разрабатываемого узла робота.

Ключевые слова: мультиагентные системы, искусственный интеллект, САПР, робототехника, моделирование физических процессов, цифровое проектирование

Поступила 14.04.2026, одобрена после рецензирования 13.05.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А. Концептуальные основы создания системы имитационного проектирования физико-химических характеристик робототехнических изделий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 11–22. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-11-22

© Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Conceptual foundations for simulating the physical and chemical properties in robotic systems design

K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova✉

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

Abstract. This article addresses the problem of developing a comprehensive system for simulating physical and chemical properties in the design of robotic systems.

Aim. To develop a modular, multimodal physical and chemical property modeling system integrated into an intelligent collaborative platform for designing and prototyping robotic devices, featuring configurable simulation accuracy and computational complexity.

Methods. The research utilizes multi-agent systems and simulation modeling as its primary methodological framework. A concept of neurocognitive architecture-based intelligent software agents is proposed for modeling physical and chemical properties.

Results. The paper presents an integrated approach to robotic systems design based on human-machine teaming. A system architecture has been developed, which includes three main module groups for property modeling, behavior, and visualization. Particular attention is paid to developing the physical and chemical process modeling subsystem, implemented as a server-based architecture with cross-modality data sharing capabilities. To exchange information between individual subroutines, "messaging nodes" are introduced, representing separate open communication channels capable of connecting a multi-agent architecture editor, a user, and a database management system.

Conclusion. The practical significance of this work is the development of a versatile tool for the comprehensive simulation of physical, chemical, and information processes in robotic systems design. Utilizing a modular, multimodal system for physical, chemical, and informational workflows ensures comprehensive model fidelity and CAD flexibility, allowing users to balance accuracy against computational complexity. Intelligent prediction of physical and chemical properties simplifies robotic design by removing the requirement to manually define every physical process involved in the system's operation.

Keywords: multi-agent systems, artificial intelligence, CAD, robotics, modeling of physical processes, digital design

Submitted 14.04.2026,

approved after reviewing 13.05.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A. Conceptual foundations for simulating the physical and chemical properties in robotic systems design. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 11–22. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-11-22

ВВЕДЕНИЕ

Процесс проектирования любых сложных технических изделий, в том числе узлов для робототехники, является сложной задачей, которая охватывает анализ требований, предварительное проектирование, детальное 3D-моделирование, симуляцию и тестирование, и требует использования комплекса специализированного программного обеспечения, в том числе и систем автоматизированного проектирования (САПР). В условиях перехода к принципам «Индустрии 5.0» [1], где робот рассматривается как интегрированный элемент гибкой производственной системы, традиционные подходы к автоматизированному проектированию сталкиваются с новыми вызовами. В условиях усложнения конструкций и

расширения сфер применения роботов критически важно на этапе проектирования прогнозировать поведение материалов и узлов в реальных эксплуатационных режимах. Существующие системы фокусируются на отдельных аспектах: геометрическом моделировании (CAD), инженерном анализе (CAE) или технологической подготовке производства (CAM), что увеличивает длительность цикла разработки. При этом высокий уровень сложности разработки приводит к необходимости работы в гетерогенных коллективах, состоящих из различных специалистов и системы искусственного интеллекта.

Существует несколько подходов к представлению геометрических моделей в системах проектирования (точечная, каркасная, граничная, конструктивная и воксельная модели), среди которых наибольшее распространение получила граничная модель (она же Boundary REPresentation) [2].

В работе [3] представлен интегрированный метод проектирования и моделирования мехатронных систем, способный осуществлять полную синхронизацию и верификацию моделей, генерацию геометрических решений и визуальное представление. Методология базируется на системной интеграции имитационного и геометрического моделирования с использованием стандарта SysML (Systems Modeling Language) как унифицированной платформы представления знаний. Разработанный фреймворк позволяет осуществлять извлечение системных данных через формализованные картографические правила (mapping rules), генерацию промежуточных моделей для сравнительного анализа проектных альтернатив и имитационного моделирования, что позволяет параллельно выполнять процесс проектирования по верификациям симуляции с частью проектирования архитектуры системы.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является обеспечение сквозной прослеживаемости проектных решений на всех этапах жизненного цикла разработки мехатронной системы из-за единой модель-ориентированной среды проектирования. Однако есть проблемы интеграции SysML-моделей с CAD/CAE-системами (AutoCAD, ANSYS, SolidWorks) из-за различия в форматах данных и семантике.

Вопрос об использовании имитационного моделирования при исследовании сложных биофизических систем с использованием нейронных сетей исследуется в работе [4]. Авторами проведен аналитический обзор нейросетевых подходов к имитационному моделированию экспериментальных данных при исследовании сложных биомолекулярных систем методами флуоресцентной спектроскопии. В [5] дается описание создания систем поддержки принятия решений при проектировании химико-технологических систем на этапе их аппаратного оформления. Каждая стадия аппаратного оформления осуществляется с использованием информационной модели, позволяющей преобразовать входной информационный поток в выходной.

В работе Массачусетского технологического института [6] представлена модель интуитивной физики ADEPT («Approximate Derenderer, Extended Physics, and Tracking»), где восприятие физической реальности разделено на несколько этапов: извлечение кадров, сбор информации, симуляция поведения системы в физическом 3D-движке, анализ поведения и сравнение с эталонным. Результаты тестирования показали, что ADEPT превосходит стандартные сетевые архитектуры в распознавании физически неправдоподобных сцен и часто выполняет это различие на том же уровне, что и человек.

Одним из перспективных направлений, стремительно развивающихся в последние годы, является генеративное проектирование [7]. Этот подход представляет собой автоматизированный процесс проектирования, основанный на алгоритмах оптимизации, которые стремятся удовлетворить множеству критериев и ограничений, поставленных пользователем, с целью

минимизации либо максимизации определенной целевой функции (такой как масса, себестоимость, максимальный сдвиг, коэффициент запаса прочности). Генеративное проектирование реализуется на предгенеративном, генеративном и послегенеративном этапах. Ключевым преимуществом генеративного проектирования является способность автоматически формировать и сравнивать множество конфигураций конструкции, выбирая оптимальный вариант с наименьшей массой, максимальной экономичностью производства и высокими показателями прочности. Однако внедрение генеративного проектирования сопряжено с необходимостью мощного вычислительного ресурса и специализированных пакетов программного обеспечения, таких как ANSYS и Autodesk Fusion 360. Эффективность такого подхода иллюстрируется рядом успешных практических экспериментов. Так, в работе [8] проведено сравнение традиционных рам квадрокоптеров с результатами генеративного проектирования, продемонстрировавшими улучшение показателей устойчивости и снижение общего веса. Аналогичные успехи зафиксированы в исследованиях роботизированных рук [9–12].

Кроме ANSYS, для имитационного моделирования физико-химических процессов в робототехнике используются программные пакеты: COMSOL Multiphysics, MATLAB/Simulink и Gazebo [13, 14]. Однако выбор инструмента зависит от решаемой задачи. COMSOL подходит для мультифизического моделирования, Simulink – для моделирования динамических систем и автоматического управления, а Gazebo – для симуляции роботов и их взаимодействия с окружением. Так, в работах [15, 16] COMSOL Multiphysics использовался для моделирования молниеносного импульса, приложенного к носу, крыльям и фюзеляжу беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Также в работах [17–19] для управления движением роботов, которое включает в себя аппаратные и программные системы различного назначения, используется MATLAB/Simulink – среда графического программирования, предназначенная для моделирования, симуляции и анализа динамических систем. В работах [20–23] для симуляции и тестирования алгоритмов управления и навигации автономных и коллективов роботов используется Gazebo – симулятор с поддержкой 3D-визуализации, реалистичной физики и интеграцией с операционной системой для роботов ROS (Robot Operating System).

Однако представленные выше системы проектирования имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение в сложных задачах. Основные недостатки существующих систем (CAD/CAE) при проектировании физико-химических свойств узлов роботов сводятся к отсутствию межпакетной и междисциплинарной интеграции. Для комплексного анализа часто приходится комбинировать несколько программных пакетов (CAD, CAE, PLM), что усложняет рабочий процесс, повышает риск ошибок и требует дополнительной настройки. Кроме того, большинство систем фокусируются на форме (CAD), а химический состав и микроструктура материала часто задаются как «усредненные» константы из библиотек. Сложно точно предсказать, как химическая деградация (коррозия, окисление, воздействие радиации) изменит механическую прочность узла в динамике.

При моделировании сложных трехмерных систем или мультифизических процессов расчеты требуют значительных вычислительных мощностей, что увеличивает время разработки и затраты на оборудование. Для снижения вычислительной нагрузки системы используют упрощенные физические модели (дискретизация пространства, аппроксимация свойств материалов), что может приводить к потере точности результатов, что затрудняет оценку надежности и границ применимости модели. Многие из проблем постепенно устраняются за счет развития алгоритмов, облачных вычислений и интеграции ИИ, но на текущий момент они остаются актуальными для большинства инженерных задач.

Целью исследования является разработка модульной многомодальной системы моделирования физико-химических свойств для интеллектуальной коллаборативной системы проектирования и прототипирования изделий и устройств робототехники с возможностью настройки требуемой точности и вычислительной сложности моделирования.

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Рассматриваемая в работе система моделирования физико-химических свойств является частью разрабатываемой интеллектуальной коллаборативной системы проектирования и прототипирования изделий и устройств робототехники и описанной в [24]. Подобная система предполагает комплексный подход к проектированию и прототипированию изделий робототехники с использованием совместной работы гетерогенного человеко-машинного коллектива. Подсистема моделирования должна обеспечивать комплексное моделирование различных процессов, необходимое для построения наиболее полного «цифрового двойника» разрабатываемого робота.

Подсистема состоит из набора модулей, которые можно разделить на три группы: моделирование свойств, поведения и визуализация. Под моделированием свойств понимается математическое или имитационное моделирование свойств объекта, связанных с определенной модальностью (например, теплопередача конструктивных элементов робота). Моделирование поведения зависит от внешних сигналов (команд оператора или интеллектуальной системы управления) и связанных с ними изменений состояния (например, была включена система охлаждения). Результат работы этих двух модулей передается на модуль визуализации и выгрузки данных. Общая структура подобной многомодальной системы моделирования приведена на рис. 1.

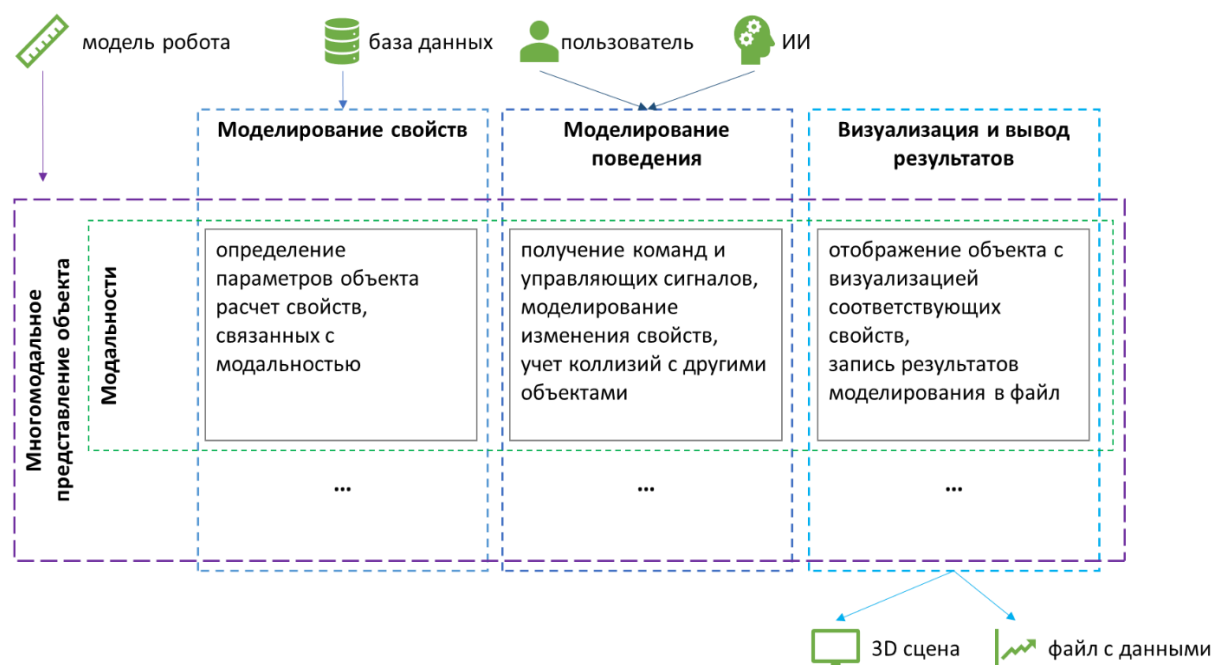


Рис. 1. Структура многомодальной системы моделирования физико-химических свойств моделируемых объектов

Fig. 1. Structure of the multimodal system for physical and chemical property modeling

При этом для каждой модальности должен быть реализован модуль моделирования свойств, через который загружаются необходимые данные о модели из общей базы данных и рассчитываются соответствующие характеристики модели. Модальности могут влиять друг на друга (за счет обмена данными). К модальностям можно отнести:

- моделирование кинематики;
- теплопередача;
- деформация конструкции;
- воздействие среды;
- износ и стирание;
- химическое взаимодействие узлов.

В программе подобная система реализована в виде отдельных подпрограмм, осуществляющих передачу данных друг другу. Например, моделирование механики и теплопередачи определенного узла представляет собой набор подпрограмм моделирования управляющего сигнала, построения объемной модели, моделей поверхности и запуска системы визуализации. Подобная структура при моделировании отдельного узла робота показана на рис. 2. Объемная модель отвечает за моделирование перемещения объекта, расчета деформации и учета процессов теплопереноса. Модели поверхности участвуют в расчете коллизий и учете трения (для внесения корректив в перемещение узла и для учета выделения тепла). Все полученные данные, а также информация о внешнем виде узла используются при визуализации объекта.



Рис. 2. Пример структуры модальностей при моделировании отдельного узла робота

Fig. 2. Example of the modality structure for modeling an individual robotic unit

Подсистема моделирования физико-химических процессов реализована в виде сервера, на котором развернут набор модулей, отвечающих за разные модальности (рис. 3). Для обмена информацией между отдельными подпрограммами вводятся «узлы обмена сообще-

ниями», представляющие собой отдельные открытые каналы обмена сообщениями с возможностью подключения различных подпрограмм (по аналогии с *topic* в операционной системе ROS2 [25]). При этом допустимые структуры сообщений определяются узлом. Эти узлы обеспечивают обмен сообщений, связанных с определенными модальностями (или группами модальностей) для обмена информацией между программой-редактором, внешними программными агентами и внутренними подпрограммами на сервере. В качестве подпрограмм могут выступать как обычные системы компьютерного моделирования различных физических процессов, так и системы прогнозирования поведения на основе искусственного интеллекта, основанного на различных формализмах (например, нейронные сети, логические модели, эволюционные алгоритмы и мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры). Все эти данные также собираются в общую модель («цифрового двойника») и сохраняются в базе данных сервера.

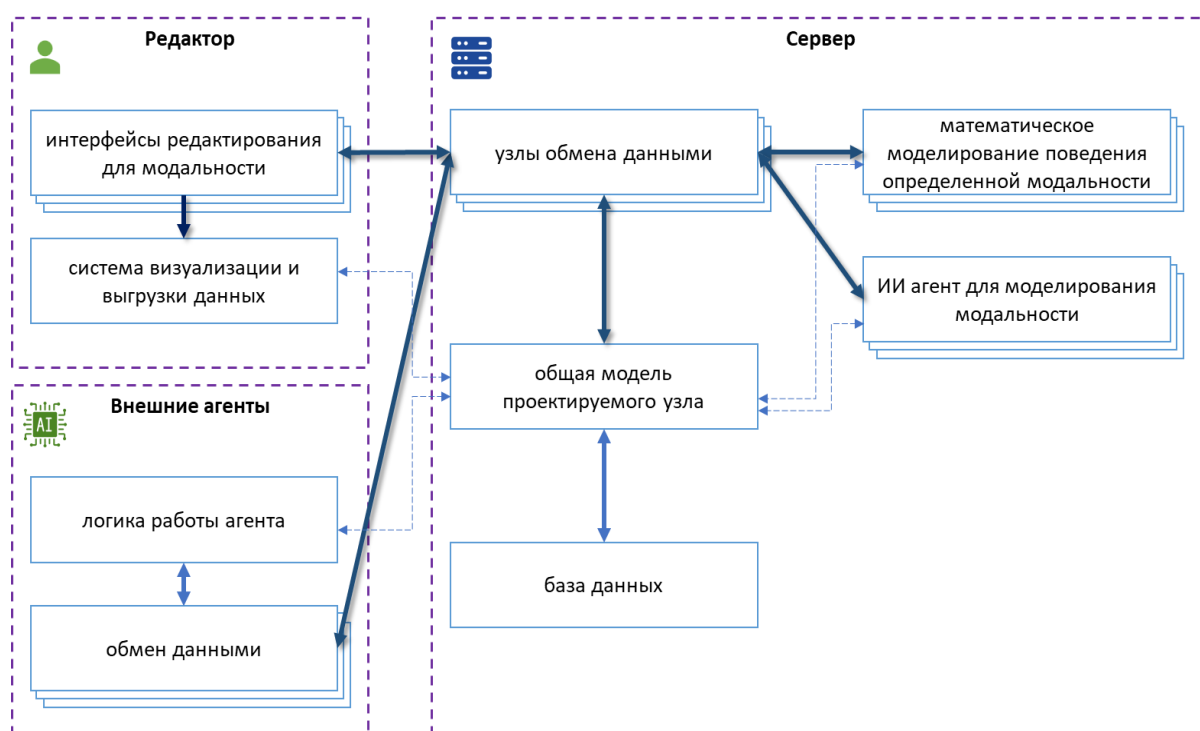


Рис. 3. Схема программной реализации подсистемы моделирования физико-химических процессов в интеллектуальной системе проектирования изделий и узлов робототехники

Fig. 3. Software architecture of the physicochemical process modeling subsystem within an intelligent robotic design environment

В свою очередь в программе редактирования для каждой из модальностей разработана своя часть интерфейса пользователя, которая позволяет вносить изменения в определенный аспект модели и обмениваться данными с сервером и системой визуализации. Похожим образом реализовано взаимодействие с внешними программными агентами (в том числе и агентами на основе ИИ). Стоит отметить, что клиент-серверная архитектура не ограничивает количество подключенных внешних пользователей (редакторов и агентов), а использование общих узлов обмена данными позволяет реализовать множество независимых подпрограмм моделирования поведения различных модальностей.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ МУЛЬТИАГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ И УСТРОЙСТВ

В программе проектирования, кроме отдельных подпрограмм, моделирующих отдельные аспекты разрабатываемого узла, предполагается использование интеллектуальных программных агентов моделирования физико-химических свойств на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур [26]. Особенностью предложенного подхода является то, что структурная и функциональная организация программных агентов демонстрирует существенное сходство с принципами работы человеческого мозга.

Мультиагентная модель позволяет реализовать систему онтологизации внешней среды, которая будет автоматически заполняться информацией об объектах, их характеристиках и взаимодействии. Например, появление агента-объекта и агента-действия позволяет заключить между ними контракт (объект – что делает – действие), после чего эти два агента инициируют создание агента-события. При этом каждый агент имеет ряд возможных контрактов (валентностей), которые стремится заключить. В частности, это свойства объекта, признаки действия и события. Для события это чаще всего время и место фиксации, а также некоторая эмоциональная оценка, на базе которой строится дальнейший план реагирования. Свойства объектов и признаки действия могут заключать контракты с числительными, отвечающими за конкретное измерение признака (температуру объекта или скорость действия). Большая часть агентов создается после получения сигналов с соответствующих сенсоров. Общая структура мультиагентного представления объекта, действия и события приведена на рис. 4, а пример архитектуры для события «манипулятор переместился» показан на рис. 5.

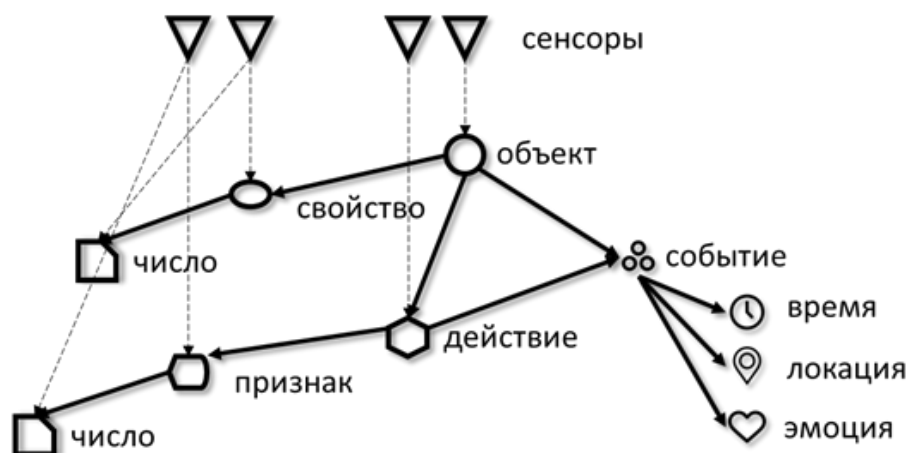


Рис. 4. Архитектура интеллектуального агента

Fig. 4. Intelligent agent architecture

В представленном примере сенсоры (например, камера) фиксируют наличие манипулятора и факт его перемещения. В результате создается агент-объект «манипулятор» и агент-действие «перемещается», которые заключают контракт на запрос «что делает?». Затем они вместе путем отправки сообщений создают агент-событие «манипулятор переместился», который уже в свою очередь заключает контракты с агентом-локацией (на запрос «где?») и агентом времени («когда?»). Параллельно с этим происходит процесс заполнения различных контрактов агента «манипулятор», связанных с его свойствами и присутствующими сенсорами. В частности, определяются цвет, масса, температура и текстура объекта. Подобным образом заполняются контракты между действием «перемещается» и его признаками, связанными с генерируемым звуком и скоростью действия.

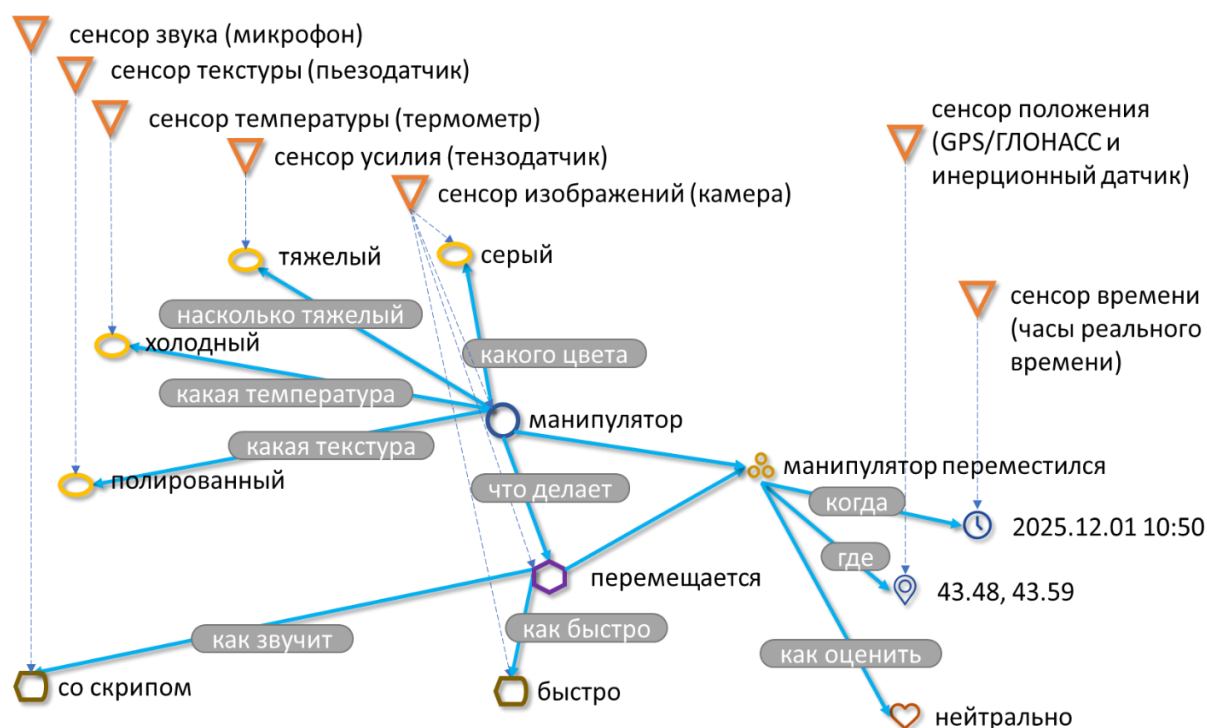


Рис. 5. Пример заполнения свойств и признаков для объекта «манипулятор» и действия «перемещается»

Fig. 5. Example of property and attribute definitions for the "manipulator" object and "moves" action

Заполнение такой онтологии является основой для дальнейшего построения мультиагентной модели внешнего мира. После фиксации множества событий в реальном мире мультиагентная модель может строить и группировать причинно-следственные связи между агентами-событиями («событие-почему-событие» и «событие-поэтому-событие»), что в дальнейшем позволит определять закономерности реального мира без необходимости явного описания математической модели процесса. То есть мультиагентная архитектура будет строить причинно-следственные связи на базе опыта, оценивая сначала конкретные ситуации («тяжелый манипулятор упал-поэтому-корпус из пластика деформировался») и затем переходя к обобщению («тяжелый узел упал с высоты более 100 см-поэтому-детали из пластика толщиной менее 10 мм погнулись»). Это позволит реализовать интеллектуальную систему моделирования различных физико-химических процессов, используя сбор данных интеллектуальными агентами, наблюдающими за процессом сборки и работы автономных роботов, и в будущем позволит снизить вычислительную нагрузку и обойтись без ручной разметки данных. На данном этапе ведется разработка базовых архитектур, моделирующих работу основных функциональных систем человеческого мозга.

Стоит отметить, что обучение подобной системы интеллектуального моделирования физико-химических процессов не требует разметки значительного объема данных в обучающей выборке, но при этом не исключает необходимости обеспечения сбора данных из широкого спектра источников. В частности, наиболее логичной будет реализация федеративной системы обучения с использованием сбора информации из всех доступных сенсоров (камеры роботов, сенсорные подсистемы промышленных предприятий).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка комплексной системы моделирования для коллаборативного интеллектуального САПР является необходимым элементом для развития инструментов проектирования современных изделий робототехники. В рамках исследования предложена концепция модульной многомодальной системы моделирования физических, химических и информационных процессов при проектировании роботов с возможностью обмена данными между модальностями. Такая архитектура призвана обеспечить достаточную полноту модели и гибкость настройки САПР, позволяя подбирать требуемую точность и вычислительную сложность процесса моделирования в зависимости от задачи.

На следующем этапе планируется экспериментальная апробация предложенной системы, в частности, тестирование точности моделирования на тестовых моделях робототехнических узлов и оценка вычислительной эффективности и масштабируемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Emiliani F., Bajrami A., Costa D.M. et. al. Design and prototyping of a collaborative station for machine parts assembly. *Machines*. 2024. Vol. 8. P. 572. DOI: 10.3390/machines12080572
2. Конопацкий Е. В., Ротков С. И., Лагунова М. В., Безсольников М. В. Подход к твёрдотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении // *Онтология проектирования*. 2025. Т. 15. № 1(55). С. 24–33. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33
3. Konopatsky E.V., Rotkov S.I., Lagunova M.V., Bezsolnov M.V. An approach to solid-state modeling of geometric objects in point calculus. *Ontology of Designing*. 2025. Vol. 15. No.1(55). Pp. 24–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33. (In Russian)
4. Chu Ch., Zhang Ch., Yin Ch. Synchronous integration method of mechatronic system design, geometric design, and simulation based on SysML. *Computer-Aided Design*. 2024. Vol. 174. P. 103735. DOI: 10.1016/j.cad.2024.103735
5. Yatskou M.M., Apanasovich V.V. Simulation modelling and data mining approach for the study of applied fluorescence spectroscopy systems. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2024. Vol. 1. Pp. 4–15.
6. Мокрозуб В. Г., Альсаиди А. А. М. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника // *Онтология проектирования*. 2024. Т. 14. № 4(54). С. 595–606. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606
7. Mokrozub V.G., Alsaidi A.A.M. Decision support system for selecting the type of shell-and-tube heat exchanger. *Ontology of Designing*. 2024. Vol. 14. No. 4(54). Pp. 595–606. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606. (In Russian)
8. Smith K., Mei L., Yao S. et. al. Modeling expectation violation in intuitive physics with coarse probabilistic object representations. *Advances in Neural Information Processing systems*. 2019. Vol. 32. Pp. 14931–14942.
9. Gowtham V.K., Sidharth B.S., Schilberg D., Doss A.S.A. Optimization of a robotic arm using generative design. In: Rajkumar K., Jayamani E., Ramkumar P. (eds) *Recent Advances in Materials Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-3895-5_28
10. Jerrin Bright R., Suryaprakash S.A., Giridharan A. Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1012(1):012019. DOI: 10.1088/1757-899X/1012/1/012019
11. Hsiao J.C., Shivam K., Chou C.L., Kam T.Y. Shape design optimization of a robot arm using a surrogate-based evolutionary approach. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No 7. P. 2223. DOI: 10.3390/app10072223

10. Kumaran M., Senthilkumar V. Generative design and topology optimization of analysis and repair work of industrial robot arm manufactured using additive manufacturing technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1012. No. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/1012/1/012036

11. Santosh, Lingala Purandhara Sai et al. Design and analysis of a robotic arm under different loading conditions using FEA simulation. *Materials Today: Proceedings* 50 (2022): 759–765. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.457

12. Li H., Li Y. Finite element analysis and structural optimization design of multifunctional robotic arm for garbage truck. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 11. P. 1543967. DOI: 10.3389/fmech.2025.1543967

13. Миронов Д. А., Ламм А. К., Расулов Р. К. Обзор программных продуктов разработки цифровых двойников // Вестник Национального института бизнеса. 2022. № 4(48). С. 12–27. EDN: QQNQEE

Mironov D.A., Lamm A.K., Rasulov R.K. Review of software products for developing digital twins. *Bulletin of the National Institute of Business*. 2022. No. 4(48). Pp. 12–27. EDN: QQNQEE. (In Russian)

14. Горбунова М. В. Сравнительный анализ инструментов виртуального прототипирования для задач робототехники // Лучшие студенческие статьи 2026: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. 2026. С. 21–25.

Gorbunova M.V. Comparative analysis of virtual prototyping tools for robotics tasks. *Best Student Papers 2026: Collection of Papers of the International Research Competition*. 2026. Pp. 21–25. (In Russian)

15. Al Salameh M.S.H., Musa B.A.M. COMSOL solutions to EMI hardening of UAVs against lightning strikes. *IEEE. International Microwave and Antenna Symposium (IMAS)*, Cairo, Egypt. 2023. Pp. 215–218.

16. Zhang Z., Zhou Y., Zhang Y., Qian B. Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*. 2024. Vol. 13(2). P. 393. DOI: 10.3390/electronics13020393

17. Bairwa B., Gautham R.N., Himabindu N., Kushal T.A. Real-time control of servomotor using arduino and matlab. *International Conference on Advances. In Renewable Energy & Electric Vehicles (AREEV). IEEE*, 2025. Pp. 65–70.

18. Hristov V., De Amorim A. A ROS and MATLAB/Simulink framework for modeling and control of a robotic manipulator. *33rd National Conference with International Participation (TELECOM). IEEE*, 2025. Pp. 1–4.

19. Chotikunnan R., Roongprasert K., Chotikunnan P., Imura P. Robotic arm design and control using MATLAB/Simulink. *International Journal of Membrane Science and Technology*. 2023. Vol. 10(3). Pp. 2448–2459. DOI: 10.15379/ijmst.v10i3.1974

20. García J., Molina J.M. Simulation in real conditions of navigation and obstacle avoidance with PX4/Gazebo platform. *Pers Ubiquit Comput*. 2022. Vol. 26(2). Pp. 1171–1191. DOI: 10.1007/s00779-019-01356-4

21. Dsouza J.M., Rafikh R.M., Nair V.G. Autonomous navigation system for multi-quadrotor coordination and human detection in search and rescue. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2023. Vol. 35. No. 4. Pp. 1084–1091. DOI: 10.20965/jrm.2023.p.1084

22. Wan Y., Tang J., Zhao Z., Chen X. Distributed vision-only cooperative flight of multiple quadrotors in unknown cramped environments. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2025. Vol. 10. No. 7. Pp. 3902–3916.

23. Макаров М. И., Коргин Н. А., Пыжъянов А. А. Симуляторы беспилотного наземного транспорта, применяемые для моделирования движения по пересеченной местности // Проблемы управления. 2025. Т. 1. С. 3–15. EDN: TDVRXK

Makarov M.I., Korgin N.A., Pyzhyanov A.A. Unmanned vehicles: a survey of modern simulators. *Problems of Management*. 2025. Vol. 1. Pp. 3–15. EDN: TDVRXK. (In Russian)

24. Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А. Коллективное проектирование и прототипирование робототехнических систем на основе нейрокогнитивного подхода // *Онтология проектирования*. 2025. Т. 15. № 4(58). С. 497–508. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-497-508

Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A. Collaborative design and prototyping of robotic systems based on a neurocognitive approach. *Ontology of Designing*. 2025. Vol. 15. No. 4. Pp. 497–508. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-497-508. (In Russian)

25. Macenski S., Foote T., Gerkey B. et al. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*. 2022. Vol. 7. No. 66. DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074

26. Нагоев З. В. Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 211 с.

Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence or thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 211 p. (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

Бжихатлов Кантемир Чамалович, канд. физ.-мат. наук, директор Института информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-код: 9551-5494

Пшенокова Инна Ауесовна, канд. физ.-мат. наук, зав. отд. «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-код: 3535-2963

Information about the authors

Kantemir Ch. Bzhikhatlov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of the 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;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-code: 9551-5494

Inna A. Pshenokova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department Multi-Agent Systems, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-code: 3535-2963

Параметрический синтез непрерывных САУ с неоднозначными нелинейными характеристиками

Н. Л. Гречкин, Е. Ю. Ватаева✉

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А

Аннотация. В современной теории автоматического управления широко распространены нелинейные элементы с неоднозначными (гистерезисными) характеристиками. Такие нелинейности характерны для магнитных усилителей, датчиков положения, электромеханических приводов и ряда других устройств. Классические методы параметрического синтеза, разработанные для линейных или однозначных нелинейных систем автоматического управления (САУ), в случае неоднозначных характеристик либо неприменимы напрямую, либо требуют сложных вычислений, либо не гарантируют достижения заданных показателей качества переходных процессов.

Цель исследования – демонстрация работоспособности предложенного алгоритма моделирования гладких гистерезисных характеристик при решении задачи параметрического синтеза на примере конкретной нелинейной САУ с гистерезисным элементом.

Методы. Для решения задачи параметрического синтеза непрерывной САУ применяется обобщенный метод Галеркина, также используется разработанный авторами алгоритм моделирования гладких гистерезисных характеристик.

Результаты. Получены конкретные значения параметров регулятора (k_1 , k_2 , T), при которых переходный процесс системы соответствует заданным показателям качества. Имитационное моделирование показало высокую степень совпадения реального поведения системы с синтезированными параметрами и желаемым программным движением, что свидетельствует о корректности и практической применимости данного подхода.

Выводы. Практическая значимость метода заключается в возможности его использования при проектировании регуляторов для радиотехнических, электромеханических и других систем с гистерезисными элементами. Предложенная методика существенно сокращает время расчета параметров, позволяет обеспечить требуемые динамические характеристики без привлечения сложных адаптивных или нелинейных корректирующих устройств и упрощает последующую техническую реализацию САУ.

Ключевые слова: гладкие гистерезисные характеристики, моделирование гистерезиса, коэффициент наклона, уровень насыщения, неоднозначные нелинейности, системы автоматического управления, люфт с насыщением, параметрический синтез

Поступила 10.03.2026, одобрена после рецензирования 27.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю. Параметрический синтез непрерывных САУ с неоднозначными нелинейными характеристиками // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 23–33. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-23-33

Parametric synthesis of continuous control systems with hysteresis nonlinearities

N.L. Grechkin, E.Yu. Vataeva✉

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Lit. A, Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, 190000, Russia

Abstract. In modern automatic control theory, nonlinear elements with ambiguous (hysteresis) characteristics are widely encountered. Such nonlinearities are typical of magnetic amplifiers, position sensors, electromechanical actuators, and a number of other devices. Classical methods of parametric synthesis developed for linear or single-valued nonlinear automatic control systems (ACS) are either not directly applicable to systems with ambiguous characteristics, require complex computations, or fail to guarantee the achievement of specified quality indicators of transient processes.

Aim. The aim of this study is to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm for modeling smooth hysteresis characteristics in solving the parametric synthesis problem, illustrated by the example of a specific nonlinear ACS containing a hysteresis element.

Methods. To solve the parametric synthesis problem for a continuous ACS, a generalized Galerkin method is applied; in addition, the algorithm for modeling smooth hysteresis characteristics developed by the authors is used.

Results. Specific values of the controller parameters (k_1 , k_2 , T) have been obtained that ensure the system's transient response meets the prescribed quality criteria. Simulation modeling has shown a high degree of agreement between the actual system behavior with the synthesized parameters and the desired reference motion, confirming both the correctness and the practical applicability of the proposed approach.

Conclusions. The practical significance of the method lies in its potential application in the design of controllers for radio engineering, electromechanical, and other systems that include hysteresis elements. The proposed methodology significantly reduces the time required for parameter calculation, enables achievement of the required dynamic characteristics without resorting to complex adaptive or nonlinear correction devices, and simplifies the subsequent technical implementation of automatic control systems.

Keywords: smooth hysteresis characteristics, hysteresis modeling, slope coefficient, saturation level, ambiguous nonlinearities, automatic control systems, backlash with saturation, parametric synthesis

Submitted 10.03.2026,

approved after reviewing 27.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Grechkin N.L., Vataeva E.Yu. Parametric synthesis of continuous control systems with hysteresis nonlinearities. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 23–33. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-23-33

ВВЕДЕНИЕ

В современных САУ, используемых в радиотехнике, электромеханике и аэрокосмической технике, все шире применяются элементы с неоднозначными нелинейными характеристиками. Особое место среди них занимают гладкие гистерезисные нелинейности [1–3].



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Такие характеристики характерны для магнитных усилителей, электромагнитных приводов, пьезоэлектрических и ферроэлектрических устройств, датчиков положения и многих других технических средств [4–6]. Отличительной особенностью неоднозначных нелинейностей является то, что величина выходного сигнала определяется не только текущим значением входа, но и направлением его изменения. Это существенно усложняет анализ и синтез систем управления.

Классические методы параметрического синтеза САУ, разработанные для линейных объектов или нелинейных, в большинстве случаев либо неприменимы при наличии гистерезиса, либо требуют значительных вычислительных затрат (сложных процедур численной оптимизации и многократного имитационного моделирования). Кроме того, такие подходы зачастую не обеспечивают гарантированного достижения требуемых показателей качества переходных процессов [7–9].

В работе [10] авторами был разработан алгоритм моделирования гладких гистерезисных характеристик, который позволяет формировать промежуточные ветви нелинейности в зависимости от характера изменения входного сигнала во времени. Рассмотрим применение методики на примере решения задачи синтеза параметров непрерывной САУ (рис. 1), содержащей неоднозначную нелинейную характеристику, представленную на рис. 2. Неоднозначная нелинейность представляет собой гладкую гистерезисную характеристику, промежуточные ветви которой меняют вид в зависимости от процесса на входе.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Требуется синтезировать параметры k_1 , k_2 , T , чтобы обеспечить следующие показатели качества в системе при входном ступенчатом воздействии: время переходного процесса $T_{н.н.}$ не более 3,5 с при 5 % коридоре установившегося значения, величина перерегулирования σ не более 25 %.

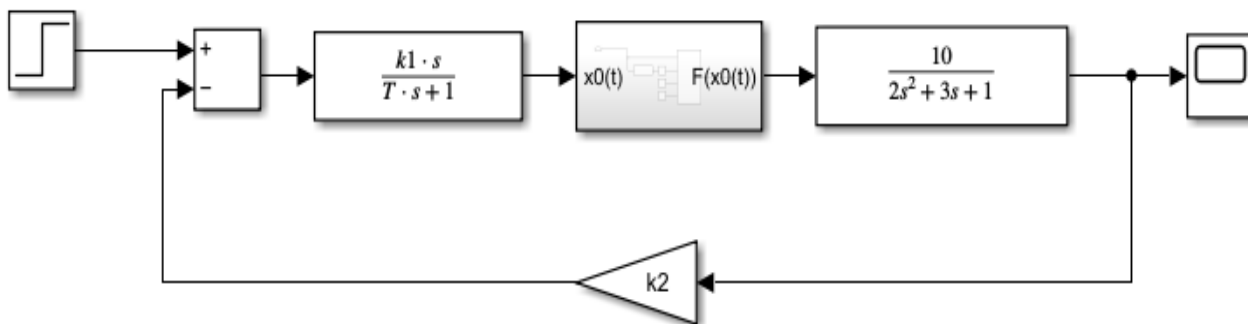


Рис. 1. Структурная схема синтезируемой САУ

Fig. 1. Block diagram of the synthesized automatic control system (ACS)

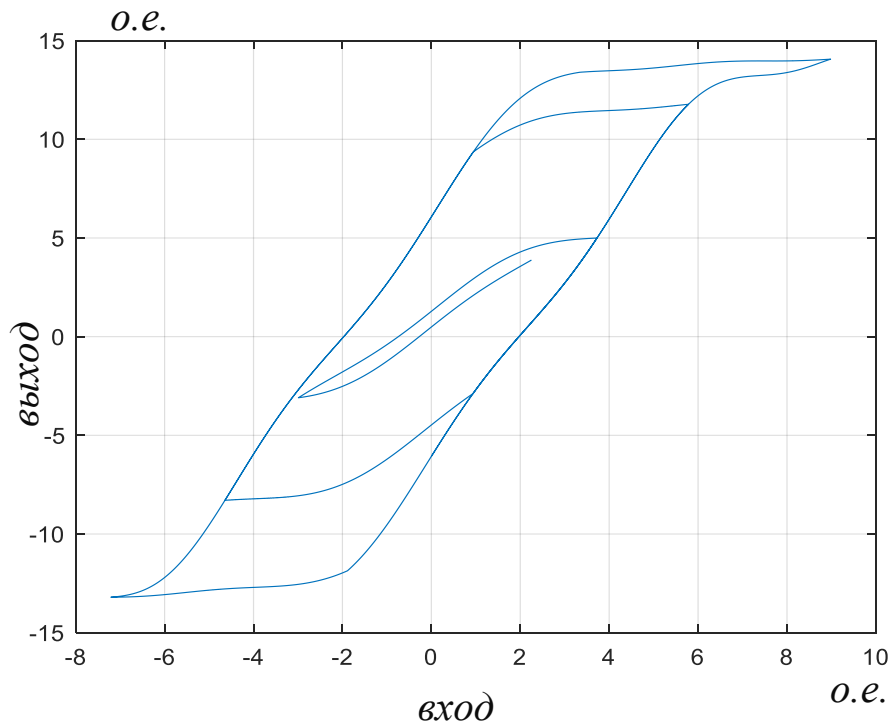


Рис. 2. Неоднозначная нелинейная характеристика

Fig. 2. Ambiguous nonlinear characteristic

Зададимся желаемым программным движением относительно входа нелинейности (рис. 3):

$$x_1^0(t) = (10,83 e^{(-1,2t)} \cos(2,89t - 0,3941))1(t).$$

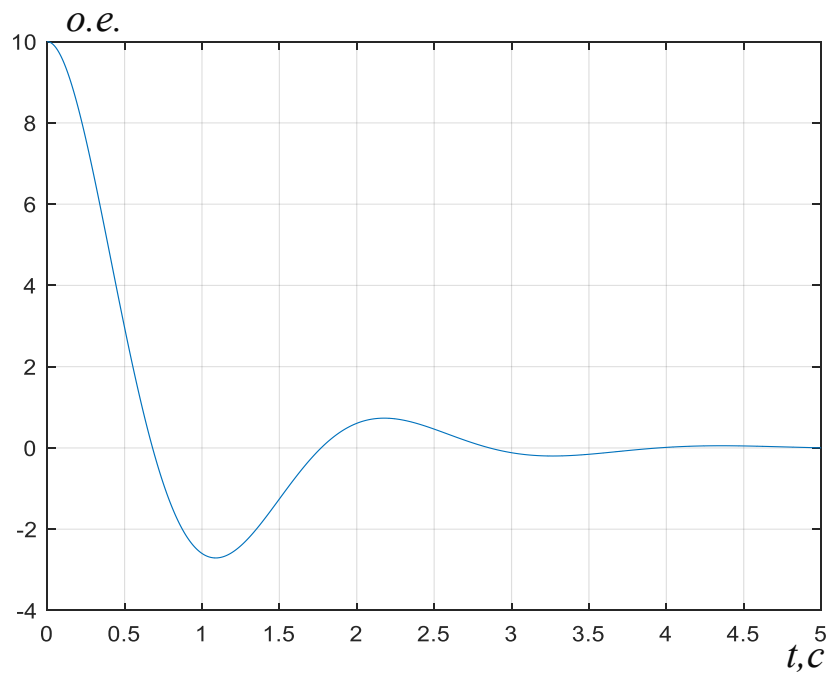


Рис. 3. Вид желаемого программного движения

Fig. 3. Desired program motion trajectory

На рис. 4 представлен процесс на выходе неоднозначной нелинейности, а на рис. 5 вид нелинейности после прохождения через нее выбранного желаемого программного движения.

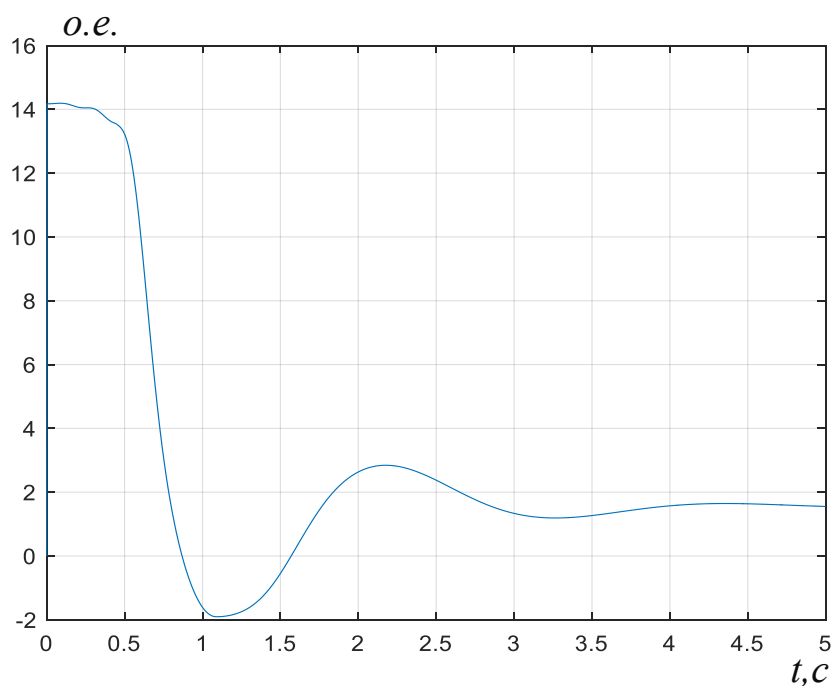


Рис. 4. Процесс на выходе неоднозначной нелинейности

Fig. 4. Output of the ambiguous nonlinearity

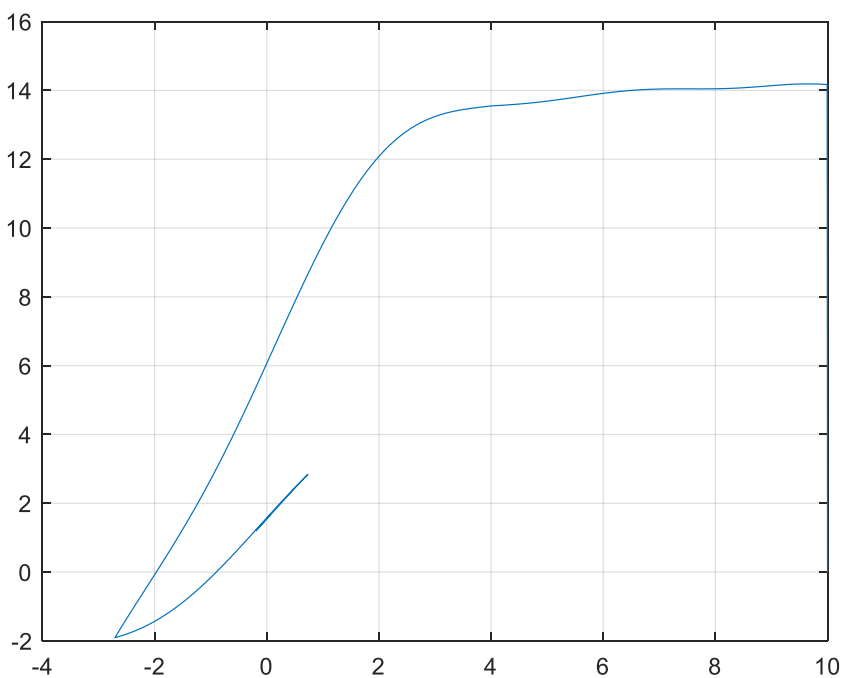


Рис. 5. Вид нелинейности после прохождения через нее выбранного желаемого программного движения

Fig. 5. Nonlinearity response to the selected desired program motion

Применяя подход [11], аппроксимируем процесс на выходе нелинейной характеристики с помощью полинома [12–14]. После $t=4$ с процесс можно считать установившимся и неизменным, установившаяся величина $x_y=1,572$. На рис. 6 представлена аппроксимация процесса на рис. 4 с помощью полинома девятой степени следующего вида:

$$y(x) = -0,409x^9 + 7,6924x^8 - 60,437x^7 + 255,8342x^6 - 625,4078x^5 + \\ + 872,4226x^4 - 630,63x^3 + 179,88x^2 - 14,3395x + 14,1345.$$

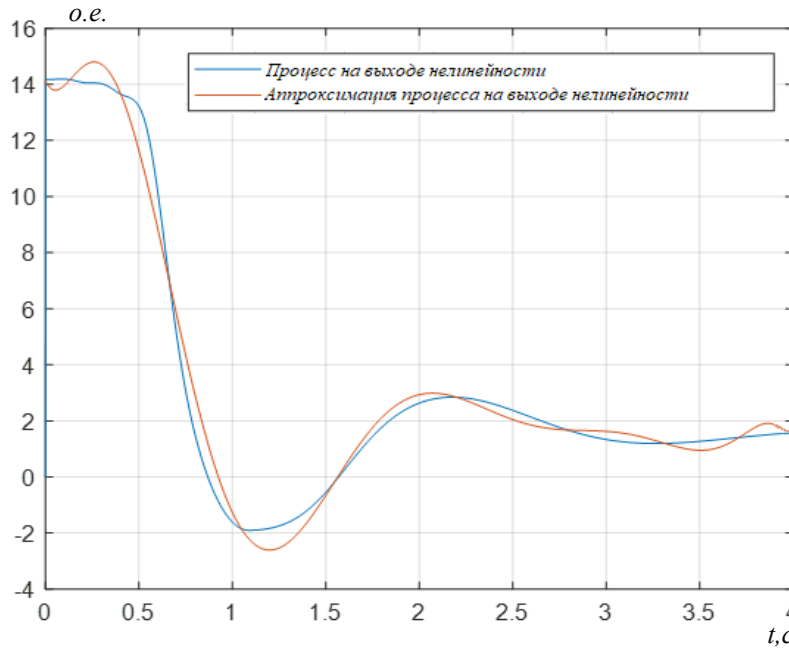


Рис. 6. Процесс на выходе неоднозначной нелинейности и его аппроксимация полиномом

Fig. 6. Output of the hysteresis nonlinearity and its polynomial approximation

Динамика системы будет описываться с помощью следующего дифференциального уравнения:

$$x^0(t)(2s^2 + 3s + 1)(Ts + 1) + F[x^0(t), \dot{x}^0(t)](10k_1k_2) = \\ = f(t)(2s^2 + 3s + 1)(k_1s).$$

Сформируем невязку:

$$\psi(c_k, t) = x^0(t)(2s^2 + 3s + 1)(Ts + 1) + F[x^0(t), \dot{x}^0(t)](10k_1k_2s) - \\ - f(t)(2s^2 + 3s + 1)(k_1s).$$

Значения искомых параметров определяются из ортогональности невязки координатным функциям:

$$\int_0^\infty \psi(c_k, t) \varphi_q(t) dt = \int_0^\infty (2s^2 + 3s + 1)(Ts + 1) x^0(t) \varphi_q(t) dt + \\ + \int_0^\infty (10k_1k_2s) F[x^0(t), \dot{x}^0(t)] \varphi_q(t) dt - \int_0^\infty (2s^2 + 3s + 1)(k_1s) f(t) \varphi_q(t) dt. \\ q = 1, 2, \dots, m.$$

С учетом интегралов Галеркина A_{qi} , C_{qi} и B_{qi} система примет вид:

$$\begin{aligned} (2T) A_{q3} + (3T + 2) A_{q2} + (T + 3) A_{q1} + A_{q0} + (10k_1 k_2) B_{q1} = \\ = (2k_1) C_{q3} + (3k_1) C_{q2} + (k_1) C_{q1}; \\ q = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

Целевая функция для поисков параметров k_1 , k_2 и T примет вид:

$$\begin{aligned} J = \sum_{q=1}^3 \{ (2T) A_{q3} + (3T + 2) A_{q2} + (T + 3) A_{q1} + A_{q0} + (10k_1 k_2) B_{q1} - \\ - (2k_1) C_{q3} + (3k_1) C_{q2} + (k_1) C_{q1} \}^2. \end{aligned}$$

В результате минимизации полученной целевой функции были определены искомые параметры системы:

$$k_1 = 0,7; \quad k_2 = 0,35; \quad T = 0,6.$$

На рис. 7 представлены желаемый переходный процесс, а также переходный процесс в системе с синтезированными параметрами, который удовлетворяет заданным показателям качества.

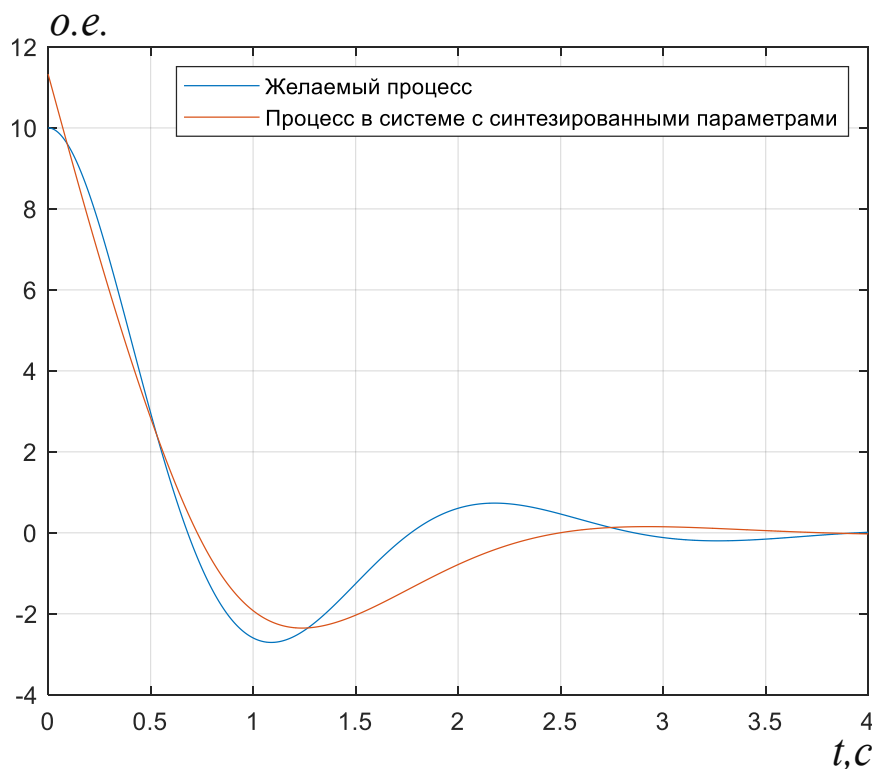


Рис. 7. Желаемое программное движение и переходный процесс в системе с синтезированными параметрами

Fig. 7. Desired program motion and transient process in the system with synthesized parameters

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено применение разработанного алгоритма моделирования гладких гистерезисных характеристик к задаче параметрического синтеза непрерывной нелинейной системы автоматического управления, содержащей неоднозначную нелинейность.

На примере синтеза параметров k_1 , k_2 , T регулятора показано, что использование предложенной методики позволяет получить значения параметров, при которых замкнутая система полностью удовлетворяет заданным требованиям качества переходного процесса (время регулирования не превышает 3,5 с, перерегулирование не превосходит 25 % при единичном ступенчатом воздействии).

Результаты имитационного моделирования подтверждают высокую степень совпадения реального переходного процесса в синтезированной системе с желаемым программным движением, что свидетельствует об эффективности и адекватности предложенного подхода.

Разработанная методика позволяет решать задачу параметрического синтеза САУ с гладкими гистерезисными нелинейностями без привлечения сложных адаптивных алгоритмов или ресурсоемких методов глобальной оптимизации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании радиотехнических, электромеханических и аэрокосмических систем управления, содержащих элементы с выраженными гистерезисными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gao J., Xie X. A weighted switching sequence optimization algorithm for static output feedback control synthesis of nonlinear systems // *Applied Mathematics and Computation*. 2025. Vol. 489. P. 129152. DOI: 10.1016/j.amc.2024.129152
2. Mushtaq T., Seiler P., Maziar S. Hemati. On the convexity of static output feedback control synthesis for systems with lossless nonlinearities // *Automatica*. 2024. Vol. 159. P. 111380. DOI: 10.1016/j.automa.2023.111380
3. Huang W.-Ch., Sun H.-F., Zeng J.-P. Robust control synthesis of polynomial nonlinear systems using sum of squares technique // *Acta Automatica Sinica*. 2013. Vol. 39. No. 6. Pp. 799–805. DOI: 10.1016/S1874-1029(13)60055-5
4. Ding P., Chen K., Ou L. et al. Controller synthesis for a class of nonlinear systems with time delay based on stability region of PID controllers // *ISA Transactions*. 2025. Vol. 162. Pp. 85–94. DOI: 10.1016/j.isatra.2025.04.015
5. Do H.-T., Blanchini F., Prodan I. Nonlinear constrained control systems // In: Zhengtao Ding, ed. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*, Elsevier. 2026. Pp. 112–128. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00165-3
6. Рысин А. В. Использование математических моделей элементов воздушных линий электропередачи для диагностики оборудования // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2025. Т. 68. № 6. С. 557–561. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561
7. Pepe P. Nonlinear systems with delays // In: Zhengtao Ding, ed. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*. Elsevier. 2026. Pp. 44–60. ISBN: 978-0-443-14080-8. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00154-9
8. Ferrara A., Incremona G.P. Nonlinear sliding mode control // In: Zhengtao Ding, ed. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*. Elsevier. 2026. Pp. 100–111. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00146-X

9. Cissé A., Boutayeb M. On state feedback control of a class of nonlinear PDE systems in finite dimension. *Communications // Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2024. Vol. 130. P. 107751. DOI: 10.1016/j.cnsns.2023.107751
10. Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю. О моделировании гистерезисных характеристик в задачах синтеза нелинейных систем автоматического управления // *Инженерный вестник Дона*. 2026. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2026/10677 (доступ свободный).
11. Никитин А. В., Шишляков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления. СПб: СПбГУАП, 2003. 358 с.
12. Шишляков В. Ф., Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л., Шишляков Д. В. Применение полиномиальной аппроксимации в решении задач синтеза нелинейных САУ // *Датчики и системы*. 2023. № 4-2(270). С. 10–12. DOI: 10.25728/datsys.2023.4.2.2
13. Шишляков В. Ф., Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л., Шишляков Д. В. Параметрический синтез потенциометрической маломощной следящей системы // *Датчики и системы*. 2023. № 4-1(269). С. 5–9. DOI: 10.25728/datsys.2023.4.1.1
14. Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю., Шишляков В. Ф. Алгоритм вычисления точек переключения нелинейности «двухпозиционное реле с гистерезисом» // *Радиотехника*. 2024. Т. 88. № 8. С. 24–34. DOI: 10.18127/j00338486-202408-03
15. Гречкин Н. Л. Параметрический синтез систем автоматического управления с неоднозначными характеристиками // *Инженерный вестник Дона*. 2026. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2026/10678 (доступ свободный).

REFERENCES

1. Gao J., Xie X. A weighted switching sequence optimization algorithm for static output feedback control synthesis of nonlinear systems. *Applied Mathematics and Computation*. Vol. 489. 2025. P. 129152. DOI: 10.1016/j.amc.2024.129152
2. Mushtaq T., Seiler P., Maziar S. Hemati. On the convexity of static output feedback control synthesis for systems with lossless nonlinearities. *Automatica*. Vol. 159. 2024. P. 111380. DOI: 10.1016/j.automatica.2023.111380
3. Huang W.-Ch., Sun H.-F., Zeng J.-P. Robust control synthesis of polynomial nonlinear systems using sum of squares technique. *Acta Automatica Sinica*. Vol. 39. No. 6. 2013. Pp. 799–805. DOI: 10.1016/S1874-1029(13)60055-5
4. Ding P., Chen K., Ou L. et al. Controller synthesis for a class of nonlinear systems with time delay based on stability region of PID controllers. *ISA Transactions*. Vol. 162. 2025. Pp. 85–94. DOI: 10.1016/j.isatra.2025.04.015
5. Do H.-T., Blanchini F., Prodan I. Nonlinear constrained control systems. In: Zhengtao Ding, ed. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*. 1st ed. Elsevier. 2026. Pp. 112–128. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00165-3
6. Rysin A.V. The use of mathematical models of overhead power transmission line elements for equipment. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68. No. 6. Pp. 557–561. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561. (In Russian)
7. Pepe P. Nonlinear systems with delays. In: Zhengtao Ding, ed. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*, Elsevier. 2026. Pp. 44–60. ISBN: 978-0-443-14080-8. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00154-9

8. Ferrara A., Incremona G.P. Nonlinear sliding mode control. In: Zhengtao Ding, ed. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*. Elsevier. 2026. Pp. 100–111. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00146-X
9. Cissé A., Boutayeb M. On state feedback control of a class of nonlinear PDE systems in finite dimension. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. Vol. 130. 2024. P. 107751. DOI: 10.1016/j.cnsns.2023.107751
10. Grechkin N.L., Vataeva E.Yu. About modeling hysteresis characteristics in problems of nonlinear control system synthesis. *Engineering Journal of Don*. 2026. No. 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2026/10677 (open access). (In Russian)
11. Nikitin A.V., Shishlakov V.F. *Parametricheskii sintez nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Parametric synthesis of nonlinear automatic control systems]. St. Petersburg: SPbGUAP, 2003. 358 p. (In Russian)
12. Shishlakov V.F., Vataeva E.Yu., Grechkin N.L., Shishlakov D.V. Application of polynomial approximation in solving problems of synthesis of nonlinear ACS. *Sensors & Systems*. 2023. No. 4-2(270). Pp. 10–12. DOI: 10.25728/datsys.2023.4.2.2. (In Russian)
13. Shishlakov V.F., Vataeva E.Yu., Grechkin N.L., Shishlakov D.V. Parametric synthesis of a potentiometric low-power tracking system. *Sensors & Systems*. 2023. No. 4-1(269). Pp. 5–9. DOI: 10.25728/datsys.2023.4.1.1. (In Russian)
14. Grechkin N.L., Vataeva E.Yu., Shishlakov V.F. Algorithm for calculating nonlinearity the switching points “two-position relay with hysteresis”. *Radioengineering*. 2024. Vol. 88. No. 8. Pp. 24–34. DOI: 10.18127/j00338486-202408-03. (In Russian)
15. Grechkin N.L. Parametric synthesis of automatic control systems with ambiguous characteristics. *Engineering Journal of Don*. 2026. No. 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2026/10678 (open access). (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. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Funding. The paper was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under grant agreement No. FSRF-2023-0003, “Fundamental principles of the construction of noise-immune systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision, and aerospace monitoring”.

Информация об авторах

Гречкин Никита Леонидович, ст. преподаватель кафедры управления в технических системах, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А; space.suai@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8477-0752>, SPIN-код: 7170-8166

Ватаева Елизавета Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры управления в технических системах, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А; elizavetavataeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-4967>, SPIN-код: 2234-6792

Information about the authors

Nikita L. Grechkin, Senior Lecturer, Department of Control in Technical Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation;

67, Lit. A, Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, 190000, Russia;

space.suai@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8477-0752>, SPIN-code: 7170-8166

Elizaveta Yu. Vataeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Control in Technical Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation;

67, Lit. A, Bolshaya Morskaia street, Saint Petersburg, 190000, Russia;

elizavetavataeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-4967>, SPIN-code: 2234-6792

Построение единого информационного пространства системы управления производственным оборудованием в территориально распределенных энергетических компаниях

А. Р. Денисов[✉], А. Е. Никулин, Р. В. Михайлов, В. Миридаштаки

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)
197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф

Аннотация. Статья посвящена проблеме построения единого информационного пространства (ЕИП) для систем управления производственным оборудованием (УПО) в распределенных энергетических компаниях. Актуальность обусловлена необходимостью перехода от планово-реактивных моделей обслуживания к интеллектуальному управлению проактивными ремонтами на основе данных, что критически важно для повышения надежности, безопасности и экономической эффективности в условиях цифровой трансформации.

Цель исследования – проектирование архитектуры ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний с филиальной структурой и разнородным составом энергообъектов.

Методы исследования. В качестве методологической основы предлагается применение управления архитектурой предприятия (Enterprise Architecture, EA), обеспечивающей системный подход к интеграции бизнес-целей, данных, приложений и технологической инфраструктуры.

Результаты. Результатом исследования является адаптация эталонной модели архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0) для иерархических структур энергокомпаний. Авторы выявляют несоответствие стандартной последовательной модели RAMI 4.0 реальной практике и предлагают каскадную организацию архитектуры с обратными связями между уровнями. Проиллюстрирована практическая реализация модели, обеспечивающая сквозную интеграцию данных от датчиков до систем поддержки принятия решений.

Заключение. Предлагаемый подход позволяет создать интегрированную и адаптивную систему УПО, открывающую путь к внедрению предиктивной и прескриптивной аналитики, цифровых двойников и, как следствие, к переходу на управление, основанное на данных.

Ключевые слова: энергетические компании, территориально распределенные энергетические компании, территориальные сетевые организации, архитектура предприятия, техническое обслуживание и ремонт, RAMI 4.0

Поступила 22.01.2026, одобрена после рецензирования 15.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Денисов А. Р., Никулин А. Е., Михайлов Р. В., Миридаштаки В. Построение единого информационного пространства системы управления производственным оборудованием в территориально распределенных энергетических компаниях // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 34–48. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-34-48

Building a unified information space for the enterprise asset management system in distributed energy companies

A.R. Denisov, A.E. Nikulin, R.V. Mikhailov, V. Miridashtaki

Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia

Abstract. The paper addresses the problem of building a unified information space for production equipment management systems in distributed energy companies. The relevance is driven by the necessity to transition from planned-reactive maintenance models to intelligent, data-driven proactive maintenance management, which is critical for enhancing reliability, safety, and cost-effectiveness in the context of digital transformation.

Aim. The objective of the study is to design the architecture of a unified information space for production equipment management systems in geographically distributed, branch-structured energy companies with heterogeneous power facilities.

Research methods. As a methodological foundation, the application of Enterprise Architecture management is proposed, ensuring a systematic approach to integrating business goals, data, applications, and technological infrastructure.

Results. The research result is an adaptation of the Reference Architecture Model for Industry 4.0 (RAMI 4.0) for the hierarchical structures of energy companies. The authors identify a discrepancy between the standard sequential RAMI 4.0 model and real-world practice and propose a cascade organization of the architecture with feedback loops between levels. The practical implementation of the model is illustrated, ensuring end-to-end data integration from sensors to decision support systems.

Conclusion. The proposed approach enables the creation of an integrated and adaptive enterprise asset management system, paving the way for the implementation of predictive and prescriptive analytics, digital twins, and consequently, a transition to data-driven management.

Keywords: energy companies, distributed grid companies, territorial grid organizations, enterprise architecture, maintenance and repair, RAMI 4.0

Submitted 22.01.2026,

approved after reviewing 15.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Denisov A.R., Nikulin A.E., Mikhailov R.V., Miridashtaki V. Building a unified information space for the enterprise asset management system in distributed energy companies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 34–48. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-34-48

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня энергетические компании переживают серьезные изменения, обусловленные растущим спросом на энергию, ужесточением экологических норм, развитием возобновляемых источников энергии и стремительным прогрессом в цифровых технологиях. В таких условиях существенно возрастает значимость цифровой трансформации, которая связана не только с внедрением новых цифровых технологий, но и с глубоким переосмыслением бизнес-моделей, операционных процессов, взаимодействия с заинтересованными сторонами [1]. Это позволяет не только оптимизировать текущую деятельность, обеспечивая безопасность и надежность энергоснабжения, но и получить новые конкурентные преимущества при формировании энергетического ландшафта будущего.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Ключевым аспектом цифровой трансформации является интеграция на всех уровнях управления энергетических компаний и их объединений (холдингов) [1]. В данной работе под территориально распределенными энергетическими компаниями понимаются организации, обладающие многоуровневой иерархической структурой управления, включающей холдинг, дочерние общества (в том числе территориальные сетевые организации¹), территориальные подразделения (филиалы) и непосредственно объекты энергетики. Данное определение применимо к любым энергетическим холдингам или корпорациям с разветвленной филиальной сетью и разнородными активами.

Одним из ключевых процессов в территориально распределенных энергетических компаниях является управление производственным оборудованием (УПО), цифровизация которого позволит как автоматизировать рутинные процессы (от удаленного мониторинга оборудования до автоматического сбора и обработки данных) [2], так и улучшить управление активами [3], когда соответствующие системы в сочетании с цифровыми двойниками [4] обеспечивают полный жизненный цикл производственного оборудования от планирования до вывода из эксплуатации, оптимизируя его использование и снижая затраты на владение. Важными процессами УПО являются техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) [5]. Рост сложности оборудования, ужесточение требований к безопасности и необходимость оптимизации затрат требуют перехода от планово-реактивного обслуживания к интеллектуальному управлению ремонтами по фактическому состоянию оборудования. Такой подход значительно повышает надежность и безопасность энергосистем, предотвращает критические отказы и оптимизирует финансовые затраты, обеспечивая устойчивое и бесперебойное энергоснабжение.

Решение задач УПО в первую очередь связано с внедрением систем поддержки принятия решений на основе прогнозной аналитики и искусственного интеллекта [5], что невозможно без качественных данных. Однако в процессе проектирования ИТ-инфраструктуры энергетических компаний данные о вспомогательных процессах, включая УПО, выводятся за рамки анализа и моделирования, что делает невозможным использование предиктивных методов аналитики [6]. Таким образом, для создания интеллектуальных систем УПО требуется формирование единого информационного пространства (ЕИП), обеспечивающего консолидацию и обмен данными по всем производственным процессам, включая задачи управления диагностическим обследованием и ТОиР [7–10]. Такое решение позволит преодолеть барьеры, характерные для территориально распределенных энергетических компаний. К информационным барьерам относится островная автоматизация, при которой данные изолированы в несвязанных системах (SCADA, EAM, ERP). Технологические барьеры проявляются в неоднородности существующих систем и отсутствии стандартизированных интерфейсов, что не позволяет сформировать единый унифицированный процесс подключения ко всему парку оборудования. На практике это часто означает, что даже на одной подстанции используются разнородные АСУ ТП и несвязанные базы данных оборудования, что делает невозможной автоматическую консолидацию информации без специализированных адаптеров. Организационные ограничения связаны с дефицитом междисциплинарных кадров и сложностью адаптации процессов. Нормативные требования (в первую очередь ФЗ № 187-ФЗ²) накладывают жесткие рамки на архитектуру и выбор средств защиты. Экономические барьеры определяются высокими первоначальными затратами и длительным сроком окупаемости.

¹Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 (ред. от 27.10.2025 с изм. от 08.08.2024)

²Федеральный закон от 26.07.2017 №187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (в ред. Федерального закона от 10.07.2023 № 312-ФЗ, от 07.04.2025 № 58-ФЗ)

В этих условиях особую значимость приобретает методология управления архитектурой предприятия (Enterprise Architecture Management, EA), которая обеспечивает системность при проектировании, планировании и реализации изменений в компании. Применение данной концепции EA при построении ЕИП УПО позволяет преодолеть указанные барьеры, эффективно интегрировать цифровые решения в единое информационное пространство, оптимизировать производственные процессы, реализовать стратегию импортозамещения и через это достичь максимальной эффективности, избежать рисков и обеспечить устойчивое развитие компании [11–13].

Цели и задачи исследования

Цель исследования: спроектировать архитектуру ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний с филиальной структурой и разнородным составом энергообъектов.

Задачи исследования:

1. Определить роль EA в процессах построения ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний.
2. Выбрать архитектурный фреймворк для ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний.
3. Определить основные архитектурные блоки и взаимосвязи между ними в ЕИП системы УПО в соответствии с выбранным фреймворком.

Методы исследования

Интеграция методов EA в процессы УПО позволит перейти от разрозненных подходов к целостной, стратегически выверенной системе. EA становится связующим звеном, обеспечивая согласованность между бизнес-целями, данными, приложениями и технологической инфраструктурой.

На основе принципов EA упрощается решение следующих задач:

- **Стратегическое согласование**, где EA обеспечивает оптимизацию инвестиций в УПО и ТОиР согласно стратегическим целям компании, направленным на повышение надежности, снижение издержек и минимизацию рисков.

- **Цифровые двойники** (Digital Twins), где EA является основой для создания и управления цифровыми двойниками. Она определяет, какие данные необходимо собирать с физического оборудования (через IoT-датчики), как эти данные будут интегрироваться с моделями двойников и как результаты моделирования будут использоваться для оптимизации работы оборудования, прогнозирования отказов и планирования ТОиР.

- **Автоматизация ТОиР**, где EA обеспечивает сквозную автоматизацию процессов ТОиР – от планирования до выполнения и контроля, что приводит к повышению эффективности и снижению ошибок. При этом EA упрощает переход от планово-предупредительного обслуживания к предиктивному (прогнозирование отказов) и прескриптивному (рекомендации по действиям) путем интеграции данных IoT, систем контроля оборудования и технологий машинного обучения с системами управления активами. Это значительно сокращает время простоя оборудования и операционные затраты.

- **Интеграция систем УПО**. На начальном этапе обмен между SCADA, EAM, CMMS, ERP и аналитическим контуром организуется преимущественно через XML-макеты, стандартные протоколы, ETL/ELT-процессы и брокеры данных вне режима реального времени. Вынесение ETL/ELT-слоя в отдельный интеграционный контур позволит орга-

низовать информационное взаимодействие с любыми системами независимо от их протоколов и форматов данных, обеспечивая поддержку пользователей и решение аналитических задач. Это приведет к повышению качества решения задач ТОиР, поддержки надежности и формирования материально-технических ресурсов без усложнения процедур принятия решений на оперативно-диспетчерском уровне. На последующих этапах архитектура может быть расширена за счет использования отраслевых стандартов и моделей обмена, что создает основу для дальнейшего семантического согласования данных об объектах электроэнергетики.

Решить указанные задачи невозможно без внедрения специализированных под УПО элементов. Так, на уровне архитектуры приложений задействованы:

- система управления активами (EAM) – ядро архитектуры приложений для УПО, обеспечивающее управление полным жизненным циклом активов – от планирования и закупок до эксплуатации и вывода из эксплуатации;
- система управления техническим обслуживанием (CMMS), обеспечивающая планирование, выполнение и учет работ по ТОиР;
- системы диспетчерского и оперативного управления производственными процессами (SCADA, MES) для получения данных о состоянии оборудования и удаленного управления;
- аналитические платформы для обработки данных с применением алгоритмов машинного обучения для предиктивной и прескриптивной аналитики;
- система управления проектами для планирования капитальных ремонтов и модернизации оборудования как отдельных проектов;
- цифровые двойники оборудования для моделирования поведения критически важного оборудования, тестирования сценариев, прогнозирования отказов, оптимизации производительности и планирования ТОиР.

На уровне архитектуры данных могут быть созданы:

- каталог всего производственного оборудования и глоссарий специализированных для УПО терминов;
- справочники основных данных об оборудовании (паспорта, спецификации, история эксплуатации, данные датчиков, конфигурации);
- хранилище оперативных данных реального времени с датчиков (IoT), установленных на оборудовании, для мониторинга состояния оборудования, выявления аномалий и сбора информации для предиктивной аналитики;
- шина бесшовного извлечения и обмена данными между информационными системами (SCADA, ERP, EAM, CMMS);
- хранилище неструктурированных данных (ремонтные журналы, изображения, видео), содержащих ценную информацию о состоянии оборудования;
- хранилище исторических данных об отказах, ремонтах и производительности оборудования для выявления трендов и прогнозирования.

Применение методов ЕА в процессах УПО энергетических компаний позволяет создать интегрированную, интеллектуальную и адаптивную систему, которая не только повышает эффективность и надежность оборудования, но и способствует достижению стратегических целей компании в условиях цифровой трансформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При построении ЕИП системы УПО важно реализовать бесшовную и эффективную работу с данными, поступающими с различных устройств и информационных систем. Также важно обеспечить отсутствие «функционального колодца», чтобы данные по УПО не были изолированы от других производственных процессов. Решать эти задачи целесообразно на

основе модели эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (Reference architecture Model for Industry 4.0, RAMI4.0) [14], утвержденной ГОСТ Р 59799–2021¹, описывающей принципы интеграции данных в распределенных информационных системах (рис. 1).

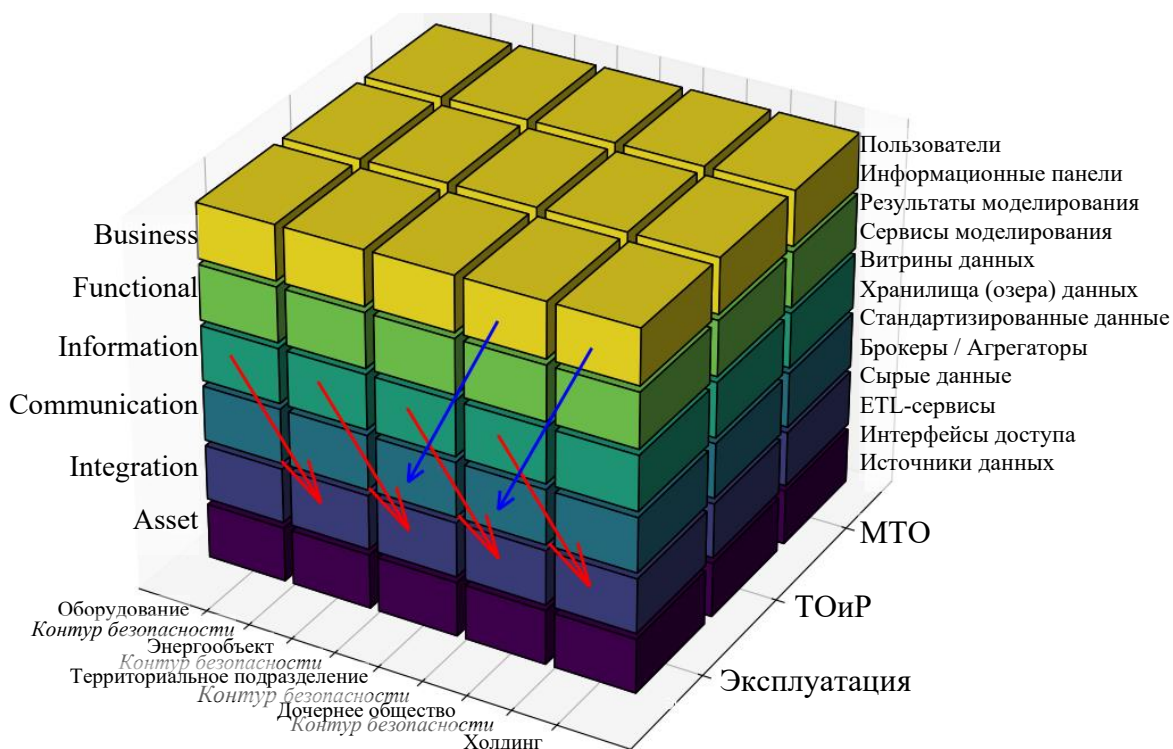


Рис. 1. Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0)

Fig. 1. Reference Architecture Model 4.0 (RAMI 4.0)

По оси «Жизненный цикл потока ценности» (Life Cycle Value Stream) необходимо указать все бизнес-процессы УПО. В упрощенном виде в работе были выделены процессы эксплуатации, ТОиР и материально-техническое обеспечение (МТО). При определении уровней иерархии следует придерживаться принятой в энергетических компаниях вертикально интегрированной модели информационных потоков, построенной на основе ГОСТ Р МЭК 62264–1–2014² или ГОСТ Р 70841–2023³. При этом следует понимать, что в энергетических компаниях на уровне оборудования и ниже уже реализована полная автоматизация производственных процессов на базе SCADA-системы, поэтому эти уровни в работе рассматриваться не будут. Для описания слоев интеграции была использована принятая в RAMI4.0 последовательность от активов (Assets) до бизнес-процессов (Business). При этом было внесено уточнение, что каждый слой RAMI4.0 на практике разделяется на несколько подслоев. Так, слой активов разделяется на непосредственно источники данных (датчики, контроллеры, информационные системы) и интерфейсы доступа к ним (API, OPC UA, ODBC и др.). Слой интеграции (Integration) разделяется на слои ETL/ELT сервисов и сырых данных (Raw data). К слою интеграции при построении облачных систем также следует

¹ГОСТ Р 59799–2021. Умное производство. Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI4.0).

²ГОСТ Р МЭК 62264–1–2014. Интеграция систем управления предприятием. Ч. 1. Модели и терминология.

³ГОСТ Р 70841–2023 Нефтяная и газовая промышленность. Сбор и обмен данными по надежности и техническому обслуживанию оборудования.

отнести слой «граничных вычислений» (Edge computing) [8, 10, 15]. Слой коммуникации (Communication) включает в себя систему брокеров, извлекающих и интегрирующих данные из разных источников, а также стандартизированные пакеты оперативных данных, подготовленных для хранения на информационном слое. К этому же слою следует отнести системы «туманных» вычислений (Fog computing), используемых для сбора и интеграции данных в распределенных облачных системах [15]. На информационном слое (Information) находятся как система хранения данных, созданная в соответствии со спецификой организации (Data Warehouse, Data Lakehouse, Data Mesh, Data Vault), так и слой витрин данных (DataMart), которые используются при моделировании и визуализации на последующих слоях. На функциональном слое (Functional) находятся сервисы моделирования, модели и результаты выполнения моделей. На бизнес-слое (Business) находятся лица, принимающие решения, и информационные панели (дашборды), реализующие поддержку принимаемых ими решений. При построении потоков данных на разных уровнях иерархии или для разных бизнес-процессов часть слоев может быть пропущена в зависимости от задачи.

При реализации RAMI4.0 архитектуры также было выявлено, что прописанный в стандарте последовательный переход между уровнями иерархии не соответствует практике построения корпоративных информационных систем в иерархических сетевых организациях, к которым относятся практически все энергетические компании. Иерархическое устройство таких компаний определяет, что обработанные и подготовленные данные функционального слоя предыдущего уровня иерархии являются источником данных для следующего, что показано красными стрелками на рис. 1. При этом в соответствии с требованиями информационной безопасности данные передаются не напрямую, а через специализированного брокера. Таким образом, информационный слой предыдущего уровня соответствует слою активов следующего уровня, что подразумевает не последовательное, а каскадное соединение, как это показано на рис. 2. Прямое воздействие с более высокого уровня на более нижний осуществляется в соответствии с синими стрелками на рис. 1 и 2, для чего, где это допустимо, также используются специализированные брокеры.

В соответствии с Федеральным законом от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»¹ и требованиями Приказа ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239² для систем управления производственным оборудованием, входящих в перечень объектов критической информационной инфраструктуры (п. 100, 101 Распоряжения Правительства РФ от 26.02.2026 № 360 р), необходимо обеспечить эшелонированную защиту, сегментирование сетей, организацию демилитаризованных зон и защиту информации при передаче по каналам связи.

В иерархической структуре территориально распределенной энергетической компании для этого создаются отдельные сегменты вычислительной сети для каждого уровня: энергообъект, территориальное подразделение, дочернее общество, холдинг. Для организации защищенного информационного взаимодействия между сегментами применяются брокеры, минимизирующие прямую коммуникацию подсистем, находящихся внутри и за пределами контуров безопасности. Для нисходящих потоков (передача управляющих воздействий, репликация справочников) используется брокер прямой связи, обеспечивающий контролируемую передачу данных в максимально защищенном режиме. Для восходящих

¹Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (в ред. Федерального закона от 10.07.2023 № 312-ФЗ, от 07.04.2025 № 58-ФЗ).

²Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239.

поток (сбор и агрегация оперативных данных) задействован брокер интеграции данных, осуществляющий прием, буферизацию, маршрутизацию и передачу информации на вышестоящие уровни. Контур безопасности на рисунках 3–5 показан серой оболочкой, охватывающей все слои архитектуры, что символизирует применение сертифицированных средств защиты на всех этапах передачи данных.

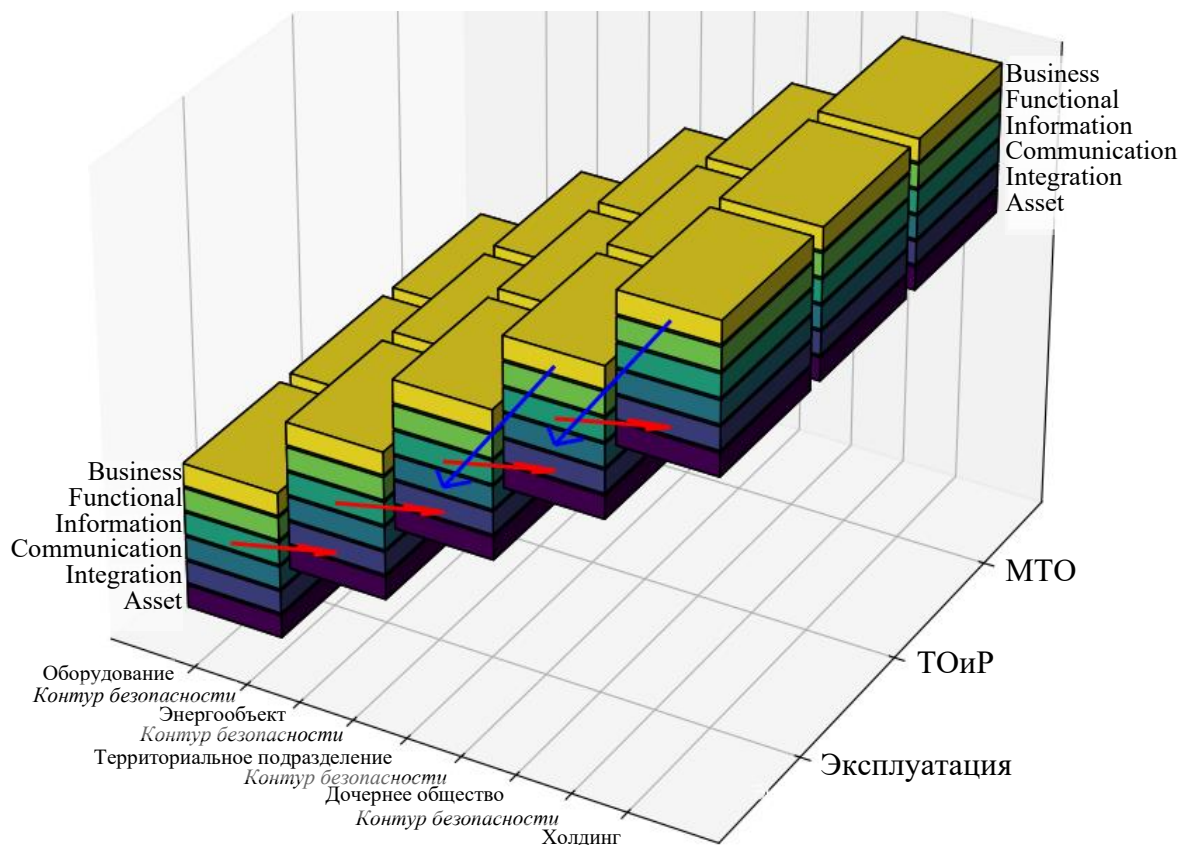


Рис. 2. Каскадная организация архитектуры RAMI4.0

Fig. 2. Cascaded architecture of the RAMI 4.0 model

Практическая реализация архитектуры рассматривается на примере пилотного объекта электрохозяйства – ЗРУ 10 кВ типовой подстанции 110/10 кВ. На пилотном уровне в контур интеграции включаются данные оперативного информационного комплекса (ОИК), подсистемы управления надежностью (паспортные данные, наработки на отказ, описания оборудования), автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) и рабочих мест оперативного персонала (данные с осмотров, выявленные дефекты и замечания к работе оборудования), что позволяет сформировать минимально жизнеспособный контур «данные – анализ – решение» для задач ТОиР. Ожидаемые эффекты включают снижение внеплановых простоев, повышение точности планирования ремонтов и рост информированности персонала. Полученная информация проходит первичную обработку и агрегацию, формируя информационную основу для управления на уровне технологического узла. Архитектура информационных потоков на уровне объекта приведена на рис. 3. Обеспечение качества данных реализуется на интеграционном слое архитектуры и дополняется организационными механизмами. В ETL/ELT-сервисах выполняются процедуры входной

валидации (проверка форматов, диапазонов, ссылочной целостности), нормализации (приведение к единым справочникам) и дедупликации. Для ключевых сущностей (оборудование, места установки, типы отказов) внедряется управление нормативно-справочной информацией (НСИ) с назначением ответственных владельцев. Контроль полноты, точности, своевременности и согласованности данных осуществляется через репозиторий метаданных, фиксирующий правила проверки и результаты валидации. При отклонении метрик ниже пороговых значений формируются уведомления для ответственных за данные на соответствующем уровне иерархии. Для обеспечения устойчивого качества данных также предусмотрены организационные мероприятия: назначение стюардов данных, ответственных за качество на местах; разработка и документирование политик, бизнес-правил и процедур контроля; регламентация процессов внесения изменений в справочники и оперативные данные. Сочетание технологических и организационных мер создает замкнутый контур управления качеством данных на всех этапах их жизненного цикла.

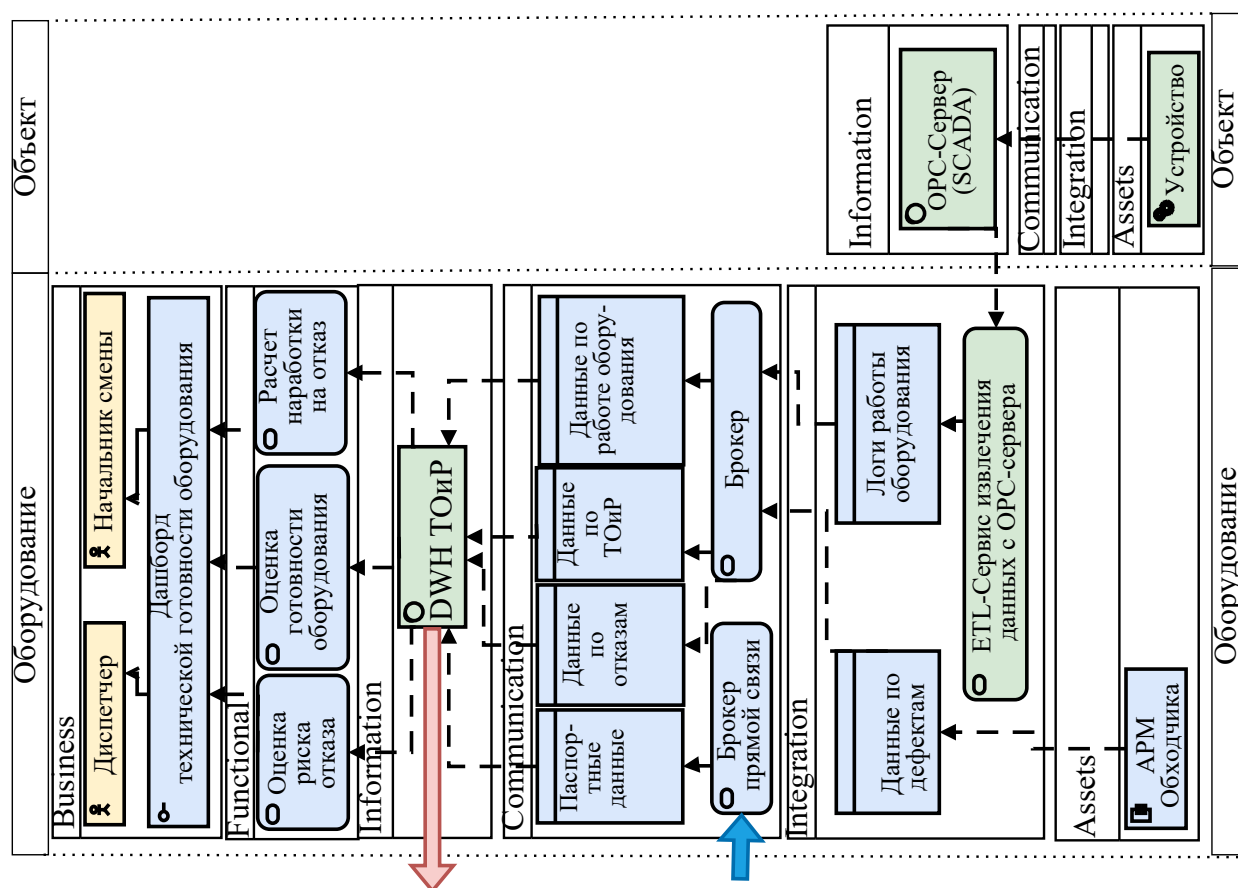


Рис. 3. Архитектура информационных потоков на уровне объекта

Fig. 3. Architecture of information flows within the object layer

При переходе на уровень территориального подразделения (ТП) данные от отдельных единиц оборудования объединяются в целостную картину состояния производственных активов. На этом уровне происходит не просто агрегация информации, а ее смысловое обогащение за счет выявления взаимосвязей между различными компонентами технологической системы. Именно на этом уровне происходит формирование опе-

ративных данных для планирования ТОиР. Интеграция с EAM и CMMS позволяет оптимизировать использование ресурсов и персонала, обеспечивая сбалансированное распределение рабочих мощностей и материальных запасов. На этом уровне особенно важным становится применение методов предиктивной аналитики и машинного обучения, позволяющих выявлять скрытые закономерности и прогнозировать развитие ситуаций на длительную перспективу. Архитектура информационных потоков на уровне ТП приведена на рис. 4.

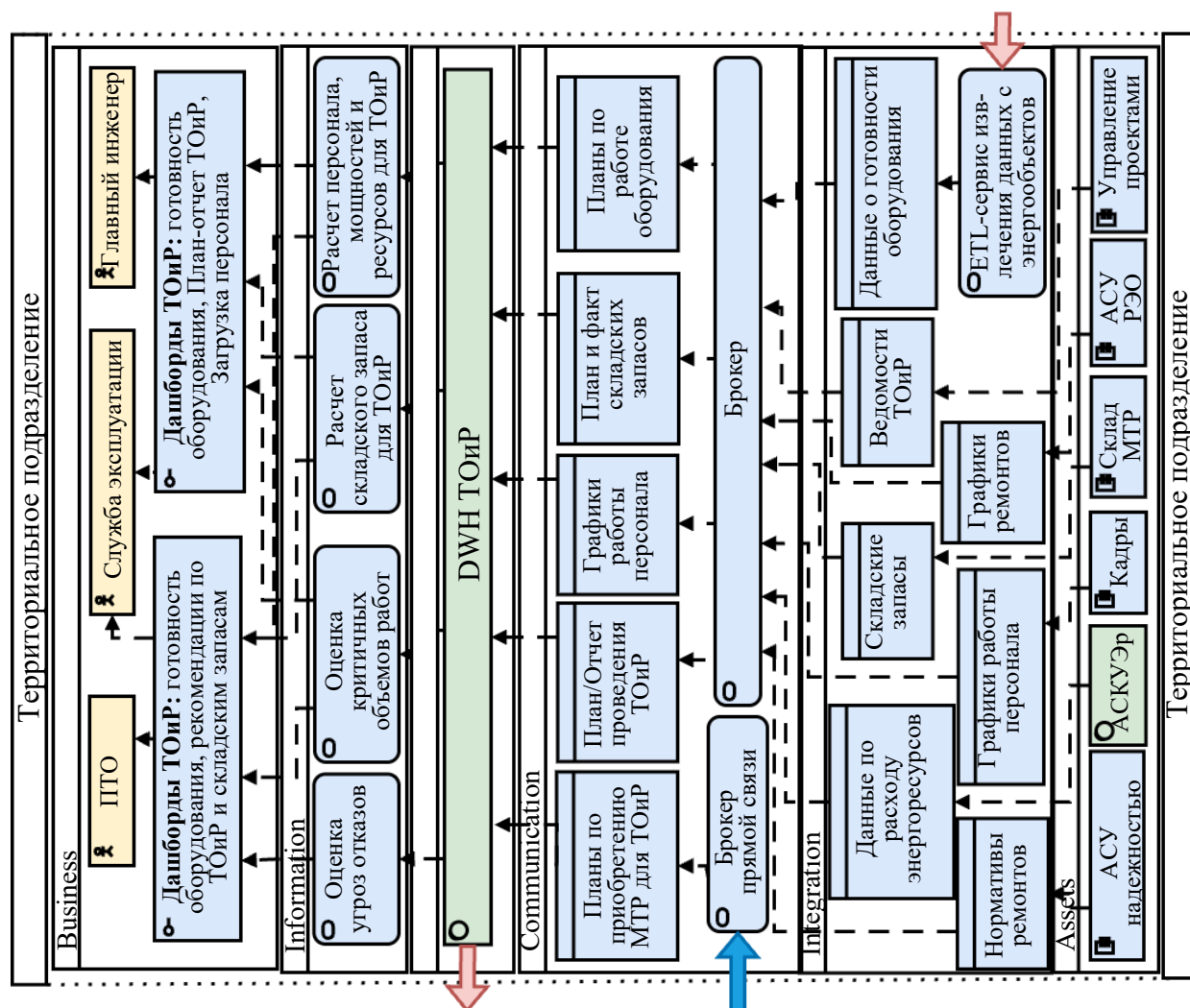


Рис. 4. Архитектура информационных потоков на уровне ТП

Fig. 4. Information flow architecture within the territorial division layer

На уровне дочернего общества (ДО) агрегированные данные с территориальных подразделений становятся основой для стратегического планирования и управления ТОиР и надежностью. Здесь осуществляется консолидация информации о наработке оборудования, истории отказов, затратах на техническое обслуживание, а также данных о качестве эксплуатации и соблюдении регламентов обслуживания. В соответствии с принципами ЕА эти данные используются для формирования производственных планов, бюджетов ТОиР и программ модернизации оборудования. Архитектура информационных потоков на уровне ДО и холдинга приведена на рис. 5.

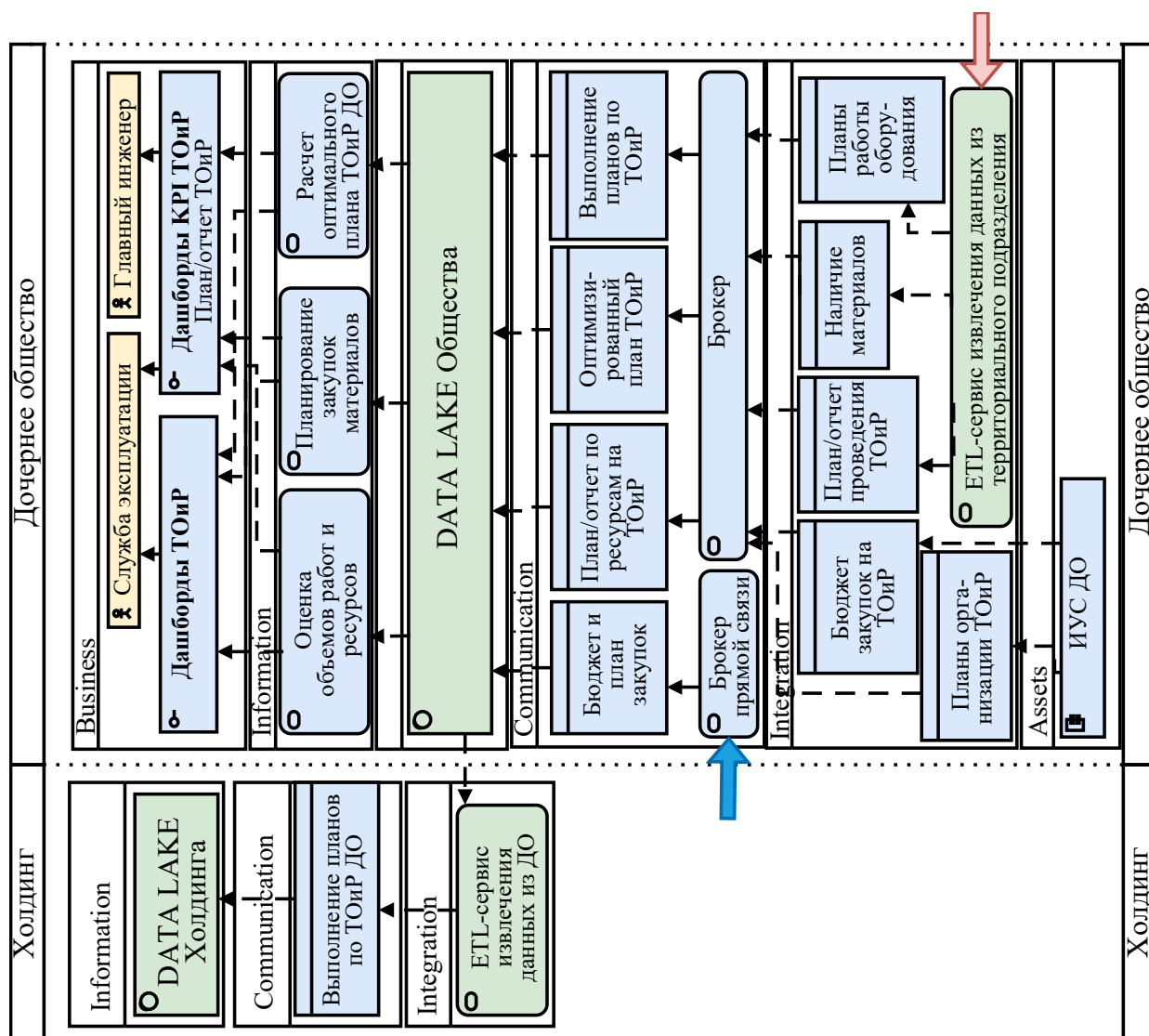


Рис. 5. Архитектура информационных потоков на уровнях ДО и холдинга

Fig. 5. Information flow architecture at the subsidiary and holding company layers

Особенностью предлагаемой архитектуры является наличие не только вертикальных, но и горизонтальных взаимодействий между уровнями управления. Вертикальные связи обеспечивают передачу данных, решений и управляющих воздействий между объектом, территориальным подразделением, дочерним обществом и холдингом. Горизонтальные связи реализуются через создание единого структурированного хранилища данных на каждом иерархическом уровне. В соответствии с логикой RAMI 4.0 хранилище консолидирует данные со всех источников, что обеспечивает пользователям одного уровня доступ к информации, необходимой для обмена практиками ТОиР, типовыми сценариями ремонтов, результатами диагностики, шаблонами аналитических моделей и сравнительными показателями эксплуатации. Такой подход позволяет, к примеру, сравнивать наработку на отказ однотипного оборудования в разных территориальных подразделениях и тиражировать наиболее эффективные методы диагностики и ремонта без дополнительных затрат на организацию специальных каналов обмена данными. При этом управленческие связи и организационная структура не изменяются, а предлагаемая архитектура создает лишь технологическую основу для информационного взаимодействия. Тактическая прямая связь

(от ДО к ТП) позволяет оптимизировать планы и графики обслуживания на среднесрочную перспективу. Оперативная прямая связь (от ТП к объекту) обеспечивает корректировку текущих процессов обслуживания на основе данных о фактическом состоянии оборудования. На уровне дочернего общества (территориальной сетевой организации) или холдинга формируются политики, приоритеты, модели и оптимизированные планы ТОиР, которые передаются на нижние уровни для исполнения и адаптации к текущей оперативной обстановке. При этом внедрение каскадной архитектуры не изменяет сложившиеся процессы принятия управленческих решений и организационную структуру; предлагаемая система оптимизирует исключительно информационные потоки – как вертикальные, так и горизонтальные. Оперативные решения и аварийные ремонты иницируются на уровне объекта или территориального подразделения в пределах установленных регламентов и лимитов. Благодаря сквозному характеру архитектуры данные о выполненных действиях и изменении состояния оборудования передаются на верхние уровни постфактум с минимальной задержкой, что позволяет корректировать модели и планы, но не подменяет существующие процедуры управления. При этом данные о выполнении планов и фактическом состоянии оборудования поступают обратно, создавая замкнутый контур управления. Такая организация информационного взаимодействия позволяет реализовать принцип непрерывного улучшения процессов ТОиР за счет адаптации моделей и алгоритмов на основе актуальных данных о реальной эксплуатации оборудования.

Важным аспектом информационного пространства является обеспечение интероперабельности компонентов системы через стандартизированные интерфейсы обмена данными. В соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 62264–1–2014 система должна поддерживать взаимодействие с существующими системами управления предприятием, включая ERP, EAM и MES-системы. Это обеспечивает согласованность данных и процессов на всех уровнях управления. Особое внимание уделяется вопросам кибербезопасности, учитывая критическую важность энергетической инфраструктуры. Реализация механизмов защиты информации соответствует требованиям регуляторов и обеспечивает безопасность передачи и хранения данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение предложенной архитектуры позволит перейти от традиционных методов обслуживания к интеллектуальным системам. В отличие от систем управления производственными активами (СУПА), которые ориентированы на корпоративное управление жизненным циклом активов (средне- и долгосрочное планирование, инвестиционные решения), предлагаемая архитектура формирует специализированный информационный контур оперативно-тактического уровня. Через интеграцию разнородных информационных потоков она преодолевает ключевые барьеры (островную автоматизацию, неполноту данных), наполняя существующие EAM-решения интеллектуальной аналитикой на основе телеметрии, машинного обучения и цифровых двойников. Таким образом, она выступает не заменой СУПА, а развитием аналитического и интеграционного уровня, обеспечивающим переход к предиктивному управлению.

Использование машинного обучения для прогнозирования остаточного ресурса оборудования в сочетании со сквозной интеграцией данных создает основу для существенного повышения эксплуатационной эффективности энергетических предприятий. Система обеспечит не только прогнозирование отказов, но и формирование оптимальных сценариев обслуживания, учитывающих как технические параметры оборудования, так и экономические аспекты эксплуатации.

Предложенное решение позволит не только снизить эксплуатационные риски, но и оптимизировать затраты на обслуживание инфраструктуры. Создание ЕИП предприятия и внедрение интеллектуальных систем поддержки принятия решений соответствует стратегическим целям цифровой трансформации в энергетике и создает основу для перехода к управлению на основе данных. Это открывает возможности для дальнейшего развития системы в направлении создания цифровых двойников производства и внедрения предиктивной аналитики, что позволит не только прогнозировать развитие событий, но и автоматически формировать оптимальные рекомендации по управлению техническим состоянием оборудования.

При этом энергетические компании, успешно интегрировавшие принципы ЕА в процессы цифровой трансформации, будут лучше подготовлены к вызовам будущего и обеспечат свое устойчивое развитие в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кузовкова Т. А., Алмаева О. П., Сибейкин О. Ю., Чернышова П. С. Характер и компоненты цифровой трансформации мировой и национальной энергетики // Экономика и качество систем связи. 2023. № 4(30). С. 29–36. EDN: NAGEXG

Kuzovkova T.A., Almaeva O.P., Sibeikin O.Yu., Chernyshova P.S. The nature and components of the digital transformation of global and national energy. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi* [Economics and Quality of Communication Systems]. 2023. No. 4(30). Pp. 29–36. EDN: NAGEXG (In Russian)

2. Lindner M., Bank L., Schilp J., Weigold M. Digital Twins in manufacturing: A RAMI 4.0 Compliant Concept. *Sci.* 2023. Vol. 5(4). No. 40. DOI: 10.3390/sci5040040

3. Al-Fedaghi S., Al-Huwais N. Enterprise asset management as a flow machine. *International Journal of Modeling and Optimization.* 2018. Vol. 8. No. 5. Pp. 290–300. DOI: 10.7763/IJMO.2018.V8.667

4. Khalyasmaa A.I., Stepanova A.I., Eroshenko S.A., Matrenin P.V. Review of the digital twin technology applications for electrical equipment lifecycle management. *Mathematics.* 2023. No. 11. P. 1315. DOI: 10.3390/math11061315

5. Щербатов И. А. Система поддержки принятия решений при управлении ремонтами теплоэнергетического оборудования // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. № 3. Pp. 34–39. EDN: GIOXDI

Shcherbatov I.A. Decision support system for managing repairs of thermal power equipment. *International Journal of Open Information Technologies.* 2023. Vol. 11. No. 3. Pp. 34–39. (In Russian)

6. Milošević D.A., Ilić D., Vulić M. Machine learning for predictive maintenance in Industry 4.0: current trends and challenges. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering.* 2024. Vol.17. No.1. Pp. 19–24.

7. Гвоздяный С. Е., Мясков А. В. Российский и зарубежный опыт использования цифровых двойников в энергетике // Экономика промышленности. 2024. Т. 17. № 4. С. 378–387. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-4-1368

Gvozdyany S.E., Myaskov A.V. Russian and foreign experience of using digital twins in the energy sector. *Russian Journal of Industrial Economics.* 2024. Vol. 17. No. 4. Pp. 378–387. (In Russian)

8. Колосок И. Н., Коркина Е. С. Применение технологии граничной аналитики (EDGE ANALYTICS) при создании цифровых двойников объектов ЕЭС России // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3(23). С. 28–39. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.003

Kolosok I.N., Korkina E.S. Application of edge analytics technology to develop digital twins of Russia's united electric power system facilities. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management.* 2021. No. 3(23). Pp. 28–39. (In Russian)

9. Плеханова А. Ф., Сухарев Д. Ю. Проблемы внедрения риск-ориентированного подхода к управлению активами электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия с целью повышения его эффективности // *Modern Economy Success*. 2024. № 6. С. 166–174. DOI: 10.58224/2500-3747-2024-6-166-174

Plekhanova A.F., Sukharev D.Yu. Problems of implementing a risk-oriented approach to asset management of an industrial enterprise's electric power infrastructure in order to increase its efficiency. *Modern Economy Success*. 2024. No. 6. Pp. 166–174. DOI: 10.58224/2500-3747-2024-6-166-174. (In Russian)

10. Chen Ch., Fu H., Zheng Yu et al. The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning. *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. No. 71. Pp. 581–594. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.10.010

11. Hindarto D., Indrajit R. Eko, Dazk E. Sustainability of implementing enterprise architecture in the solar power generation manufacturing industry. *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*. 2021. Vol. 6. No. 1. Pp. 13–24. DOI: 10.33395/sinkron.v6i1.11115

12. Matharoo S. The role of enterprise architecture in the digital transformation of energy companies. *American Research Journal of Business and Management*. 2024. Vol. 10. No. 1. Pp. 65–69. DOI: 10.21694/2379-1047.24010

13. Zhao X. Research on management informatization construction of electric power enterprise based on big data technology. *Energy Reports*. 2022. No. 8. Pp. 535–545. DOI: 10.1016/j.egy.2022.05.124

14. Baptista L.F., Barata J. Piloting Industry 4.0 in SMEs with RAMI 4.0: an enterprise architecture approach. *Procedia Computer Science*. 2021. No. 19. Pp. 2826–2835. DOI: 10.1016/j.procs.2021.09.053

15. Ganguly B., Kodgire D., Ajani S.N. et al. Navigating Industry 4.0 frontiers: a scalable and resilient next-generation IoT Framework to implement future advancements in smart and adaptive industrial systems. *Journal of Electrical Systems*. 2024. No. 20-1s. Pp. 444–454.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Денисов А. Р. – общее руководство, определение плана и структуры статьи, анализ архитектуры RAMI 4.0;

Никулин А. Е. – определение архитектуры системы технического обслуживания и ремонта для распределенных энергетических компаний;

Михайлов Р. В. – определение требований к архитектуре энергетических компаний;

Миридаштаки В. – описание принципов создания единого информационного пространства с использованием методологии ЕА.

Contribution of the authors:

Denisov A.R. – general guidance, definition of the plan and structure of the article, analysis of the architecture of RAMI 4.0;

Nikulin A.E. – definition of the architecture of the maintenance and repair systems for distributed energy companies;

Mikhailov R.V. – definition of requirements for the architecture of energy companies;

Miridashtaki V. – description of the principles of creating a unified information space using the EA methodology.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Денисов Артем Руфимович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
iptema@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3359-4103>, SPIN-код: 2409-4547

Никулин Анатолий Евгеньевич, аспирант кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
nikulin.a.e@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2352-5869>, SPIN-код: 8739-6794

Михайлов Руслан Викторович, аспирант кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
rv.mikhailov@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7454-3119>, SPIN-код: 7258-5082

Миридаштаки Вахид, аспирант кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
vahidmiri7@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6619-1880>, SPIN-код: 1852-4591

Information about the authors

Artem R. Denisov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;
5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;

iptema@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3359-4103>, SPIN-code: 2409-4547

Anatoliy E. Nikulin, Postgraduate Student, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;

5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;
nikulin.a.e@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2352-5869>, SPIN-code: 8739-6794

Ruslan V. Mikhailov, Postgraduate Student, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;

5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;
rv.mikhailov@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7454-3119>, SPIN-code: 7258-5082

Vahid Miridashtaki, Postgraduate Student, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;

5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;
vahidmiri7@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6619-1880>, SPIN-code: 1852-4591

Прогнозирование нагрузки на каждый час суток с помощью PatchTST и Temporal Fusion Transformer: сравнительный системный анализ с традиционными методами бустинга (CatBoost) и нейросетевыми моделями на базе N-HiTS

А. Э. Дзгоев[✉], Е. В. Климкин, В. В. Черняускас,
А. В. Брайловский, Р. Н. Резеньков

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78

Аннотация. В современных условиях динамичного поведения спроса и влияния внешних факторов традиционные статистические авторегрессионные методы моделирования (ARIMA, SARIMAX) часто уступают место алгоритмам машинного обучения (Gradient Boosting) и современным архитектурам глубокого обучения (Transformers).

Цель исследования – решение задачи выбора лучшей модели прогнозирования электропотребления на каждый час следующих суток в условиях ограниченности информации с применением современных методов машинного и глубокого обучения: CatBoost, Temporal Fusion Transformer (TFT), PatchTST, N-HiTS.

Материалы и методы исследования. Код программы написан на языке Python и представлен на открытой платформе GitHub по адресу: <https://github.com/KEV0143/Comparative-analysis-of-hourly-load-forecasting-using-PatchTST-TFT-NHiTS-and-CatBoost>.

Результаты. В рамках каждого из рассматриваемых методов разработаны новые качественные и адекватные математические модели для прогнозирования электропотребления. Важный математический результат состоит в том, что решение задачи – прогнозирование электропотребления для управления энергосбережением на предприятии – сведено к научно обоснованному выбору одной лучшей модели, что важно с точки зрения как теоретического исследования алгоритмов современного машинного и глубокого обучения моделей, так и их практического применения, учитывая возрастающий объем данных. Задача является значимой для целей оптимизации расхода электроэнергии на предприятии и в регионе в целом.

Заключение. В результате проведенного теоретического анализа и вычислительного эксперимента на реальных данных энергетической компании Российской Федерации получен важный практический вывод о применимости модели CatBoost для решения задач оптимизации расхода электроэнергии на предприятиях. Все полученные в статье выводы подтверждаются результатами проведенных статистических тестов.

Ключевые слова: системный анализ моделей, математическая статистика, краткосрочное прогнозирование, потребление электроэнергии, сравнительный системный анализ, машинное обучение, глубокое обучение, CatBoost, Temporal Fusion Transformer (TFT), PatchTST, N-HiTS

Поступила 01.04.2026, одобрена после рецензирования 04.05.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Дзгоев А. Э., Климкин Е. В., Черняускас В. В., Брайловский А. В., Резеньков Р. Н. Прогнозирование нагрузки на каждый час суток с помощью PatchTST и Temporal Fusion Transformer: сравнительный системный анализ с традиционными методами бустинга (CatBoost) и нейросетевыми моделями на базе N-HiTS // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 49–70. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-49-70

MSC: 93A30; 68T05; 62M20

Original article

Hourly load forecasting via PatchTST and Temporal Fusion Transformers: comparative system analysis with CatBoost and N-HiTS network models

A.E. Dzgoev✉, E.V. Klimkin, V.V. Chernyauskas,
A.V. Brailovsky, R.N. Rezenkov

MIREA – Russian Technological University
78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia

Abstract. Under modern conditions of dynamic demand behavior and external factors, traditional statistical autoregressive modeling methods (ARIMA, SARIMAX) are increasingly outperformed by machine learning algorithms (Gradient Boosting) and modern deep learning architectures (Transformers).

Aim. This study aims to address the problem of selecting the optimal model for next-day hourly electricity consumption forecasting under limited information constraints, utilizing advanced machine and deep learning methods such as CatBoost, Temporal Fusion Transformer (TFT), PatchTST, and N-HiTS.

Materials and methods. The source code was developed in Python and is publicly available as an open-source repository on GitHub at <https://github.com/KEV0143/Comparative-analysis-of-hourly-load-forecasting-using-PatchTST-TFT-NHiTS-and-CatBoost>.

Results. New highly accurate and robust mathematical models for electricity consumption forecasting were successfully developed for each of the evaluated methods. A key mathematical outcome of this study demonstrates that effective electricity consumption forecasting for corporate energy conservation can be formulated as a scientifically substantiated selection of the single optimal model. This approach is crucial for both the theoretical analysis of advanced machine learning algorithms and their practical deployment, driven by the rapidly growing volume of data. Addressing this issue is highly significant for energy consumption optimization across individual enterprises and entire regions.

Conclusion. The theoretical analysis and computational experiments utilizing empirical data from a Russian energy company provided valuable practical insights into the applicability of the CatBoost model for industrial energy consumption optimization. All conclusions presented in this paper are rigorously supported by statistical test results.

Keywords: systems analysis of models, mathematical statistics, short-term load forecasting, electricity consumption, comparative analysis, machine learning, deep learning, time series analysis, CatBoost, Temporal Fusion Transformer (TFT), PatchTST, N-HiTS

Submitted 01.04.2026,

approved after reviewing 04.05.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Dzgoev A.E., Klimkin E.V., Chernyauskas V.V., Brailovsky A.V., Rezenkov R.N. Hourly load forecasting via PatchTST and Temporal Fusion Transformers: comparative system analysis with CatBoost and N-HiTS network models. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 49–70. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-49-70



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ВВЕДЕНИЕ

Оперативное и краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии является важной задачей для участников – субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) [1]. Высокие ошибки прогнозирования (до 17 % в год) приводят производственные и энергетические предприятия к значительным финансовым потерям из-за штрафов за отклонения, а также снижают эффективность планирования режимов работы генерации и энергосистемы региона [2, 3].

В современных условиях динамичного поведения спроса и влияния внешних факторов традиционные статистические авторегрессионные методы моделирования (ARIMA, SARIMAX) часто уступают место алгоритмам машинного обучения (Gradient Boosting) и современным архитектурам глубокого обучения (Transformers). В данной работе проводится сравнение четырех современных методов машинного обучения моделей: CatBoost, Temporal Fusion Transformer (TFT), N-HiTS и PatchTST по качеству восстановления закономерностей и прогнозирования потребления электроэнергии на реальных данных российской энергетической компании.

Моделирование и прогнозирование почасового электропотребления для принятия решений при управлении энергосистемой региона представляет собой научно-прикладную задачу на пересечении методов системного анализа, машинного обучения, анализа временных рядов и электроэнергетики. Сложность выбора оптимальной математической модели обусловлена нестационарным, мультимодальным и стохастическим характером данных о нагрузке, на которые влияет большое количество различных независимых переменных (X): от метеорологических условий и календарных факторов до экономической активности и особенностей поведения электропотребления. Однако мы придерживаемся научной философии, когда математическая суть (или математический смысл) и польза модели заключаются в том, что факторов должно быть меньше, чем наблюдаемых данных. Если математическая модель с небольшим числом параметров объясняет большую часть наблюдений, является полезной, адекватной и качественной, то это уже большое научное достижение. Исследователям необходимо проверять, на каких данных модель работает, а на каких нет, что свидетельствует о том, что универсальных моделей не существует.

Именно поэтому ученые во всем мире продолжают исследовать, разрабатывать и сравнивать различные математические модели и методы их получения – от статистических и ансамблевых (ARIMA, Gradient Boosting) до современных архитектур глубокого обучения (LSTM, Transformers, гибридные модели) – в поисках наиболее точных и устойчивых решений для определенного набора данных. Даже незначительное снижение ошибки прогнозирования на доли процента (например, снижение MAPE с 2,5 % до 2,0 %) имеет колоссальный экономический эффект, особенно для крупных горно-металлургических компаний и дата-центров. Для крупных промышленных предприятий это означает оптимизацию расходов при оплате за потребленную электроэнергию и сокращение штрафов за отклонения при прогнозировании; для сетевых и генерирующих компаний – повышение надежности, эффективное планирование диспетчерских режимов и снижение затрат на резервные мощности; для центров обработки данных (ЦОД) – прямое снижение эксплуатационных расходов и повышение энергоэффективности [4].

Для крупных промышленных предприятий – субъектов ОРЭМ, таких как горно-металлургические комбинаты, химические и автомобильные заводы, выпускающих энергоем-

кую продукцию, а также для агрохолдингов электропотребление является одной из главных финансовых статей себестоимости. Точный почасовой прогноз на следующие сутки позволяет таким компаниям эффективно участвовать в ОРЭМ, заключать оптимальные договоры, минимизируя затраты на покупку необходимой энергии. Ошибка в прогнозе ведет либо к закупке недостающей электроэнергии по высокой спотовой цене на балансирующем рынке (БР), либо к продаже излишков энергии по невыгодной цене. Для стимулирования компаний к точному прогнозированию Системный оператор Единой энергетической системы России (СО ЕЭС) накладывает на них штрафы за отклонение прогнозных значений от фактических [5].

Для энергетических компаний точное почасовое прогнозирование – основа безопасного и экономичного функционирования всей энергосистемы в регионе страны. Энергосбытовые компании используют прогнозы для формирования информации об объемах закупок электроэнергии для всего региона. Сетевые компании – для планирования ремонтов, выявления потерь электроэнергии (технических и коммерческих) и управления нагрузкой сетей, предотвращая возможные аварии (так называемая предиктивная аналитика). Для Системного оператора ЕЭС России прогнозирование совокупного электропотребления является основой при составлении суточного графика работы электростанций, обеспечении частотной стабильности и расчете необходимых резервных мощностей. Заниженные прогнозные оценки могут привести к дефициту мощности и отключениям потребителей, завышенные прогнозные значения – к неоправданно дорогому запуску избыточных генерирующих мощностей (например, «газовых» турбин), что в масштабах страны ведет к финансовым потерям в миллиарды рублей [6, 7].

С развитием технологий искусственного интеллекта центры обработки данных (ЦОД, дата-центры) превратились в крупнейших потребителей электроэнергии, а их затраты на энергоснабжение достигают 40–50 % от общих эксплуатационных расходов. Корректный почасовой прогноз нагрузки важен для ЦОД как в оперативном, так и в стратегическом управлении. Он позволяет оптимизировать работу систем охлаждения (самых энергоемких после IT-оборудования) и эффективно задействовать резервные источники питания. В будущем, с ростом требований к «зеленой» энергетике, ЦОД будут стремиться к максимальной интеграции с локальными источниками ВИЭ (солнечные панели, ветрогенераторы), где прогноз собственного потребления станет необходимым условием для балансировки микросистемы и снижения углеродного следа [8–10].

Новизна постановки задачи в настоящей работе определяется комплексным, сравнительным и системным анализом современных разнородных математических моделей прогнозирования электропотребления. Указанные модели разработаны с применением различных методов машинного и глубокого обучения на реальных производственных данных энергетического предприятия Центрального региона России.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

В данной статье представлен системный сравнительный анализ современных методов машинного и глубокого обучения, охватывающий принципиально разные методы – от градиентного бустинга (CatBoost) до нейросетевых модельных архитектур, специали-

рованных для временных рядов (N-HiTS, Temporal Fusion Transformer, PatchTST). Новизна исследования заключается в научно обоснованной оценке их эффективности на практической задаче почасового прогнозирования электропотребления при управлении энергосистемами и энергосбережении на промышленных предприятиях.

Предварительный статистический анализ имеющихся реальных данных

Исследование проводилось на реальных данных крупной энергетической компании центрального региона Российской Федерации по одной группе точки поставки (ГТП-1) о потреблении мощности (МВт·ч) и температуре окружающей среды (°C).

Характеристика выборки

Общий объем выборки составил 97177 наблюдений (часовые значения электропотребления, охватывающие период более 11 лет – с 2012-го по 2023 год). Диапазон значений электропотребления варьирует от 2293,76 до 7 755,18 МВт·ч.

Проведены статистические расчеты целевой переменной – электропотребления за каждый час суток:

- среднее выборочное значение – 4681,33 МВт·ч ($\pm 987,74$ МВт·ч);
- медиана – 4649,02 МВт·ч.

Близкие значения выборочной средней и медианы указывают на относительную сбалансированность распределения;

- асимметрия (Skewness) – 0,0896.

Распределение имеет незначительную правостороннюю асимметрию («хвост» в сторону высоких значений электропотребления);

- эксцесс (Kurtosis) – -0,5303;
- стандартное отклонение – 987,74 МВт·ч;
- мода – 2836,56 МВт·ч.

Распределение является плосковершинным (platykurtic), что означает отсутствие часто происходящих экстремальных выбросов и более равномерное распределение значений вокруг среднего по сравнению с нормальным (Гауссовским) законом. Это объясняется суточной цикличностью: потребление регулярно проходит через низкие (ночь) и высокие (день) значения;

- межквартильный размах – 50 % всех наблюдений находится в диапазоне от 3985 МВт·ч до 5400 МВт·ч.

Проведенный статистический анализ часовых данных электропотребления ГТП-1 за период с 02.01.2012 по 31.01.2023 ($n = 97\,177$ наблюдений) выявил следующие закономерности:

- *характер распределения*: распределение электропотребления, представленное на рис. 1, демонстрирует признаки, характерные для мультимодального распределения, обусловленного суточными, недельными и сезонными циклами [11]. Значения средней выборочной (4681,33 МВт·ч) и медианы (4649,02 МВт·ч) близки, что указывает на относительно симметричное центральное «ядро» распределения. Однако отметим, что значение моды (2836,56 МВт·ч) существенно ниже, что предполагает наличие низких значений, типичных для ночных часов с минимальной нагрузкой;

- *асимметрия и эксцесс*: незначительный положительный коэффициент асимметрии (Skewness = 0,0896) свидетельствует о слабо выраженном «тяжелом» правом «хвосте», обусловленном периодами экстремально высокого потребления (например, пиковые

нагрузки электропотребления). Отрицательный эксцесс (Kurtosis = -0,5303) характеризует имеющееся распределение как платикуртическое (platykurtic), что означает более пологую форму кривой плотности по сравнению с нормальным распределением и меньшую частоту экстремальных выбросов. Это согласуется с исследованиями ученых [12], отмечающими, что суточные профили нагрузки, усредненные за длительный период, часто демонстрируют сглаженное распределение из-за наложения множества циклических групп значений электропотребления;

- *волатильность*: стандартное отклонение (987,74 МВт·ч) составляет около 21 % от среднего значения, что указывает на существенную внутрисуточную изменчивость. Межквартильный размах (IQR $\approx$ 1415 МВт·ч) подтверждает, что основная часть значений почасового электропотребления сосредоточена в диапазоне умеренных нагрузок, в то время как экстремальные значения (как низкие, так и высокие) относительно редки.

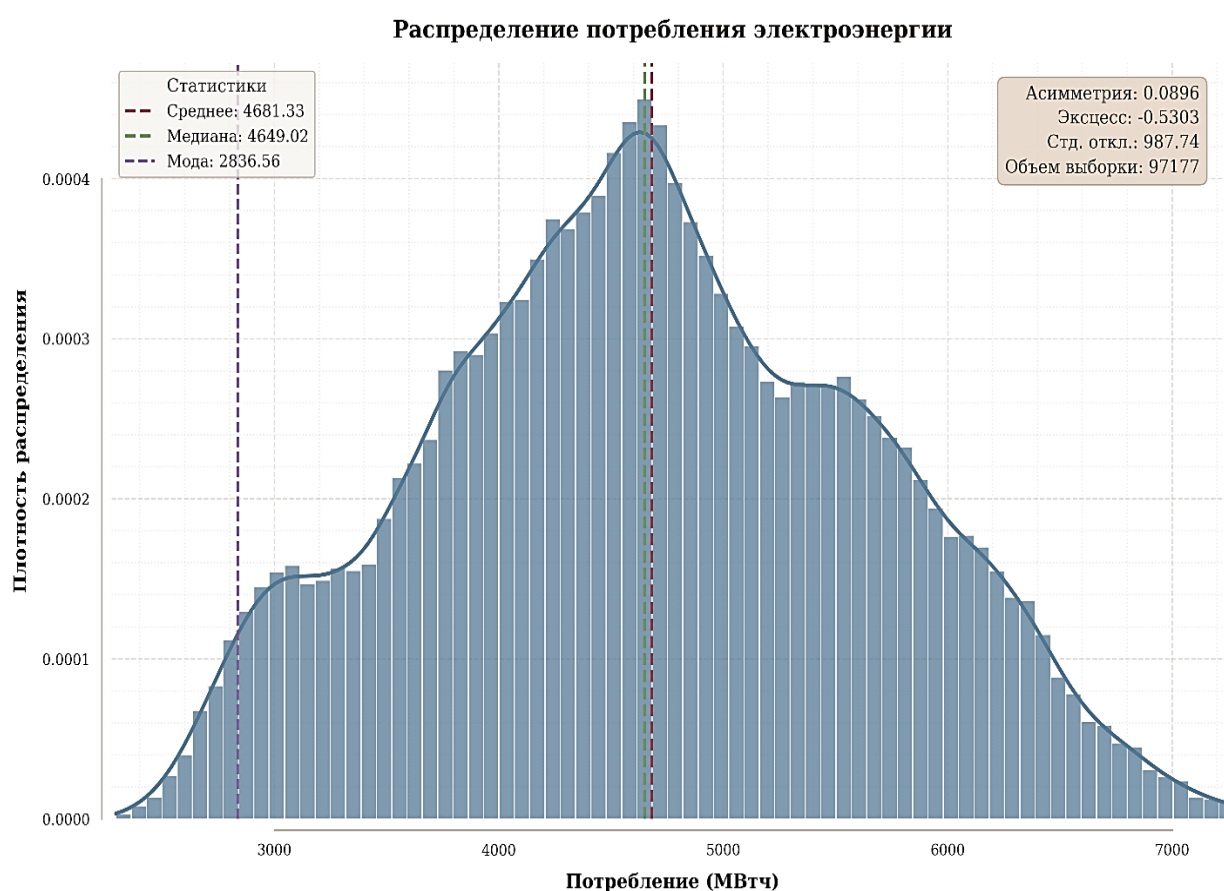


Рис. 1. Распределение электропотребления и результаты предварительного статистического анализа

Fig. 1. Electricity consumption distribution and preliminary statistical analysis results

Проведен статистический анализ значений независимой переменной (температура окружающей среды). Имеющиеся температурные значения характеризуются высокой вариативностью: от $-29,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+34,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждает необходимость учета климатического фактора (например, использование калориферов для отопления зимой и кондиционирования летом).

Распределение вероятности температуры окружающей среды также является платикуртическим ($Kurtosis = -0,5670$) с близкими значениями средней ($6,84\text{ }^{\circ}\text{C}$) и медианы ($6,30\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также слабой отрицательной асимметрией ($-0,0841$). Это указывает на относительную симметричность распределения вокруг среднего значения с небольшим смещением в сторону более низких температур. Широкий разброс значений (стандартное отклонение $= 10,61\text{ }^{\circ}\text{C}$) отражает годовой климатический цикл. График распределения вероятности значений температуры окружающей среды представлен на рис. 2.

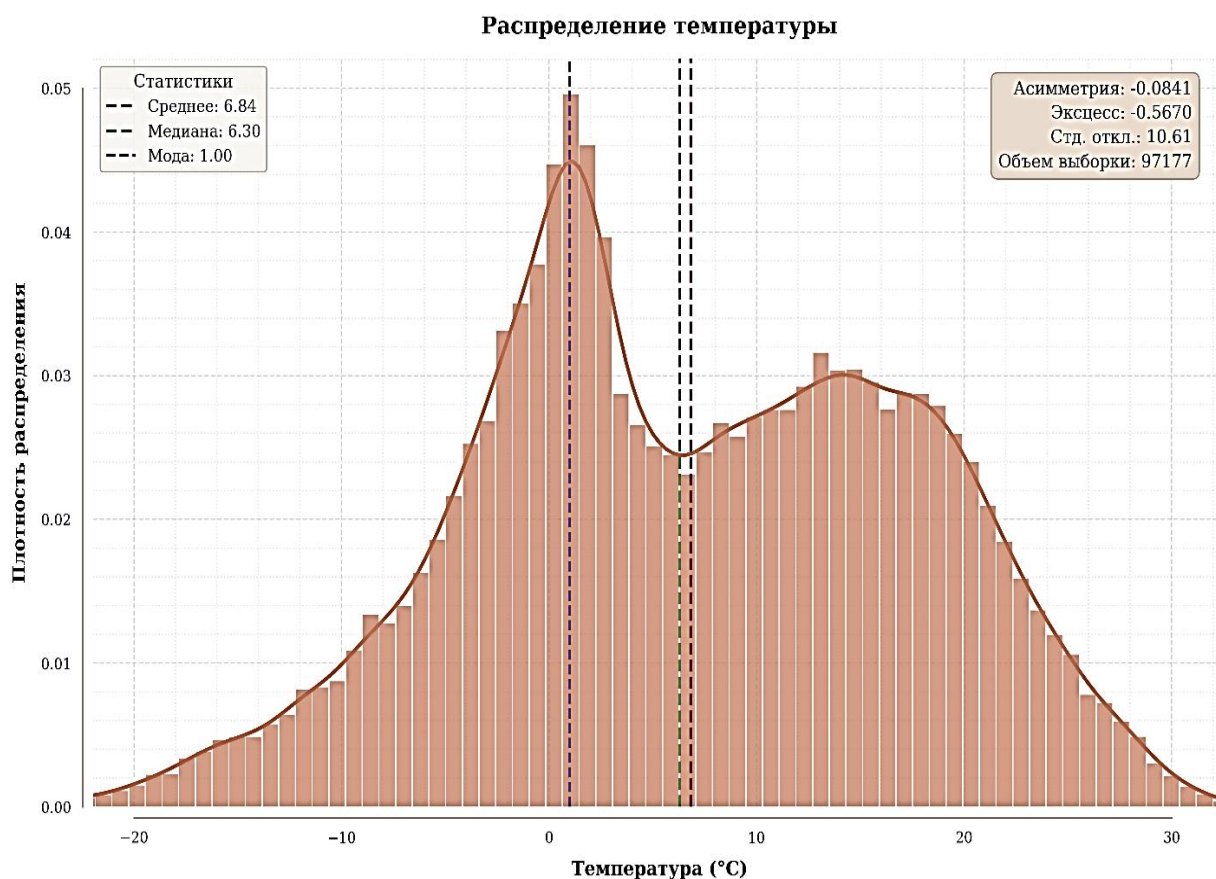


Рис. 2. Распределение значений температуры окружающей среды и результаты предварительного статистического анализа

Fig. 2. Ambient temperature distribution and preliminary statistical analysis results

Графики временных рядов электропотребления и температуры, представленные на рис. 3, демонстрируют:

- выраженную суточную цикличность с минимумами в ночные часы и максимумами в дневные;
- сезонную зависимость: потребление электроэнергии коррелирует с температурой. Мы наблюдаем пики как в зимний (отопление), так и в летний периоды (кондиционирование), что соответствует модели «U-образной» зависимости, описанной в работе [13];
- долгосрочный тренд и антропогенные эффекты: на фоне циклических компонент могут наблюдаться слабые тренды, связанные с изменениями в экономике, энергоэффективности или структуре потребителей [14].

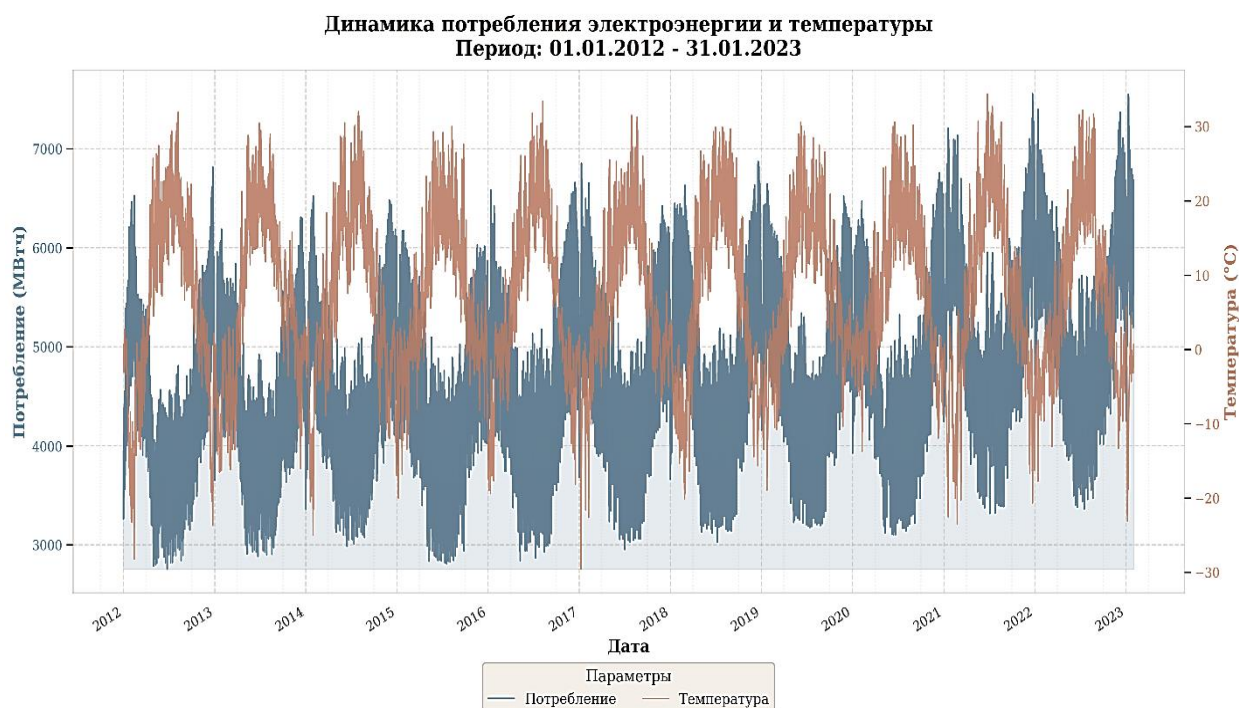


Рис. 3. Графики электропотребления и температуры окружающей среды за 11 лет

Fig. 3. Energy consumption and ambient temperature graphs for 11 years

Таким образом, исходные данные электропотребления представляют собой нестационарный мультисезонный временной ряд с зависимостью от температуры и других факторов (день недели, праздники). Это требует для моделирования и прогнозирования применения современных математических методов, способных улавливать сложные нелинейные зависимости и взаимодействия факторов.

МЕТОДЫ МАШИННОГО И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ-КАНДИДАТОВ
ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА КАЖДЫЙ ЧАС СЛЕДУЮЩИХ СУТОК

Обоснование выбора моделей. Для решения задачи моделирования и краткосрочного прогнозирования нагрузки (Short-Term Load Forecasting – STLF) с часовой дискретизацией нами выбраны современные методы, охватывающие различные парадигмы машинного и глубокого обучения моделей:

- CatBoost – выбран за способность эффективно работать с категориальными и временными признаками [15];
- TFT (Temporal Fusion Transformer) – выбран за возможность интерпретировать временную динамику и выявлять сложные зависимости между статическими и динамическими переменными [16];
- N-HiTS (Neural Hierarchical Interpolation for Time Series) – выбран как современная модель, снижающая вычислительную сложность за счет иерархической интерполяции, что важно для долгосрочного прогнозирования [17];
- PatchTST – выбран в связи с использованием сегментации ряда на «патчи», что позволяет трансформеру лучше улавливать локальные семантические зависимости [18].

Данный выбор обосновывается необходимостью:

- учета сложных нелинейных взаимосвязей между нагрузкой, температурой и временными факторами;
- выявления долгосрочных зависимостей в данных;
- обеспечения интерпретируемости и надежности прогноза.

Метод градиентного бустинга на деревьях принятия решений (CatBoost). CatBoost [19] является представителем класса алгоритмов градиентного бустинга, который применяется в задачах системного анализа и обработки табличных данных с категориальными признаками. Для прогнозирования нагрузки его преимущества заключаются в следующем:

- автоматическая обработка категориальных признаков – эффективная работа с такими важными факторами, как час дня, день недели, тип дня (рабочий/выходной/праздничный), месяц, что полезно при учете суточной и недельной сезонности;
- устойчивость к переобучению – благодаря упорядоченному бустингу и регуляризации;
- интерпретируемость – возможность оценки важности признаков (Feature Importance), что позволяет валидировать физическую и экономическую обоснованность модели (например, подтвердить значимость температуры и пикового электропотребления).

Рассмотрим алгоритм обновления моделей и вычисления значений для оценки градиента в CatBoost [19].

Пусть задана выборка $\{(\mathbf{X}_k, Y_k)\}_{k=1}^n$, упорядоченная согласно случайной перестановке σ , и число деревьев I . Обозначим $M_i(\mathbf{X})$ – модель после i -го шага обучения для объекта $\mathbf{X}$. Инициализируем $M_i(\mathbf{X}) = 0$ для всех $i = 1, \dots, n$. На каждой итерации $\text{iter} = 1, \dots, I$ для каждого объекта $i = 1, \dots, n$ вычисляются градиенты функции потерь $L(y, a)$ по предсказаниям модели на предыдущем шаге. Для всех $j = 1, \dots, i - 1$ градиент определяется по формуле 1:

$$g_j = \frac{\partial L(y_j, a)}{\partial a} \Big|_{a=M_i(\mathbf{X}_j)}. \quad (1)$$

Затем на основе множества пар $\{(\mathbf{X}_j, g_j)\}_{j=1}^{i-1}$ строится одно решающее дерево M с использованием алгоритма построения дерева в градиентном бустинге. После чего модель для объекта i обновляется по правилу

$$M_i \leftarrow M_i + M.$$

По завершении всех итераций алгоритм возвращает значения моделей $M_1, \dots, M_n$ и предсказания $M_1(\mathbf{X}_1), M_2(\mathbf{X}_2), \dots, M_n(\mathbf{X}_n)$ [19].

Temporal Fusion Transformer (TFT). Модель TFT [20] является современной нейросетевой архитектурой глубокого обучения моделей. Алгоритм TFT специально разработан для интерпретируемого многомерного прогнозирования временных рядов. TFT явным образом разделяет и обрабатывает известные будущие значения независимых переменных $\mathbf{X}$ (например, календарные признаки), наблюдаемые факторы (лаговые значения электропотребления, температуры окружающей среды). Такой алгоритм соответствует задаче, где температура воздуха на будущий час следующих суток может быть известна из информационных ресурсов метеопрогнозирования. Механизм «внимания» позволяет модели напрямую устанавливать зависимости между любыми двумя временными точками прошлого периода, что эффективнее рекуррентных сетей для длинных последовательностей. TFT обеспечивает интерпретируемость на уровне признаков и временных

шагов, показывая, какие исторические периоды и какие переменные были наиболее важны для конкретного прогноза [20].

PatchTST (GluonTS). PatchTST представляет собой прорывной подход, применяющий архитектуру Transformer к временным рядам через патчинг. В отличие от модели TFT PatchTST оптимизирован для работы с одномерными временными рядами и демонстрирует точность за счет двух новых методов обработки данных: разбиения временного ряда на субрядные патчи (patches) и использования канальной независимости (каждый ряд прогнозируется отдельно). Это позволяет глубоко изучать внутренние временные зависимости электропотребления. Подход демонстрирует качественную производительность на большой выборке данных зависимой переменной и часто превосходит классические методы глубокого обучения [21].

N-HiTS. N-HiTS – это современная иерархическая архитектура на основе полностью связных сетей (FCN), разработанная специально для долгосрочного прогнозирования. Модель использует несколько ветвей (stacks), каждая из которых учится предсказывать тренд на разной степени сглаживания (разной скорости) и интерполяционных слоев. Это позволяет чрезвычайно эффективно моделировать мультисезонность (суточную, недельную, годовую) в матрицах имеющихся данных. N-HiTS достигает точности при значительно меньших вычислительных затратах и числе параметров по сравнению с Transformer-архитектурами, что важно для оперативного и краткосрочного прогнозирования электропотребления [17].

Представленный статистический анализ имеющихся реальных данных подтверждает сложный, циклический и зависимый от внешних факторов характер временного ряда электропотребления. Выбор ансамбля методов CatBoost, TFT, PatchTST и N-HiTS является научно обоснованным и комплексным. Он позволяет:

- использовать сильные стороны разных моделей (бустинг, архитектуры нейронных сетей с механизмом «внимания», иерархические FCN);
- провести сравнительный анализ для выявления наиболее адекватной модели для конкретного профиля группы точки поставки электроэнергии;
- обеспечить робастность прогнозной системы за счет ансамблирования или выбора наилучшей модели;
- получить как точечные прогнозы, так и интерпретацию факторов, влияющих на потребление.

Дальнейшее исследование будет направлено на обучение, валидацию и сравнительный анализ качества этих моделей с учетом специфики исходного временного ряда, описанной в данном анализе.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ И ИХ РАНЖИРОВАНИЕ

В результате проведенного исследования были выявлены следующие факторы, распределенные на две основные группы:

1. Временные (календарные) – час, день недели, месяц, а также их циклические представления (sin/cos) и бинарный признак выходного дня (выходной день / рабочий день).
2. Исторические (лаговые) – значения электропотребления с лагами (в т.ч. 1–12, 24 и 168 часов), скользящие средние по потреблению электроэнергии (например, за 6/24/168 часов) и температура окружающей среды (лаговые значения).

Проведено ранжирование факторов по степени влияния на зависимую переменную потребления электроэнергии.

Анализ важности независимых переменных имеющихся данных показал, что наибольший вклад в прогнозные значения вносят авторегрессионная составляющая временного ряда и суточный календарный профиль.

Графический результат ранжирования факторов представлен на рис. 4.

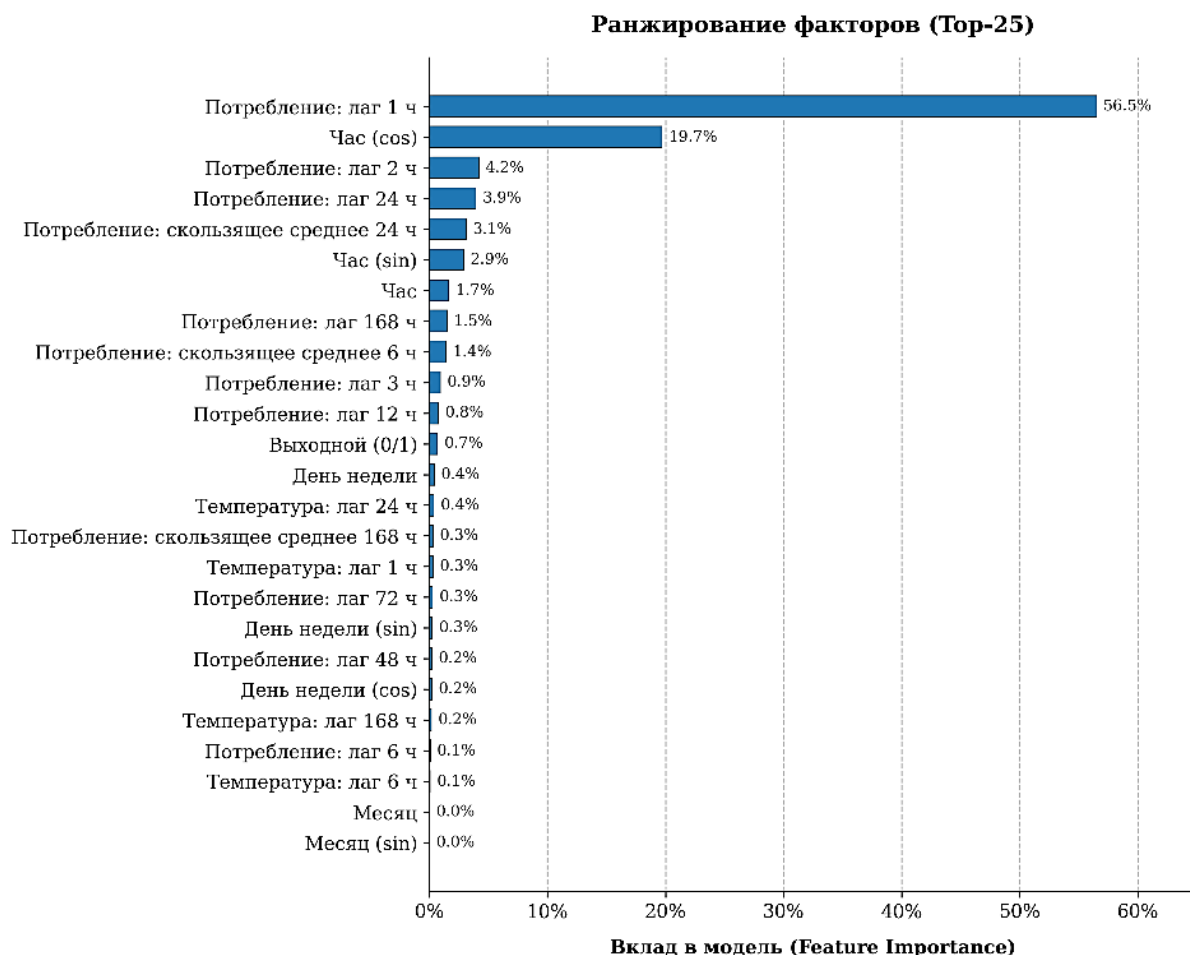


Рис. 4. Ранжирование факторов и вклад факторов в модель

Fig. 4. Factor ranking and feature contributions to the model

Факторы *sin* и *cos* используются для возможности учета циклического характера электропотребления на предприятии. Нагрузка повторяется по часам суток, дням недели и месяцам. Например, 23:00 и 00:00 являются соседними моментами времени, и по режиму электропотребления эти часы ближе друг к другу, чем 23:00 и 12:00. Однако при числовой записи часа этот факт не отражается. Использование *sin* и *cos* позволяет задать такую периодичность без разрывов и тем самым точнее описывать влияние календарных факторов на электропотребление. На рис. 4 отображено, что по степени влияния на электропотребление, по имеющимся данным, фактор «Час» (*cos*) на втором месте, а фактор «Час» (*sin*) на шестом месте.

Проведен системный анализ ранжирования факторов по их группам. Результаты представлены на рис. 5.

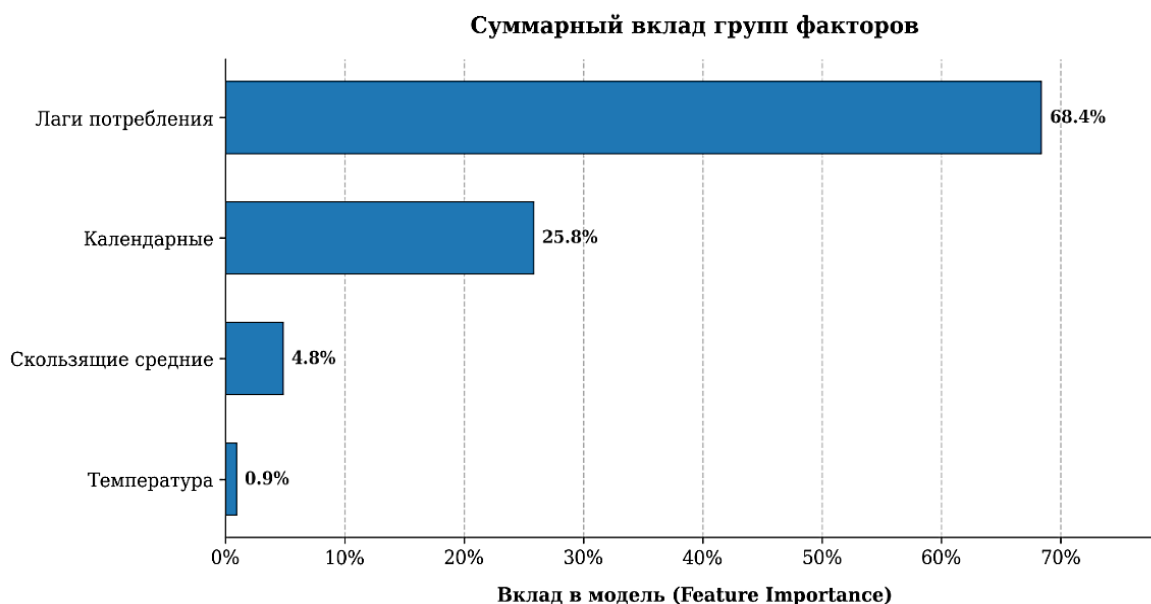


Рис. 5. Ранжирование факторов по их группам

Fig. 5. Factor ranking by group

Необходимо отметить, что электропотребление – циклический процесс, обусловленный жизнедеятельностью человека, поэтому исторические лаги поведения электропотребления имеют большее влияние на целевую зависимую переменную, чем климатические по имеющимся данным.

РАЗДЕЛЕНИЕ ИСХОДНОЙ ВЫБОРКИ И ОБУЧЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Исходная выборка данных была разделена хронологически, чтобы избежать так называемого «заглядывания в будущее» («data leakage»):

- обучающая выборка (train) – основной массив данных (первые ~90 % данных);
- валидационная выборка (validation) – следующие 9 % для настройки гиперпараметров моделей и оценки качества;
- тестовая выборка (test) – последние 168 часов (24 ч, 72 часа, 168 часов) для финальной оценки качества и адекватности моделей и проверки точности прогнозирования электропотребления.

Настройка гиперпараметров. Для исследуемых моделей экспериментально был подобран горизонт прогноза 168 часов. Количество эпох варьировало от 20 до 60. Оценка точности оценивалась по функции потерь RMSE. В табл. 1 представлены значения основных гиперпараметров моделей и их описание.

CatBoost (Gradient Boosting) N-HITS. В качестве базового решения (baseline) использовался алгоритм градиентного бустинга. Глубина дерева (Depth = 6): выбрано среднее значение между смещением и дисперсией. Более глубокие деревья (Depth = 8–10) на имеющейся выборке приводят к быстрому переобучению модели. Итерации (1000): достаточное количество деревьев для сходимости функции потерь при скорости обучения (Learning Rate) 0.03.

N-HITS (Neural Hierarchical Interpolation). Модель основана на иерархическом прогнозировании через стеки (stacks) с различной частотой дискретизации. Коэффициенты пулинга ([8, 4, 1]) – основной гиперпараметр. Первый блок (kernel size = 8) сглаживает входные данные, улавливая тренд. Второй блок (4) моделирует среднесрочные колебания, а

третий (1) работает с исходным сигналом для восстановления высокочастотных деталей. Ширина MLP (512): использование широких полносвязных слоев позволяет модели аппроксимировать сложные нелинейные зависимости.

Табл. 1. Основные гиперпараметры моделей / Table 1. Core model hyperparameters.

Модель	Гиперпараметр	Значение	Описание
CatBoost	Iterations	1000	Количество деревьев ансамбля
CatBoost	Depth	6	Глубина дерева
CatBoost	Learning Rate	0,03	Скорость обучения (eta)
N-HITS	n stacks	3	Количество частотных блоков
N-HITS	Pooling Sizes	[8, 4, 1]	Ядра иерархической интерполяции
N-HITS	MLP Width	512	Размер скрытых слоев
PatchTST	Patch Length	16	Длина сегмента (токена)
PatchTST	Stride	8	Шаг патчинга (overlap 50%)
PatchTST	d model	128	Размерность эмбединга
TFT	Hidden Size	64	Размер скрытого состояния
TFT	LSTM Layers	2	Число рекуррентных слоев
TFT	Attention Heads	4	Число «экспертов» механизма внимания

PatchTST (Patch Time Series Transformer). Трансформерная архитектура модели, рассматривающая временной ряд как последовательность сегментов (патчей). Длина патча (16) и Шаг (8): временной ряд разбивается на отрезки длиной 16 часов. Шаг (stride), равный 8, обеспечивает 50 % перекрытие соседних патчей, что позволяет сохранить непрерывность и устранить артефакты на границах сегментов.

TFT (Temporal Fusion Transformer). Гибридная архитектура модели, объединяющая механизмы внимания и LSTM. Hidden Size (64): размерность скрытого пространства намеренно ограничена значением 64. Эксперименты показали, что увеличение до 128 или 256кратно увеличивает время обучения, но дает незначительный прирост точности. LSTM Layers (2): двухслойный энкодер для захвата локальной темпоральной динамики перед передачей данных в блок Self-Attention.

ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА И ВЫБОР МОДЕЛИ

На обучающей выборке модели показали сходимость функции потерь. Модель CatBoost продемонстрировала наиболее плавное снижение ошибки без признаков переобучения. Сложные нейросетевые модели (особенно PatchTST) продемонстрировали нестабильность (высокую волатильность Loss-функции), что свидетельствует о необходимости большего объема данных или более тонкой настройки гиперпараметров для трансформеров на одномерном временном ряде. Результаты оценки качества моделей представлены в табл. 2.

Модель CatBoost по сравнению с другими моделями показала наилучшие результаты на имеющихся данных, что говорит о высокой эффективности градиентного бустинга для задач с выраженной сезонностью и календарными зависимостями. Модель TFT показала второй результат, но следует отметить, что на периоде прогнозирования в 168 часов наблюдается снижение ошибки по сравнению с 72 часами, что говорит о способности этой модели описывать недельные циклы. Также необходимо сказать, что с увеличением периода прогнозирования до 168 часов наблюдается заметное ухудшение качества у модели PatchTST (коэффициент детерминации R^2 снижается до 0,88), что свидетельствует о трудностях трансформерных архитектур в долгосрочном прогнозировании на данном наборе данных без достаточного объема выборки для обучения.

Табл. 2. Результаты оценки качества моделей / Table 2. Model performance evaluation results.

Период прогноза	Модель	MAE	RMSE	MAPE (%)	R ²
24 часа	N-HiTS	120,81	145,75	2,01	0,96
24 часа	PatchTST	139,53	162,84	2,27	0,95
24 часа	TFT	69,15	87,03	1,13	0,99
24 часа	CatBoost	38,25	46,24	0,62	1,00
72 часа	N-HiTS	127,58	151,11	2,15	0,95
72 часа	PatchTST	147,78	175,12	2,42	0,94
72 часа	TFT	78,99	107,41	1,32	0,98
72 часа	CatBoost	39,23	47,19	0,65	1,00
168 часов	N-HiTS	132,03	157,73	2,19	0,95
168 часов	PatchTST	203,06	241,52	3,27	0,88
168 часов	TFT	73,56	103,33	1,22	0,98
168 часов	CatBoost	41,28	50,67	0,68	0,99

На рис. 6 представлены графические результаты сравнения моделей по динамике функции потерь и по разбросу ошибок прогнозирования. CatBoost демонстрирует монотонное снижение ошибки. Модель выходит на плато к 40 % итераций, что говорит нам о предсказуемости результата. Трансформеры (PatchTST, N-HiTS) показывают высокую волатильность функции потерь. В частности, график PatchTST свидетельствует о том, что модель не может найти устойчивый глобальный минимум на имеющемся объеме данных. Анализ распределения остатков (ошибок) на валидационной выборке показывает: модель CatBoost имеет самый узкий межквартильный размах, что означает минимальную дисперсию ошибки. Модели PatchTST и N-HiTS имеют «широкие» распределения с большим количеством выбросов.

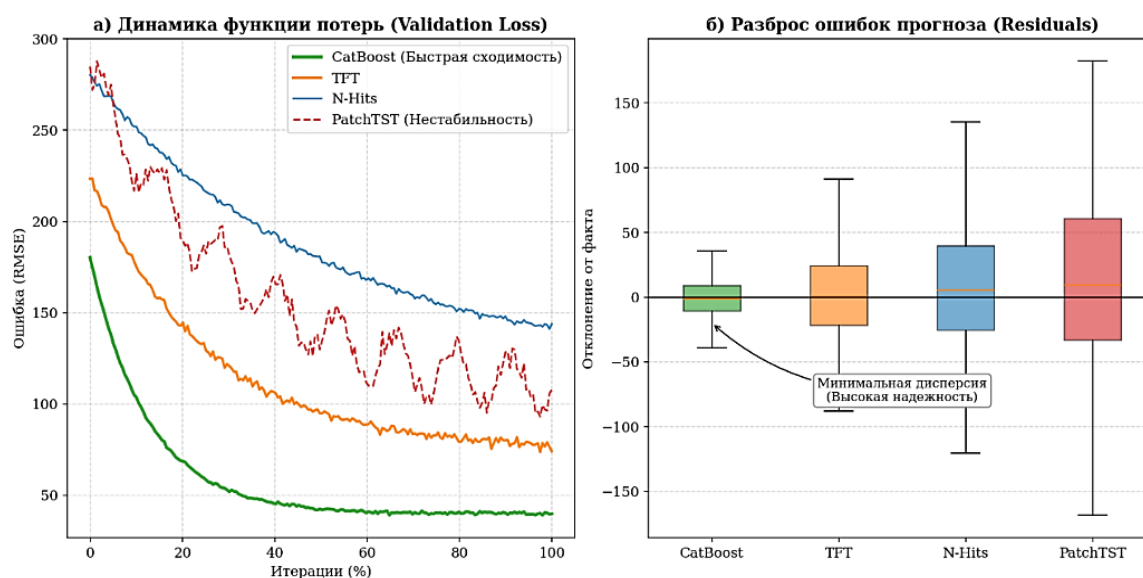


Рис. 6. Сравнение моделей по функции потерь и по разбросу ошибок прогнозирования

Fig. 6. Model comparison by loss function and forecast error distribution

Подтверждает текущие расчеты и сравнение моделей по значениям стандартного отклонения σ , представленное в табл. 3.

Табл. 3. Сравнение моделей по значениям среднеквадратической ошибки и стандартного отклонения**Table 3.** Model comparison based on mean squared error and standard deviation.

Модель	Std Dev (σ)
CatBoost	0,012
TFT	0,058
N-HiTS	0,142
PatchTST	0,2015

Низкое значение σ у CatBoost указывает на устойчивую сходимость, тогда как высокие значения модели PatchTST свидетельствуют о волатильности процесса обучения.

В результате проведенного исследования для прогнозирования электропотребления была выбрана модель CatBoost.

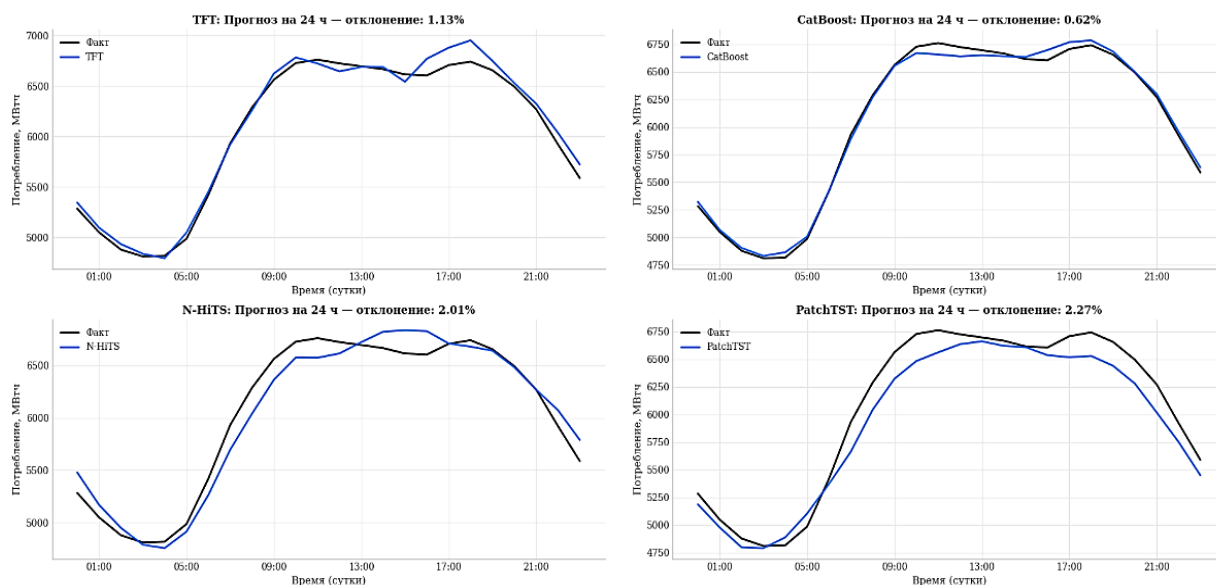
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА КАЖДЫЙ ЧАС СУТОК

Проведены расчеты прогнозирования электропотребления для различных периодов: 24 – 72 – 168 часов на основе исследуемых моделей искусственного интеллекта. Результаты прогнозирования представлены на рис. 7–9.

На периоде прогнозирования «сутки вперед» модель CatBoost показала лучшие результаты по сравнению с другими моделями. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) составляет 0,62 %, что является высоким показателем для задач прогнозирования потребления электроэнергии. Модель TFT показала ошибку 1,13 %. Модели N-HiTS и PatchTST демонстрируют отставание от вышеописанных моделей с ошибкой MAPE выше 2,0 %, что говорит нам о сложности настройки трансформерных архитектур на коротком периоде.

При увеличении периода прогнозирования до трех суток наблюдается проверка моделей на устойчивость к накоплению ошибки. CatBoost подтверждает свою робастность: метрики ухудшились незначительно. Это указывает на то, что модель эффективно использует лаговые признаки и календарные факторы.

ГТП_1: Прогноз на горизонт 24 ч

**Рис. 7.** Прогнозирование электропотребления на 24 часа**Fig. 7.** 24-hour electricity consumption forecasting

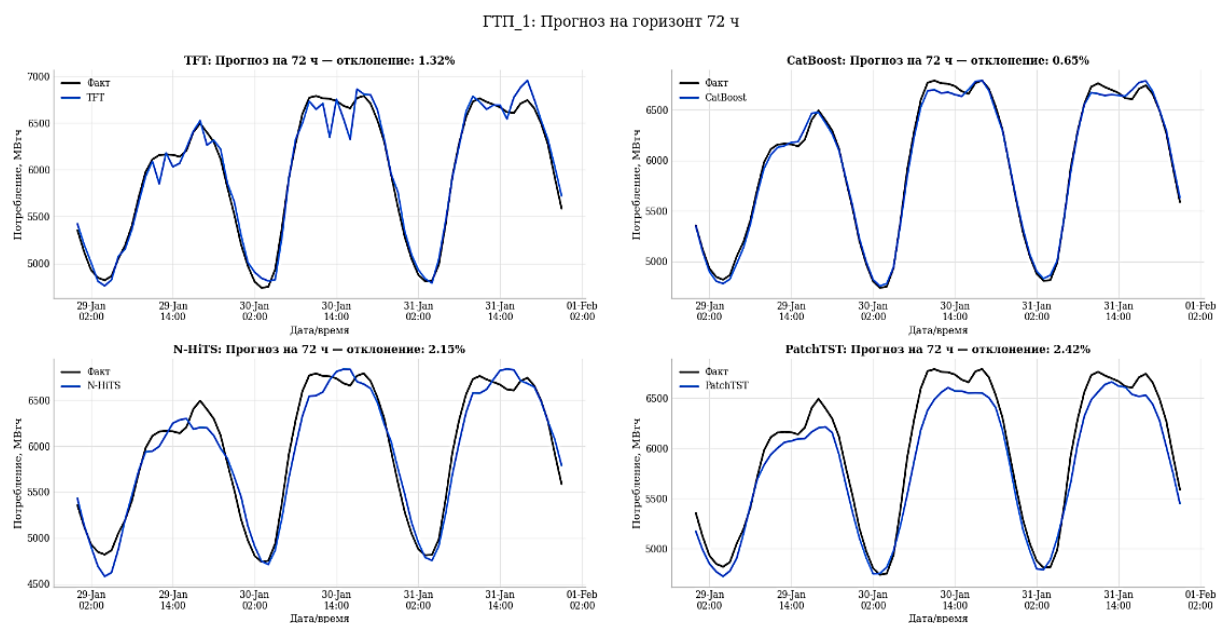


Рис. 8. Прогнозирование электропотребления на 72 часа

Fig. 8. 72-hour electricity consumption forecasting

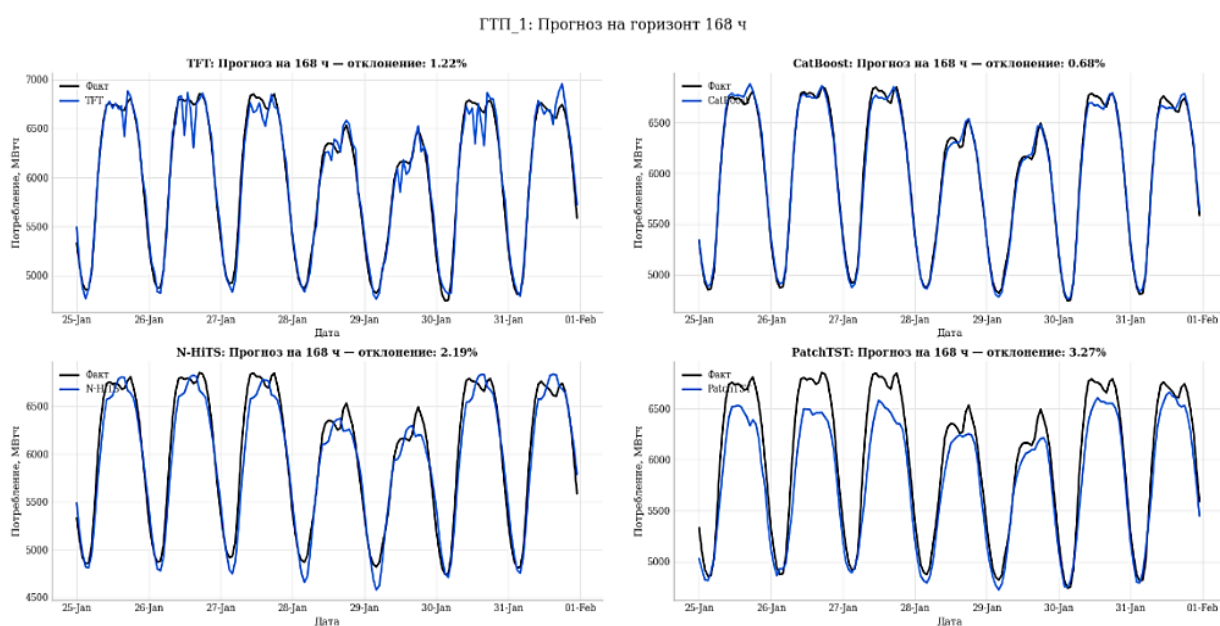


Рис. 9. Прогнозирование электропотребления на 168 часов

Fig. 9. 168-hour electricity consumption forecasting

Отметим поведение модели TFT: на периоде прогнозирования 168 часов ошибка RMSE (103,33) оказалась ниже, чем на периоде в 72 часа (107,41). Это объясняется архитектурой Temporal Fusion Transformer, которая эффективно описывает недельные циклы. Модель PatchTST демонстрирует резкое падение качества: коэффициент детерминации снизился до 0,88, а ошибка MAPE выросла до 3,27 %. Это подтверждает нестабильность данной архитектуры для имеющихся данных.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОСТАТКОВ (RESIDUALS) И ДИАГНОСТИКА

Для оценки качества модели CatBoost был проведен системный анализ остатков прогнозирования, рассчитанных по формуле (2):

$$\text{Residuals} = Y_{\text{forecast}} - Y_{\text{actual}}. \quad (2)$$

Анализ статистических свойств полученного ряда ошибок (за период тестовой недели, 168 часов) показал следующие результаты:

1. *Систематическая ошибка (Bias)* – среднее значение остатков составляет 8,14 МВт·ч. Учитывая, что среднее потребление по выборке составляет более 4600 МВт·ч, относительное смещение прогноза составляет менее 0,2 %. Это свидетельствует об отсутствии значимой систематической недооценки или переоценки объема потребления моделью.

2. *Дисперсия ошибки* – стандартное отклонение остатков (σ) составляет 50,16 МВт·ч. Это значение характеризует средний разброс ошибки и используется для построения доверительных интервалов.

3. Форма распределения:

- *Асимметрия (Skewness)* – -0,0283. Значение практически равно нулю, что указывает на симметрию распределения ошибок (количество положительных и отрицательных ошибок сбалансировано).

- *Экцесс (Kurtosis)* – 0,0751. Значение, близкое к нулю, подтверждает, что «хвосты» распределения соответствуют нормальному закону (нет аномально частого появления экстремальных ошибок).

Гистограмма распределения остатков, представленная на рис. 10, визуально подтверждает форму колокола (кривой Гаусса), центрированного вблизи нуля.

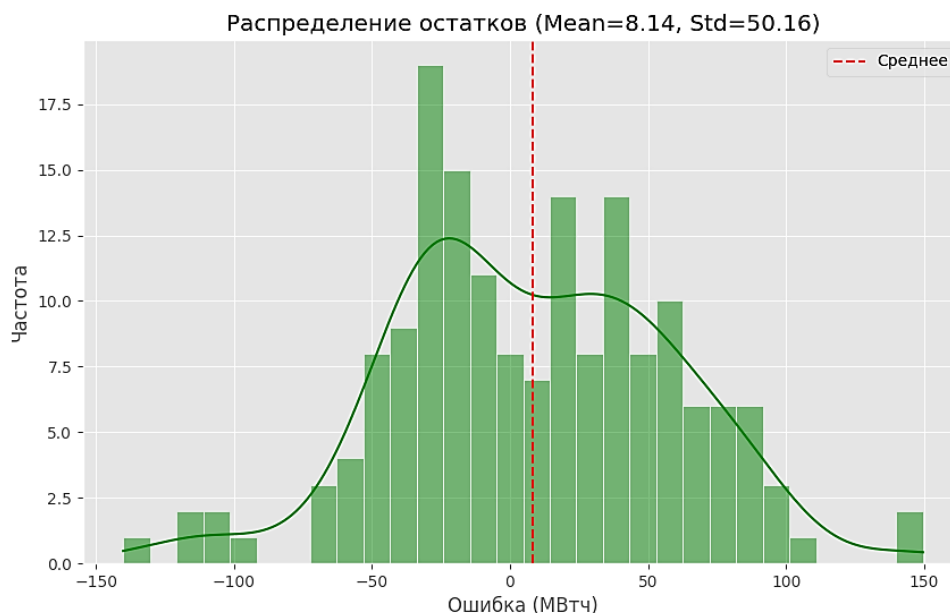


Рис. 10. Гистограмма распределения остатков

Fig. 10. Histogram of residual distribution

Для верификации статистической надежности модели была проведена серия тестов.

Проверка на нормальность распределения остатков (Normality Test). Был использован критерий Шапиро-Уилка, который показал следующие результаты: $W=0,9871$,

$p\text{-value} = 0,1249$. Так как $p\text{-value} > 0,05$ (уровень значимости), нулевая гипотеза о нормальном распределении остатков не отвергается. График (Q-Q Plot), представленный на рис. 11, демонстрирует, что точки остатков лежат практически на теоретической прямой, что также подтверждает нормальность.

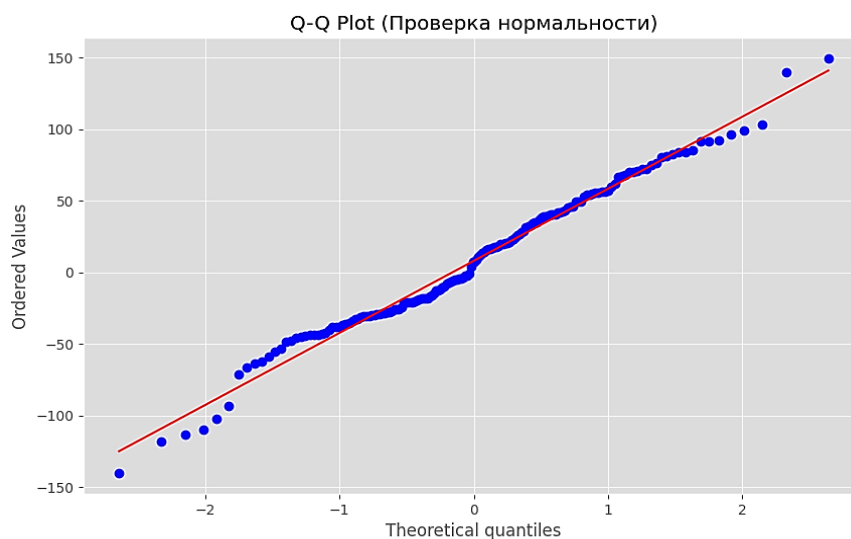


Рис. 11. Графический результат проверки остатков на нормальное распределение

Fig. 11. Graphical results of the residual normality test

Проверка на автокорреляцию остатков (Autocorrelation). Для проверки гипотезы о независимости ошибок были использованы Q-тест Льюнг-Бокса и анализ автокорреляционной функции (ACF), графически представленный на рис. 12. В результате было получено значение $p\text{-value} < 0.05$ на лагах остатков 24 и 48 часов. Следовательно, в остатках сохраняется периодическая зависимость из-за сложной внутрисуточной структуры электропотребления, которую модель не выявила. Однако, учитывая величину ошибки (MAPE 0,68 %) и подтвержденную нормальность распределения, полученная автокорреляция в остатках не является критической для практического применения модели при прогнозировании электропотребления в энергетических организациях и на промышленных предприятиях.

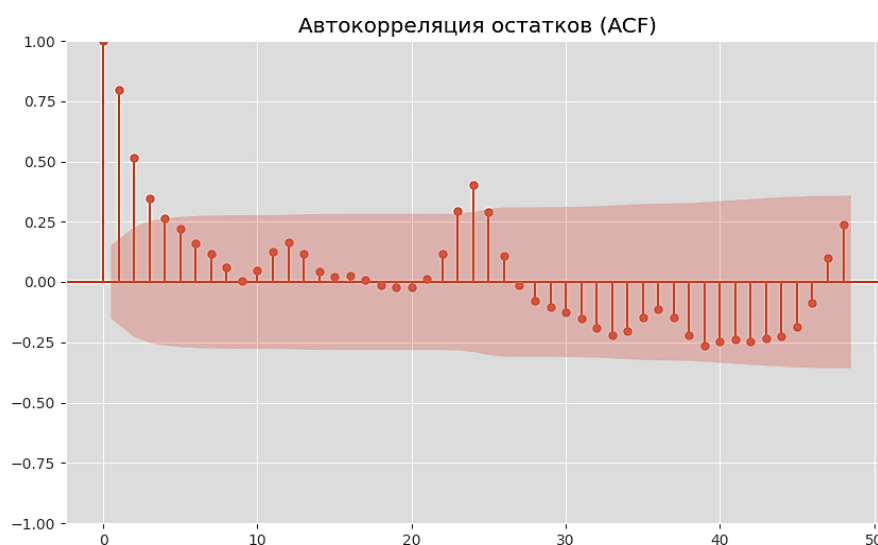


Рис. 12. Графические результаты значений автокорреляции в остатках

Fig. 12. Autocorrelation function (ACF) plot for residuals

Оценка гомоскедастичности остатков. Анализ динамики остатков во времени, графически представленный на рис. 13, показывает, что дисперсия ошибки остается относительно постоянной на протяжении всего периода прогноза. Отсутствуют явные эффекты расширения коридора ошибок, что говорит о стабильности модели вне зависимости от уровня нагрузки.

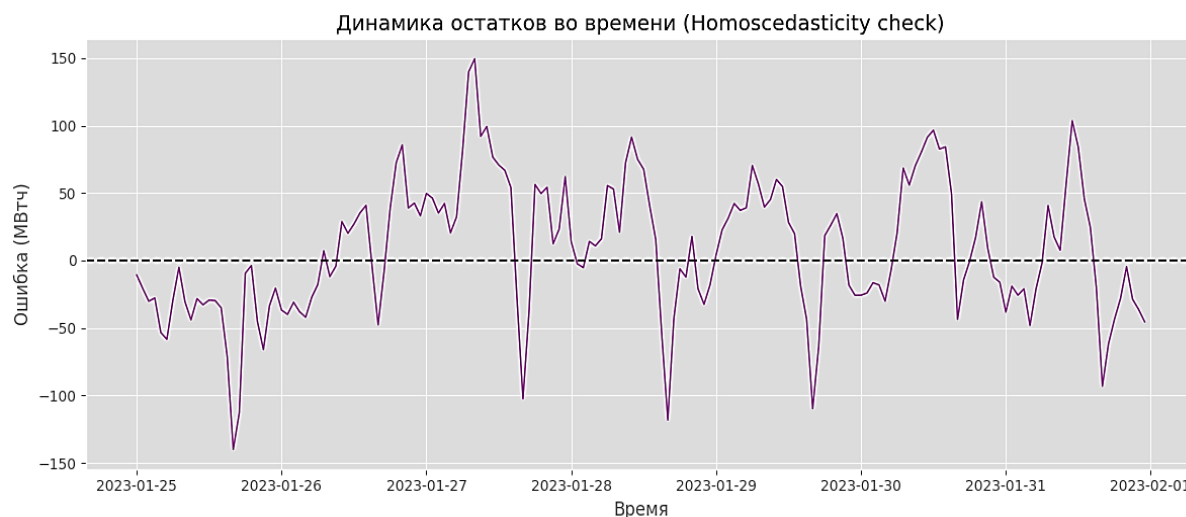


Рис. 13. Графические результаты оценки гомоскедастичности остатков

Fig. 13. Graphical assessment of residual homoscedasticity

В результате проведенной оценки адекватности был сделан вывод, что модель CatBoost признана статистически адекватной. Нормальность остатков позволяет корректно строить вероятностные доверительные интервалы для оценок прогнозирования электропотребления на предприятии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен системный статистический анализ современных методов машинного обучения и искусственного интеллекта для создания и настройки моделей прогнозирования электропотребления на каждый час суток. Обоснованы настройки гиперпараметров для каждой модели для имеющихся реальных данных энергетической компании. Представлены научные доказательства выбора лучшей регрессионной модели из набора моделей-кандидатов в решении задач прогнозирования электропотребления на имеющихся реальных данных предприятия.

Данная задача является значимой при решении проблем составления прогнозных заявок электропотребления предприятий для оптового рынка электроэнергии и мощности, а также для выбора режима нагрузки в энергосистеме страны. Решение задачи обеспечивает значительную экономию денежных средств на предприятии за счет уменьшения ошибки прогнозирования в среднем до 1 %.

Обоснованный метод моделирования и модель CatBoost при анализе данных представляют собой эффективный инструмент искусственного интеллекта при решении задачи прогнозирования электропотребления на каждый час суток.

В результате проведенного системного анализа данных и рассмотренных методов машинного обучения получен практически значимый результат: решение многокритериальной задачи прогнозирования может быть сведено к использованию модели CatBoost, способной как описывать имеющиеся данные, так и определять изменения целевого процесса. Все полученные в данном исследовании теоретические выводы подтверждаются результатами проведенных расчетов.

В дальнейшем планируется добавление в набор моделей-кандидатов других методов машинного обучения и искусственного интеллекта. Продолжение исследования заключается в развитии и усовершенствовании метода обработки данных, в адаптации выбранных регрессионных моделей к изменениям в данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Карпенко С. М., Карпенко Н. В., Ематин Е. А., Марат Ш. Планирование электропотребления промышленного предприятия в условиях оптового рынка электроэнергии // Энергобезопасность и энергосбережение. 2024. № 6. С. 35–40. EDN: CKFPVC
Karpenko S.M., Karpenko N.V., Ematin E.A., Marat Sh. Power consumption planning for an industrial enterprise under the conditions of the wholesale electricity market. *Energy Safety and Energy Economy*. 2024. No. 6. Pp. 35–40. EDN: CKFPVC. (In Russian)
2. Карпенко С. М., Карпенко Н. В., Ематин Е. А., Джунджу Д. Многофакторный статистический анализ показателей оптового рынка электроэнергии (на примере ценовой зоны) // Энергобезопасность и энергосбережение. 2024. № 4. С. 37–42. EDN: QBTQHW
Karpenko S.M., Karpenko N.V., Ematin E.A., Jjunju D. Multiple factor analysis of the wholesale electricity market on the example of a specific pricing zone. *Energy Safety and Energy Economy*. 2024. No. 4. Pp. 37–42. EDN: QBTQHW. (In Russian)
3. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Экономическая эффективность современной электроэнергетики // Энергетик. 2022. № 1. С. 17–21. EDN: OGTFOW
Byk F.L., Myshkina L.S. Economic efficiency of modern electric power industry. *Energetik*. 2022. No. 1. Pp. 17–21. EDN: OGTFOW. (In Russian)
4. Hong T., Fan S. Probabilistic electric load forecasting: *A Tutorial Review*. *International Journal of Forecasting*. 2016. Vol. 32. No. 3. Pp. 914–938. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2015.11.011
5. Dudek G. Pattern-based local linear regression models for short-term load forecasting. *Electric Power System Research*. 2016. No. 130. Pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.09.001
6. Gochhait S., Sharma D.K. Regression model-based short-term load forecasting for load despatch centre. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*. 2023. Vol. 4(2). Pp. 693–710. DOI: 10.37385/jaets.v4i2.1682
7. Lee M.H.L., Ser Y.C., Selvachandran G., Pham T.H. A comparative study of forecasting electricity consumption using machine learning models. *Mathematics*. 2022. Vol. 10. Article 1329. DOI: 10.3390/math10081329
8. Dayarathna M., Wen Yo., Fan Rui. Data center energy consumption modeling: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18. No. 1. DOI: 10.1109/COMST.2015.2481183
9. Mughees M., Li Y., Chen Y., Li Y.R. Short-term load forecasting for ai-data center. *IEEE PES General Meeting 2025. Electrical Engineering and Systems Science*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2503.07756
10. Ye Z., Gao W., Hu Q. et al. Deep learning workload scheduling in GPU datacenters: A survey. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56. No. 6. Pp. 1–38. DOI: 10.1145/3638757
11. Munkhammar J., Meer D., Widén J. Very short term load forecasting of residential electricity consumption using the Markov-chain mixture distribution (MCM) model. *Applied Energy*. 2021. 282(A):116180. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116180
12. Hippert H.S., Pedreira C.E., Souza R.C. Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 16. No. 1. Pp. 44–55. 2001. DOI: 10.1109/59.910780
13. Sailor D.J., Munoz J.R. Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the U.S.A. Methodology and results for eight states. *Energy*. 1997. Vol. 22. No. 10. Pp. 987–998. DOI: 10.1016/S0360-5442(97)00034-0

14. Hong T., Pinson P., Fan S. et al. Probabilistic energy forecasting: global energy forecasting competition 2014 and beyond. *International Journal of Forecasting*. 2016. Vol. 32. No. 3. Pp. 896–913. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2016.02.001
15. Wang A., Yu Q., Wang J. et al. Electric load forecasting based on deep ensemble learning. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 17. P. 9706. DOI: 10.3390/app13179706
16. Lim B., Arik Ö.S., Loeff N., Pfister T. Temporal fusion transformer for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*. 2021. Vol. 37. No. 1. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.03.012
17. Challu C., Olivares K.G., Oreshkin B.N. et al. N-HiTS: Neural hierarchical interpolation for time series forecasting. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 37. No. 6. Pp. 6989–6997. DOI: 10.48550/arXiv.2201.12886
18. Ahmad H., Mortazavi S.K., Bahnasawi M.E. et al. Enhanced time series forecasting: integrating PatchTST with BERT Layers. *Conference: 5th International Conference on Applied Mathematics & Computer Science (ICAMCS 2025)*. At: Venice, Italy, September 27–29, 2025. DOI: 10.1109/ICAMCS62774.2024.00014
19. Dorogush A.V., Ershov V., Gulin A. Catboost: gradient boosting with categorical features support. DOI: 10.48550/arXiv.1810.11363.2018
20. Lim B., Arik S.Ö., Loeff N., Pfister T. Temporal fusion transformer for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*. Vol. 37. No. 4. 2021. Pp. 1748–1764. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.03.012.
21. Nie Y., Nguyen N.H., Sinthong P., Kalagnanam J. A time series is worth 64 words: long-term forecasting with transformers (PatchTST). *Proceedings of the International Conference on Learning Representations. International Conference on Learning Representations ICLR 2023*. <https://arxiv.org/pdf/2211.14730.pdf>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Дзгоев А. Э. – научное руководство исследованием, постановка задачи, поиск и подготовка реальных данных, прогнозирование потребления электроэнергии, интерпретация результатов, оценка качества и адекватности моделей, разработка регрессионных моделей, описание результатов, тестирование моделей на реальных данных энергетической компании;

Климкин Е. В. – разработка регрессионных моделей, настройка гиперпараметров модели, обучение моделей, проведение расчетов, написание кода программы на Python, составление графиков по результатам расчетов, проверка остатков модели;

Черняускас В. В. – анализ данных, подготовка датасета, оценка автокорреляции;

Брайловский А. В. – расчет значений критериев качества моделей, проверка моделей на качество, оценка гетероскедастичности;

Резеньков Р. Н. – проверка математических моделей на адекватность, расчет ошибки прогнозирования MAPE (%).

Contribution of the authors:

Dzгоеv A.E. – scientific supervision of the research, problem formulation, data search and preparation, electricity consumption forecasting, results interpretation, model quality and adequacy assessment, regression model development, results description, and model testing on real energy company data;

Klimkin E.V. – regression model development, model hyperparameter tuning, model training, calculations, Python coding, plotting calculation results, and model residual testing;

Chernyauskas V.V. – data analysis, dataset preparation, autocorrelation assessment;

Brailovsky A.V. – model quality criterion calculation, model quality testing, heteroscedasticity assessment;

Rezenkov R.N. – mathematical model adequacy testing, MAPE (%) forecast error calculation.

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» Института 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

Климкин Егор Владимирович, студент, кафедра прикладной математики, Институт информационных технологий, МИРЭА – Российский технологический университет; 119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;

KlimkinEVK@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3876-3041>

Черняускас Владислав Витаутович, ст. преподаватель кафедры «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий, МИРЭА – Российский технологический университет; 119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;

chernyauskas-vladislav@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8438-3418>, SPIN-код: 5867-6366

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

Резеньков Роман Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Цифровая трансформация», Институт информационных технологий, МИРЭА – Российский технологический университет; 119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78;

rezenkov@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5542-2125>

Information about the authors

Alan E. Dzgoev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Digital Transformation, Institute of Information Technologies, 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

Egor V. Klimkin, Undergraduate Student, Department of Applied Mathematics, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University; 78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia.;

KlimkinEVK@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3876-3041>

Vladislav V. Chernyauskas, Senior Lecturer, Department of Digital Transformation, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University; 78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;

chernyauskas-vladislav@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8438-3418>, SPIN-code: 5867-6366

Andrey V. Brailovsky, Assistant Professor, Department of Digital Transformation, Institute of Information Technologies, 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

Roman N. Rezenkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Digital Transformation Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University; 78, Vernadsky prospekt, Moscow, 119454, Russia;

rezenkov@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5542-2125>

Веб-приложение для диагностики опухолей головного мозга на основе сверточных нейронных сетей

М. Р. Киясов¹, И. А. Пшенокова^{✉1,2}

¹Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки веб-приложения для диагностики опухолей головного мозга по данным МРТ, которое обеспечивает предобработку и стандартизацию входных изображений, высокоточное распознавание наличия и типа опухоли, предоставление результатов в удобной для врача форме, а также возможность масштабирования и дальнейшего совершенствования моделей по мере накопления новых данных.

Цель исследования – создание полнофункциональной веб-системы для медицинской диагностики с удобным интерфейсом.

Методы исследования. В качестве основных методов исследования применяются методы машинного обучения на основе сверточных нейронных сетей и технологии разработки программного обеспечения.

Результаты. В работе разработано веб-приложение для диагностики опухолей головного мозга на основе сверточных нейронных сетей. Для распознавания и классификации изображений МРТ использована модель MobileNet, а для семантической сегментации применена архитектура U-Net. Реализован frontend на React с TypeScript и backend на Python.

Выводы. Из проведенных тестов следует, что разработанное приложение демонстрирует высокую точность распознавания и сегментации опухолей, обеспечивая эффективность в задачах медицинской диагностики.

Ключевые слова: веб-приложение, диагностика опухолей мозга, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, анализ изображений, искусственный интеллект, медицинские данные

Поступила 28.01.2026, одобрена после рецензирования 31.03.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Киясов М. Р., Пшенокова И. А. Веб-приложение для диагностики опухолей головного мозга на основе сверточных нейронных сетей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 71–83. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-71-83

Web application for brain tumor diagnosis based on convolutional neural networks

M.R. Kiyasov¹, I.A. Pshenokova^{✉1,2}

¹Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov
173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia

²Institute 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

Abstract. The clinical relevance of this research lies in the necessity of introducing web-based applications to enhance the efficiency of brain tumor diagnosis via MRI data. This application provides preprocessing and standardization of input images, high-precision recognition of the presence and type of tumor, presentation of results in a physician-friendly format, and the ability to scale and further refine the model as new data accumulates. The proposed application ensures automated preprocessing and standardization of input images, high-accuracy tumor detection and classification, and clear visualization of results for clinical decision support; furthermore, the system architecture supports scalability and continuous model refinement as new data is accumulated.

Aim. The study aims to design a functional web-based system for medical diagnosis featuring an accessible user interface.

Research methods. The core approach involves machine learning based on convolutional neural networks and robust software development technologies.

Results. A fully functional web application integrated with convolutional neural networks was successfully developed and deployed for automated brain tumor diagnosis. The system utilizes a MobileNet model for MRI image classification and recognition, while a U-Net architecture is deployed for precise semantic segmentation of tumor regions. The frontend framework was implemented using React and TypeScript, while the backend infrastructure was constructed in Python.

Conclusions. The tests conducted show that the developed application demonstrates high accuracy in tumor recognition and segmentation, ensuring its effectiveness in medical diagnostics. The validation tests confirm that the developed application yields high accuracy in tumor detection and segmentation, ensuring robust performance in real-world medical imaging tasks.

Keywords: web application, brain tumor diagnostics, deep learning, convolutional neural networks, image analysis, artificial intelligence, medical data

Submitted 28.01.2026,

approved after reviewing 31.03.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Kiyasov M.R., Pshenokova I.A. Web application for brain tumor diagnosis based on convolutional neural networks *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 71–83. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-71-83

ВВЕДЕНИЕ

Онкологические заболевания головного мозга относятся к числу наиболее тяжелых и социально значимых патологий, характеризующихся высокой летальностью, риском инвалидизации и существенными экономическими потерями для системы здравоохранения. По данным клинических исследований, своевременное выявление и точная оценка характеристик опухоли (локализация, размер, тип, степень злокачественности) являются критически важными факторами, определяющими выбор тактики лечения и прогноз для пациента [1].



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

При этом диагностика опухолей головного мозга представляет собой сложную междисциплинарную задачу, требующую объединения возможностей современной нейровизуализации и высокоточной аналитической обработки медицинских изображений.

Стандартом визуализации структур головного мозга в настоящее время является магнитно-резонансная томография (МРТ), обеспечивающая высокое пространственное разрешение и хорошую дифференцировку мягких тканей [2]. МРТ широко используется как для первичного выявления патологического очага, так и для последующего мониторинга динамики заболевания и эффективности терапии. Однако интерпретация МРТ-изображений остается во многом субъективной процедурой, зависящей от опыта врача-радиолога, уровня его нагрузки, доступности специализированных центров и качества диагностического оборудования. В условиях роста числа исследований, дефицита кадров и географической распределенности пациентов это приводит к появлению диагностических ошибок, задержкам постановки диагноза и, как следствие, к ухудшению клинических исходов.

На этом фоне особую актуальность приобретают методы компьютерной поддержки принятия врачебных решений, основанные на машинном обучении и глубоких нейронных сетях. За последние годы внесен существенный вклад в развитие алгоритмов анализа медицинских изображений для задач выявления и классификации патологий различных органов и систем от онкологических заболеваний молочной железы и легких до кардиологических и неврологических нарушений [3]. Показано, что модели глубокого обучения, в том числе сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), способны достигать и даже превосходить уровень экспертов по точности распознавания патологических изменений при условии достаточного объема и качества обучающих данных [4].

Сверточные нейронные сети являются одной из ключевых архитектур глубокого обучения для задач компьютерного зрения и анализа изображений. В отличие от традиционных методов, основанных на ручном конструировании признаков (SIFT, SURF, HOG, LBP и др.), CNN автоматически извлекают многомасштабные иерархические представления, начиная от простых контуров и текстур до высокоуровневых структур, что делает их особенно эффективными при работе со сложными паттернами МРТ-изображений. Это преимущество обусловило широкое распространение CNN в задачах классификации и сегментации опухолей головного мозга, где требуется учитывать тонкие различия в интенсивности сигнала, форме и структуре патологического очага [5].

Ряд исследований демонстрирует, что использование предобученных моделей, таких как VGGNet, Inception, Xception, ResNet и их модификаций, в сочетании с методами трансферного обучения и расширения данных (data augmentation) позволяет достигать высокой точности распознавания опухолей на МРТ-срезах даже при ограниченных размерах датасетов [6].

Несмотря на значительные успехи в точности алгоритмов на исследовательских выборках, одной из ключевых проблем остается их интеграция в клиническую практику. Для того чтобы модели глубокого обучения стали реальным инструментом поддержки принятия решений, необходимо обеспечить удобный и безопасный для медицинского персонала доступ к таким системам, минимизировать требования к вычислительным ресурсам на стороне лечебных учреждений и обеспечить совместимость с существующей инфраструктурой медицинских информационных систем [7]. Важную роль здесь играют веб-технологии, позволяющие реализовать доступ к интеллектуальным диагностическим сервисам через браузер без необходимости установки специализированного программного обеспечения на рабочих местах врачей.

Веб-ориентированный подход к реализации систем поддержки диагностики обладает рядом существенных преимуществ. Во-первых, обеспечивается доступность сервиса из различных лечебных учреждений, в том числе территориально удаленных, при наличии базового интернет-соединения. Во-вторых, централизованное размещение вычислительных ресурсов упрощает обновление моделей, управление версиями и накопление анонимизированных данных для последующего дообучения и улучшения качества алгоритмов. В-третьих, веб-интерфейс позволяет интегрировать дополнительные сервисы, что особенно актуально в контексте развития дистанционной диагностики и консультирования пациентов.

Однако проектирование и внедрение веб-приложений для диагностики опухолей головного мозга сопряжено с рядом вызовов. С технической точки зрения необходимо обеспечить стабильную работу моделей CNN в условиях реальных клинических данных, отличающихся по параметрам съемки, уровням шума, артефактам и вариативности протоколов МРТ [8]. С организационной и регуляторной позиции важны вопросы защиты персональных данных, обеспечения информационной безопасности, валидации и сертификации программных изделий медицинского назначения, а также формирование доверия к результатам автоматического анализа у врачей-практиков [9]. Дополнительно возрастает значимость методов объяснимого искусственного интеллекта (Explainable AI), позволяющих визуализировать вклад отдельных областей изображения в итоговое решение модели, что способствует повышению прозрачности и интерпретируемости прогнозов.

В этой связи *актуальной* задачей является разработка веб-приложений, интегрирующих современные модели глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей для диагностики опухолей головного мозга по данным МРТ. Такое приложение должно обеспечивать: предобработку и стандартизацию входных изображений, высокоточное распознавание наличия и типа опухоли, предоставление результатов в удобной для врача форме, а также возможность масштабирования и дальнейшего совершенствования моделей по мере накопления новых данных [10].

Целью данной работы является создание полнофункциональной веб-системы для медицинской диагностики с удобным интерфейсом.

Задача исследования – разработка веб-приложения для диагностики опухолей головного мозга на основе сверточных нейронных сетей. Frontend реализован на React с TypeScript, backend на Python. Обучение и тестирование моделей проводились на датасетах Kaggle с МРТ-снимками четырех классов: glioma, meningioma, pituitary и notumor¹. Разработанное приложение характеризуется оптимизированным размером 223 КБ (70 КБ при Gzip-сжатии), что обеспечивает быструю загрузку даже при низкой скорости интернета.

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

Предпосылки создания веб-приложения базируются на результатах исследования эффективности различных архитектур сверточных нейронных сетей в медицинской диагностике, проведенного в работе [11]. Для сравнения эффективности наиболее актуальных и

¹Набор данных МРТ для распознавания и классификации опухолей головного мозга [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/masoudnickparvar/brain-tumor-mri-dataset>

Набор данных МРТ для сегментации опухолей головного мозга [Электронный ресурс].

URL: <https://www.kaggle.com/datasets/atikaakter11/brain-tumor-segmentation-dataset>

доступных моделей на основе сверточных нейронных сетей выбраны модели VGG19, Xception и ResNet152. По результатам сравнения наилучшей оказалась модель Xception, к которой была применена стратегия для ее улучшения с использованием методов переноса обучения и аугментации данных. После проведенных тестов получено, что улучшенная модель демонстрирует более высокую точность и устойчивость к различным видам искажений данных, что делает ее более эффективной для задач распознавания и классификации изображений. Разработанное веб-приложение интегрирует улучшенную модель глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей в удобный пользовательский интерфейс, что позволит обеспечить врачей современным инструментом поддержки принятия клинических решений.

Разработанное веб-приложение MedicalAutomate реализовано с использованием современного интерфейса, который обеспечивает удобный доступ ко всем функциям системы диагностики опухолей головного мозга. На рис. 1 изображена главная страница приложения с навигационной панелью и основными разделами.

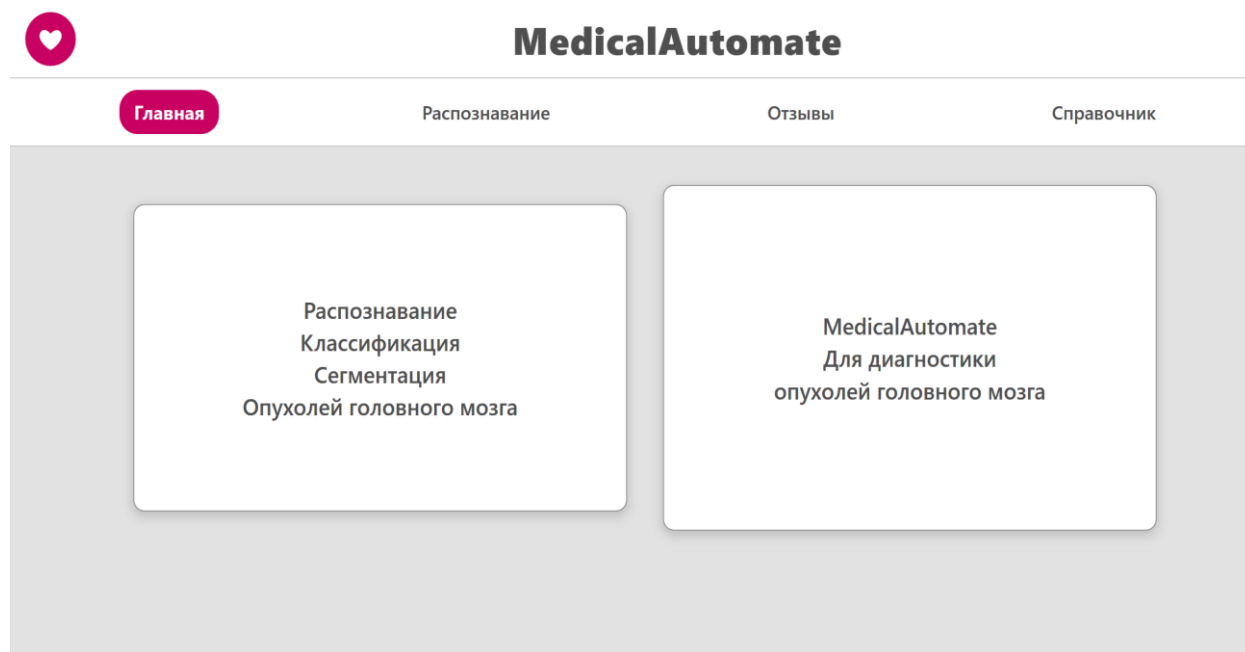


Рис. 1. Главная страница веб-приложения MedicalAutomate

Fig. 1. Home page of the developed MedicalAutomate web application

Цветовая схема и макет спроектированы для снижения когнитивной нагрузки на врача. Навигационная структура позволяет быстро переходить между основными функциями: загрузкой и анализом МРТ-снимков, сбором отзывов пользователей и доступом к справочной информации о заболеваниях.

Центральным компонентом приложения является модуль распознавания, который позволяет медицинскому персоналу загружать МРТ-снимки и получать автоматизированный анализ в режиме реального времени. На рис. 2 изображена страница «Распознавание» с панелью загрузки изображений и элементами управления.



Рис. 2. Страница «Распознавание» веб-приложения MedicalAutomate

Fig. 2. Diagnosis and recognition interface of the developed MedicalAutomate web application

После загрузки изображения система автоматически отправляет его на backend-сервер для обработки моделями глубокого обучения. Передача загруженного изображения на backend-сервер осуществляется через асинхронный запрос к API-сервису с использованием фреймворка FastAPI. Функция обработки запросов предсказания выполняет полный цикл анализа: чтение файла, предобработка изображения, классификация с использованием модели MobileNet, семантическая сегментация с U-Net и кодирование результатов для отправки в frontend. На рис. 3 приведен фрагмент программного кода функции обработки данных FastAPI.

```
@app.post ("/predict", response_model=PredictionResponse)
async def predict (file: UploadFile = File(...)):
    contents = await file. read ()
    pil_img = Image.open(io. BytesIO(contents)). convert("RGB")
    img_array = np. array(pil_img)
    predictions  = model. Predict(load_and_preprocess_image(img_array),
    verbose=0)
    cls_idx = np. argmax (predictions [0])
    predicted_class = class_labels[cls_idx]
    prob = round(predictions[0][cls_idx], 2)
    overlay_img = process_image_with_unet(img_array, model_segmentation,
    mask_data)
    buf = io.BytesIO()
    overlay_img.save(buf, "PNG")
    overlay_b64 = base64.b64encode(buf.getvalue()).decode()
    return PredictionResponse(predicted_class=predicted_class,
    probability=prob, overlay_png_base64=overlay_b64)
```

Рис. 3. Фрагмент листинга функции обработки данных

Fig. 3. Fragment of the data processing function listing

Таким образом, на сервере одновременно выполняются две задачи. Первая – классификация снимка с использованием предобученной модели MobileNet, которая определяет тип опухоли, а вторая – семантическая сегментация архитектурой U-Net для выделения патологической области.

После обработки загруженного МРТ-снимка приложение генерирует отчет с результатами диагностики, содержащий необходимую информацию для принятия клинического решения. На рис. 4 изображены результаты анализа с исходным изображением, маской сегментации и справочной информацией о выявленной патологии.

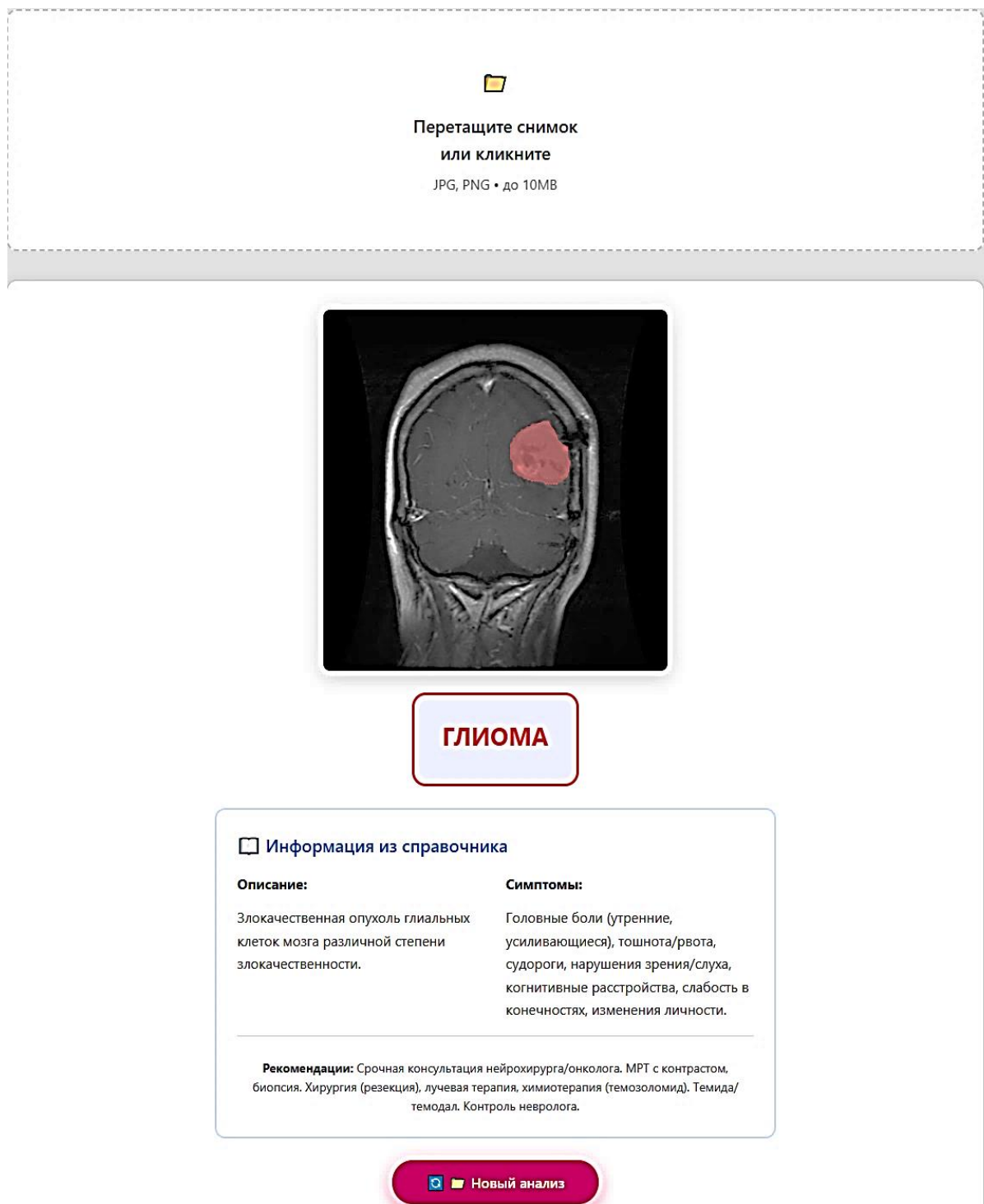


Рис. 4. Результат диагностики / Fig. 4. Diagnostic results

Визуализация сегментированной области на исходном изображении позволяет врачу наглядно увидеть точное расположение и границы предполагаемого образования. Помимо главного результата, система отображает исходный снимок и его обработанную версию с наложением маски, что способствует повышению уровня доверия к результатам анализа. Дополнительный блок справочной информации о выявленном заболевании содержит клинические характеристики, симптомы и рекомендации, помогающие врачу интерпретировать результаты в контексте клинической картины пациента.

Для повышения качества приложения и получения обратной связи от медицинского персонала реализован модуль сбора отзывов, который позволяет врачам оценивать эффективность системы и делиться опытом использования. На рис. 5 изображена страница «Отзывы» с формой для добавления отзывов.

Рис. 5. Страница «Отзывы» веб-приложения MedicalAutomate

Fig. 5. Expert feedback and clinical evaluation interface of the MedicalAutomate web application

Система отзывов служит инструментом для итеративного совершенствования приложения на основе реального опыта пользователей и включает механизм валидации и обработки пользовательского ввода. Рейтинговая система с выставлением звездной оценки позволяет быстро оценить общее мнение пользователей о функциональности и надежности приложения. Накопленные отзывы помогают разработчикам определить приоритеты для улучшения интерфейса, расширения функциональности и повышения клинической валидности моделей.

Важной компонентой приложения является справочный раздел, который предоставляет врачам структурированную информацию о различных заболеваниях и патологиях, организованную по группам. На рис. 6 изображена страница «Справочник» с различными группами заболеваний.



Рис. 6. Страница «Справочник» веб-приложения MedicalAutomate

Fig. 6. Medical reference and knowledge base module of the developed diagnostic platform

Интерфейс справочника построен на принципе модульности и персонализации: пользователь может просматривать группы заболеваний, а также создавать и организовывать собственные категории заболеваний и добавлять в них название, описание и клиническую информацию о патологиях. Такой подход может быть особенно ценен в многопрофильных медицинских учреждениях, где разные специалисты могут организовывать справочный материал в соответствии со своей компетенцией и клиническими интересами.

В справочном модуле приложения предусмотрены готовые группы заболеваний, включая специализированную категорию, посвященную опухолям центральной нервной системы. На рис. 7 изображена развернутая группа «Головной мозг – опухоли» с перечислением основных типов внутричерепных новообразований.

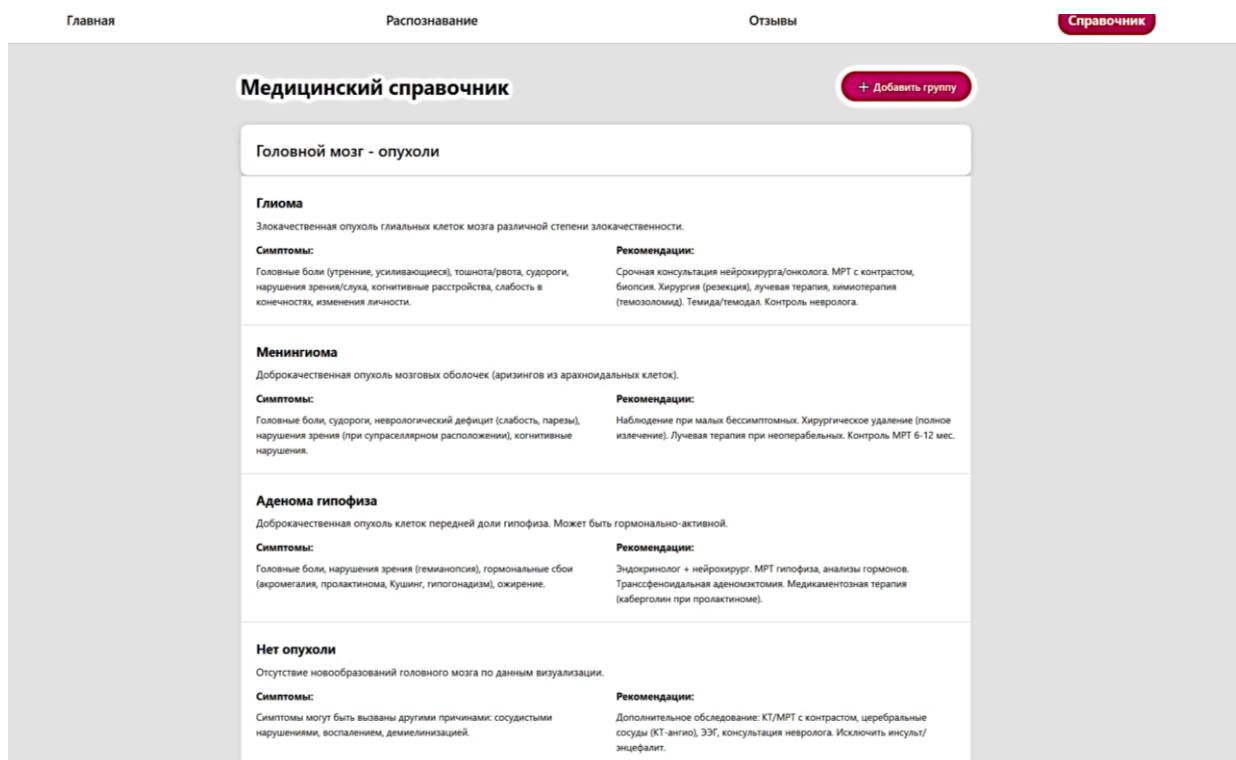


Рис. 7. Группа «Головной мозг – опухоли» на странице «Справочник»

Fig. 7. Brain Tumors section within the medical reference module

Структурированное представление информации об опухолях мозга объединяет описания основных типов опухолей, с которыми работает специалист. Для каждого типа опухоли представлены характерные клинические проявления и рекомендуемые подходы к лечению и диагностике. Интеграция справочной информации с результатами автоматического анализа снимков позволяет врачу не только получить диагностический прогноз модели, но и быстро найти информацию о симптомах и тактике ведения пациента для верификации диагноза и планирования дальнейшего лечения.

Для управления навигацией между различными разделами приложения используется система табуляции, которая позволяет пользователю переключаться между основными компонентами.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТАННОГО ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ АНАЛОГАМИ

Для сравнения разработанного веб-приложения с существующими аналогами рассмотрим несколько примеров приложений для распознавания и диагностики опухолей головного мозга с использованием искусственного интеллекта.

В Первом МГМУ имени И. М. Сеченова разработали веб-приложение на основе ИИ, которое анализирует МРТ-снимки и выявляет на них опухоли головного мозга. Оно не только обнаруживает новообразование, но и определяет его точную локализацию, а также классифицирует тип опухоли (например, глиому, менингиому, аденому гипофиза)². Для обучения модели использовалась одна из современных архитектур нейросетей – YOLO v11. Нейросеть обучили на более чем 5 тыс. стандартизированных изображений из открытых датасетов. Код приложения открыт и доступен на GitHub, что позволяет другим исследователям и разработчикам участвовать в его доработке. Однако у веб-приложения меньшая функциональность в части анализа динамики заболевания по сравнению с аналогами.

Веб-приложение NeuroQuant Brain для анализа глиом (высоко- и низкоккачественных) до и после лечения. Использует метод Restriction Spectrum Imaging (RSI) для дифференциации истинного прогрессирования опухоли от псевдопрогрессии, вызванной лечением [12]. К недостаткам метода можно отнести закрытый код и зависимость от зарубежных сервисов, что приводит к потенциально более высокой стоимости для пользователей.

Mdbrain Tumor Differentiation – ИИ-решение для количественной нейровизуализации, разработанное компанией Mediaire. Приложение поддерживает анализ различных последовательностей МРТ (T1, T2, FLAIR и др.) и предоставляет отчеты с количественными данными и визуальным выделением патологических структур с помощью цветовых маркеров³. К недостаткам этого приложения также относятся закрытый код и возможная сложность адаптации под российские стандарты и данные.

К уникальным преимуществам разработанного веб-приложения MedicalAutomate по сравнению с представленными выше веб-приложениями можно отнести комбинированный

²В Сеченовском университете обучили нейросеть детектировать опухоли головного мозга на МРТ-снимках [Электронный ресурс]. <https://www.sechenov.ru/pressroom/news/v-sechenovskom-universitete-obuchili-neyroset-detektirovat-opukholi-golovnogo-mozga-na-mrt-snimkakh/> (дата обращения: 25.03.2026)

³Additional assurance with the Tumor differentiation [Electronic resource]. – <https://mediaire.ai/en/tumor-differentiation/> (accessed: 25.03.2026)

подход к анализу изображений, оптимизированную предобработку данных, систему валидации загружаемых изображений, интегрированный справочник заболеваний и модуль сбора обратной связи от пользователей.

Приложение представляет собой перспективное решение в области диагностики опухолей головного мозга, сочетающее современные технологии ИИ с практическим удобством использования, и демонстрирует высокий потенциал для практического применения в медицинской диагностике при условии дальнейшего совершенствования и валидации в направлении расширения функциональности для работы с различными типами данных и базы обучающих данных, интеграции с медицинскими информационными системами, добавления дополнительных методов визуализации и внедрения расширенной системы метрик качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано веб-приложение для диагностики опухолей головного мозга на базе глубокого обучения. Применение модели MobileNet для классификации МРТ-изображений в сочетании с архитектурой U-Net для семантической сегментации позволило создать полнофункциональную систему медицинской диагностики с удобным пользовательским интерфейсом. Результаты тестирования подтверждают высокую точность распознавания и сегментации опухолей, обеспечивая эффективность применения системы в медицинских диагностических задачах. Реализованная архитектура (React/TypeScript для фронтенда, Python/FastAPI для бэкенда) обеспечивает масштабируемость и готовность к интеграции в клинические рабочие процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Aguiar-Ibanez R., Mbous Y.P.V., Sharma S. Chawla E. Assessing the clinical, humanistic, and economic impact of early cancer diagnosis: a systematic literature review. *Frontiers in Oncology*. 2025. Vol. 3. DOI: 10.3389/fonc.2025.1546447
2. Wang C., Shi Z., Li Y. et al. Protocol for brain magnetic resonance imaging and extraction of imaging-derived phenotypes from the china phenobank project. *Phenomics*. 2023. Vol. 3. No. 6. Pp. 642–656. DOI: 10.1007/s43657-022-00083-w
3. Jiang X., Hu Z., Wang S., Zhang Y. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis. *Cancers*. 2023. Vol. 15. No. 14. DOI: 10.3390/cancers15143608
4. Солопов М. В., Кавелина А. С., Попандопуло А. Г. и др. Перспективы применения сверточных нейронных сетей в цитологической диагностике узловых образований щитовидной железы // Проблемы эндокринологии. 2025. Т. 71. № 3. С. 4–13. DOI: 10.14341/probl13475
5. Solopov M.V., Kavelina A.S., Popandopulo A.G. et al. Prospects for the application of convolutional neural networks in cytological diagnostics of thyroid nodules. *Problems of Endocrinology*. 2025. No. 71. Pp. 4–13. DOI: 10.14341/probl13475. (In Russian)
6. Loghmani N., Moqadam R., Allahverdy A. Brain tumor segmentation using multimodal MRI and convolutional neural network. *30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran. Iran. 2022. Pp. 227–230. DOI: 10.1109/ICEE55646.2022.9827274
7. Rastogi D., Johri P., Donelli M. et al. Brain tumor detection and prediction in MRI images utilizing a Fine-Tuned transfer learning model integrated within deep learning frameworks. *Life*. 2025. Vol. 15. No. 3. P. 327. DOI: 10.3390/life15030327

7. Balch J.A., Ruppert M.M., Loftus T.J. et al. Machine learning-enabled clinical information systems using fast healthcare interoperability resources data standards: Scoping review. *JMIR Medical Information*. 2023. Vol. 11. DOI: 10.2196/48297
8. Ottoni M., Kasperczuk A., Tavora L.M.N. Machine learning in MRI brain imaging: a review of methods, challenges, and future directions. *Diagnostics*. 2025. Vol. 15. No. 21. DOI: 10.3390/diagnostics15212692
9. Алзубаиди А. К. Анализ требований к конфиденциальности и обмену данными цифрового здравоохранения // Медицинская этика. 2023. Т. 11. № 4. С. 27–31. DOI: 10.24075/medet.2023.030
- Alzubaidi A.K. Analysis of requirements for confidentiality and sharing of digital healthcare data. *Medical Ethics*. 2023. Vol. 11. No. 4. Pp. 27–31. DOI: 10.24075/medet.2023.030. (In Russian)
10. Vu H.A. Integrating preprocessing methods and convolutional neural networks for effective tumor detection in medical imaging. arXiv preprint *arXiv:2402.16221*. 2024.
11. Пшенокова И. А., Киясов М. Р. Модели и методы глубокого обучения в задачах распознавания и классификации медицинских изображений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 103–112. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-103-112
- Pshenokova I.A., Kiyasov M.R. Models and methods of deep learning in medical image recognition and classification tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 103–112. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-103-112. (In Russian)
12. Bash S., Tanenbaum L.N., Segovis C., Chen M. CPT codes for quantitative MRI of the brain: what it means for neuroradiology. *American Journal of Neuroradiology*. 2024. 45(7) E19. DOI: 10.3174/ajnr.A8286

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

Киясов Мурат Русланович, студент 1-го года обучения направления «Информатика и вычислительная техника», Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова; 360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; myrat7450@mail.ru

Пшенокова Инна Ауесовна, канд. физ.-мат. наук, зав. отд. «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

доцент кафедры «Компьютерные технологии и информационная безопасность», Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-код: 3535-2963

Information about the authors

Murat R. Kiyasov, Undergraduate Student majoring in Computer Science and Engineering; Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia;
myrat7450@mail.ru

Inna A. Pshenokova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department Multi-Agent Systems, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

Associate Professor, Department of Computer Technology and Information Security, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia;
pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-code: 3535-2963

Анализ используемых технологий межмодульного взаимодействия в одноплатных многопроцессорных системах

А. В. Смирнов

Калининградский государственный технический университет
236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1

Аннотация. Многопроцессорные системы используются для обеспечения вычислений во многих областях науки, однако их эффективность во многом зависит от того, как эти модули взаимодействуют друг с другом.

Цель исследования – провести обзор современного состояния и анализ используемых технологий межмодульного взаимодействия в одноплатных многопроцессорных системах, выявить тенденции их развития и использования, а также их ограничения.

Результаты. В данной работе был проведен комплексный анализ современного состояния и тенденций развития одноплатных вычислительных систем. Сделаны обзор и сравнение протоколов и моделей коммуникации, используемых для организации взаимодействия между одноплатными вычислительными системами. Также приведено описание дальнейших исследований по этой теме.

Заключение. Анализ показал, что существующее разнообразие архитектур процессоров и технологий организации межмодульного взаимодействия не позволяет выбрать некое одно универсальное решение, и выбор конкретного решения зависит от множества факторов, таких как необходимые задержка, пропускная способность, уровень безопасности сети, и всегда предполагает поиск компромисса для конкретной задачи.

Ключевые слова: межмодульное взаимодействие, многопроцессорные системы, одноплатные вычислительные системы

Поступила 29.12.2025, одобрена после рецензирования 21.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Смирнов А. В. Анализ используемых технологий межмодульного взаимодействия в одноплатных многопроцессорных системах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 84–95. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-84-95

Analysis of inter-module communication technologies in single-board multiprocessor systems

A.V. Smirnov

Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky prospekt, Kaliningrad, 236022, Russia

Abstract. Multiprocessor systems are extensively used for scientific computing, yet their efficiency depends significantly on the mechanisms of inter-module interaction.

Aim. The study aims to review and analyze inter-module communication technologies in single-board multiprocessor systems, identifying their development trends, application scopes, and limitations.

Results. This paper provides a comprehensive analysis of the current state and development trends of single-board computing systems. It also includes a detailed benchmark of communication models and protocols designed for efficient interconnection between single-board computing systems. Further research on this topic is also described.

Conclusion. The analysis confirms that the extensive variety of processor architectures and intermodule communication technologies does not allow for a single universal solution. The selection of a specific solution relies on numerous factors, such as target latency, throughput, and network security, and invariably involves achieving a compromise for a given application.

Keywords: inter-module communication, multiprocessor systems, single-board computing systems

Submitted 29.12.2025,

approved after reviewing 21.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Smirnov A.V. Analysis of inter-module communication technologies in single-board multiprocessor systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 84–95. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-84-95

ВВЕДЕНИЕ

Одноплатные вычислительные системы (SBC, Single-Board Computer) находят широкое применение в различных областях, включая интернет вещей (IoT), системы SCADA, робототехнику, медицинское оборудование и системы искусственного интеллекта [1]. Их распространенность обусловлена масштабируемостью, портативностью, энергоэффективностью, а также поддержкой широкого спектра протоколов и интерфейсов для подключения периферийных устройств и датчиков, включая I2C, SPI, UART, PCI и USB, что обеспечивает возможность интеграции практически в любые аппаратно-программные комплексы.

Основными компонентами одноплатных вычислительных систем являются центральный процессор (CPU), который в зависимости от целевых задач характеризуется различным количеством ядер, тактовой частотой, наличием встроенного графического процессора (GPU) и в ряде случаев специализированного нейронного процессора (NPU) для ускорения алгоритмов машинного обучения, и оперативная память (RAM), выполненная по технологиям LPDDR4 или LPDDR5, для обеспечения более энергоэффективной работы. Для хранения данных используются накопители стандартов eMMC, UFS или SSD, а для размещения загрузчика и низкоуровневого программного обеспечения применяются распаянные на плате модули flash-памяти вида NAND/NOR. Практически все одноплатные



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

системы поддерживают стандартные интерфейсы, такие как GPIO, UART, I2C, SPI, PCIe, USB, а также более специализированные в зависимости от области применения.

Центральный процессор является основополагающим компонентом, определяющим вычислительную мощность SBC. На современном рынке доминируют три основные архитектуры CPU: ARM, AMD64 (x86-64) и RISC-V. Архитектура напрямую влияет на производительность, энергопотребление и совместимость с программным обеспечением.

Большинство современных SBC базируются на процессорах с архитектурой ARM, которая представляет собой усовершенствованную версию RISC-архитектуры и обеспечивает высокую энергоэффективность при достаточном уровне производительности. Основным ограничением ARM-архитектуры является ограниченная совместимость с программным обеспечением, разработанным для платформы x86-64, из-за различий инструкций данных архитектур. Существуют программные решения, частично снимающие это ограничение, однако их использование неминуемо ведет к снижению производительности [2]. Наиболее распространенными ARM-процессорами в этом сегменте являются решения компаний Broadcom, Rockchip, Amlogic и Allwinner.

Параллельно с ARM набирают популярность системы на основе открытой архитектуры RISC-V, которая не требует лицензионных отчислений. Отсутствие лицензионных отчислений является фактором, способным сделать RISC-V одной из наиболее экономически привлекательных архитектур в будущем. Однако на текущий момент поддержка данной архитектуры со стороны как аппаратного, так и программного обеспечения остается ограниченной, хотя и демонстрирует высокие темпы развития. Ключевыми участниками рынка, продвигающими RISC-V, являются компании SiFive и Espressif; решения последней, например, микроконтроллер ESP32-C6, уже активно применяются в IoT-устройствах [3, 4, 5].

В тех сегментах, где критически важна полная программная совместимость, продолжают применяться решения на основе архитектуры AMD64 (x86-64) от компаний Intel и AMD.

Сравнение описанных архитектур процессоров представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная таблица архитектур одноплатных систем

Table 1. Comparative Analysis of Single-Board Computer Architectures

	ARM	AMD64 (x86-64)	RISC-V
Архитектура	Закрытая	Закрытая	Открытая
Энергопотребление	Низкое	Варьируется, но выше, чем ARM и RISC-V	Низкое
Производительность	Высокая	Очень высокая	Средняя, но активно развивается
Поддержка ПО	Высокая, однако требует использования эмуляторов	Очень высокая	Низкая, но активно развивается
Стоимость	Средняя	Высокая	Выше среднего, имеется перспектива снижения стоимости

Современные одноплатные вычислительные системы поддерживают широкий спектр операционных систем, включая RISC OS, RIOT, Contiki OS, а также Windows 10 IoT Core. Тем не менее доминирующее положение на рынке операционных систем для SBC занимает семейство ОС на ядре Linux. Данная тенденция обусловлена в первую очередь

открытостью исходного кода, что позволяет широкому кругу разработчиков участвовать в развитии системы и обеспечивает поддержку большого количества аппаратных конфигураций.

В отличие от проприетарных операционных систем ядро Linux может быть перекомпилировано с целью включения только необходимых драйверов и подсистем для конкретной SBC. Это позволяет минимизировать размер операционной системы, экономя дисковое пространство и оперативную память, что критически важно для встраиваемых систем с ограниченными ресурсами. Помимо этого, Linux предоставляет высокоуровневую абстракцию для аппаратных интерфейсов, таких как I2C, SMBus, SPI и PCI, представляя их в виде стандартизированных и доступных для разработчика API. Это позволяет взаимодействовать с датчиками, исполнительными механизмами и другими электронными компонентами без необходимости написания низкоуровневого кода, специфичного для конкретной аппаратной платформы, что значительно ускоряет процесс разработки и повышает переносимость программного обеспечения.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОММУНИКАЦИИ МЕЖДУ ОДНОПЛАТНЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

Для обеспечения коммуникации между различными одноплатными вычислительными системами используются различные протоколы [6].

В настоящее время одним из наиболее распространенных стандартов в области организации взаимодействия между распределенными вычислительными системами является MPI (Message Passing Interface) [7]. В основе MPI лежит модель взаимодействия процессов посредством отправки и получения сообщений. С практической точки зрения MPI предоставляет примитивы для коммуникации между модулями поверх TCP/IP. Это предоставляет разработчикам стандартизированный программный интерфейс (API) для организации коммуникаций, что существенно упрощает разработку приложений. К ключевым преимуществам MPI можно отнести высокую масштабируемость, позволяющую эффективно использовать вычислительные ресурсы при увеличении числа узлов, богатую функциональность, а также наличие зрелой экосистемы. Однако функциональная полнота MPI обуславливает и ряд недостатков. К ним можно отнести повышение требования к памяти (объем пакета OpenMPI превышает 50 мегабайт, что может являться критическим ограничением для некоторых одноплатных вычислительных систем), а также повышение задержек при большом количестве процессов, что также может быть критично для низкопроизводительных одноплатных вычислительных систем [8]. Основным направлением использования MPI является распараллеливание вычислений на СуперЭВМ, однако он также используется для создания кластерных систем на основе SBC [9]. Но так как большинство SBC-систем используются для IoT, где необходимо отправлять файлы между сервером и клиентами, MPI не так сильно распространен, но все еще является хорошим выбором для создания кластерных систем вычислений.

Другая альтернатива MPI – это удаленный вызов процедур (Remote Procedure Calls, RPC), который позволяет программе выполнить код на удаленном узле так, как если бы это был локальный вызов функции [10]. Современные имплементации RPC, такие как gRPC или Apache Thrift, построены поверх транспортных протоколов. Чаще всего используется HTTP/2 с дополнительными протоколами сериализации данных и механизмами балансировки нагрузки между модулями. Тем не менее, несмотря на удобство разработки, модель RPC обладает и недостатками, связанными с производительностью [11].

Операции сериализации и десериализации данных являются вычислительно затратными. Кроме того, использование протоколов прикладного уровня (таких как HTTP) для инкапсуляции RPC-вызовов добавляет дополнительные накладные расходы на обработку заголовков и установление соединения.

Также существуют системы очередей сообщений (Message Queue, MQ), функционирование которых базируется на парадигме асинхронного обмена сообщениями. В зависимости от архитектуры и используемого протокола взаимодействие между компонентами распределенной системы может осуществляться как через централизованный промежуточный узел – брокер сообщений (например, RabbitMQ, Apache Kafka), так и в децентрализованной манере (например, ZeroMQ), при которой брокер отсутствует, а обмен происходит напрямую между узлами. Брокер-ориентированные архитектуры предоставляют развитую маршрутизацию и гарантии доставки, однако введение брокера создает потенциальные риски: он может стать «узким местом» (bottleneck) производительности, а также точкой отказа всей системы [12].

Также существует отдельная имплементация MQ под названием MQTT [13], который был спроектирован как чрезвычайно легковесный транспортный протокол, функционирующий поверх TCP/IP. Благодаря минимальному размеру служебных заголовков и низким требованиям к ресурсам MQTT является наиболее используемым решением для устройств с ограниченной пропускной способностью каналов связи или с ограниченными вычислительными ресурсами, таких как микроконтроллеры и одноплатные вычислительные системы. Для функционирования MQTT требуется от 8.92KB до 17KB RAM, что является чрезвычайно низким значением, это позволяет MQTT работать на абсолютном большинстве SBC и микроконтроллеров [14]. Но в то же время MQTT не поддерживает выставление приоритетов для сообщений и контроля очередности сообщений, и функционирование поверх TCP/IP добавляет дополнительную задержку [13, 14]. Также основной проблемой, по мнению исследователей, является безопасность протокола, несмотря на то, что протокол имеет встроенные механизмы шифрования, они не охватывают все части протокола, например, схема обмена сообщениями и информация для аутентификации пользователя передаются в открытом виде [15, 16].

Кроме того, существует проприетарное решение ESP-NOW, разработанное компанией Espressif Systems. Отличительными особенностями данного протокола являются низкая задержка передачи данных, обусловленная отказом от использования стека TCP/IP в пользу прямого соединения, простота API, высокая энергоэффективность и дальность передачи данных, а также наличие встроенных механизмов шифрования для обеспечения безопасности передачи. Однако к ограничениям ESP-NOW следует отнести его аппаратную зависимость: поддержка протокола реализована исключительно на устройствах производства Espressif. Кроме того, протокол характеризуется ограничением на максимальное количество одновременно подключаемых устройств в сети [17–19].

Почти все указанные выше протоколы коммуникации основаны на сокетах (sockets), следовательно, для одноплатных вычислительных систем с очень ограниченной вычислительной мощностью и небольшим объемом оперативной памяти можно использовать сокеты (sockets) как низкоуровневый протокол для обеспечения коммуникации между SBC. Сокеты предоставляют программный интерфейс для прямой и низкоуровневой передачи данных поверх TCP и UDP. Основным преимуществом использования сокетов является их легковесность по причине отсутствия высокоуровневых абстракций, однако по этой же причине использование сокетов требует от разработчика более высокого уровня понимания работы системы и ручной реализации дополнительных механизмов передачи данных [6].

Обобщение анализа представлено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительная таблица протоколов межмодульного взаимодействия

Table 2. Comparative Analysis of Inter-Module Interaction Protocols.

Протокол	Преимущества	Недостатки
MPI	Масштабируемость, стандартизированный API, богатая функциональность	Высокие требования к памяти (>50 МБ), рост задержек с увеличением числа узлов
RPC	Простота разработки, балансировка нагрузки	Высокие накладные расходы на сериализацию /десериализацию, задержки от HTTP/2
MQ	Гарантии доставки, маршрутизация, отказоустойчивость (при использовании кластеризации)	Брокер как «узкое место» (bottleneck) и единая точка отказа, сложность конфигурации
ESP-NOW	Сверхнизкая задержка, простота, энергоэффективность, встроенное шифрование	Проприетарный (только Espressif), ограниченное число устройств в сети, подверженность помехам
Сокеты	Легковесность, полный контроль над передачей данных	Низкоуровневый API, требует ручной реализации всех механизмов
MQTT	Чрезвычайно легковесный, оптимален для ограниченных устройств	Нет встроенных приоритетов и контроля очередности, существуют проблемы безопасности

АНАЛИЗ ИСПОЛЪЗУЕМЫХ СИСТЕМ КОММУНИКАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ SBC-СИСТЕМАХ

В работе [20], посвященной созданию системы мониторинга агропромышленных параметров на базе одноплатного микроконтроллера STM32L051K8, реализована схема сбора и удаленной передачи данных. Информация с датчиков передавалась на сервер посредством протокола MQTT поверх соединения LTE. На серверном уровне поступившие данные агрегировались и записывались в базу данных InfluxDB для последующей визуализации и анализа оператором.

В исследовании [21], направленном на анализ концентрации CO₂ с использованием IoT-платформы на базе микроконтроллера Atmega2560, применялся иной подход к организации канала связи. Передача данных о газовом составе осуществлялась по каналу Wi-Fi с использованием проприетарного протокола, обозначенного авторами как IoT Json, функционирующего поверх стека HTTP over TCP. Отправка сообщений производилась строго через заданные временные интервалы.

В исследовании [22], посвященном изучению возможности применения большого количества микроконтроллеров для задач машинного обучения, были протестированы различные архитектуры для передачи данных между несколькими узлами с использованием стандарта IEEE 802. В рамках эксперимента были рассмотрены протоколы ESP-NOW, UDP, TCP и BLE. Каждая из архитектур обладает своими преимуществами и недостатками, что делает их применение зависимым от конкретных задач и условий эксплуатации. В результате исследования были сделаны следующие выводы: протокол BLE продемонстрировал наивысшую энергоэффективность, однако для передачи данных по этому протоколу требуется больше времени, чем при использовании других протоколов. Кроме того, BLE имеет ограничение на размер передаваемого пакета данных, который не может превышать 512 байт.

Протокол TCP позволяет передавать более крупные пакеты данных до 1460 байт, но имеет ограничение на количество одновременно активных клиентов (зависит от характеристик микроконтроллера). Также TCP требует использования трехстороннего рукопожатия для установления соединения между сервером и клиентом, что повышает надежность доставки сообщений, но увеличивает overhead. Протокол ESP-NOW, несмотря на отсутствие накладных расходов, связанных с использованием IP-стека, также имеет ограничения на количество одновременно активных клиентов и размер передаваемых пакетов, которые не могут превышать 250 байт. Протокол UDP теоретически позволяет поддерживать неограниченное количество клиентов, так как не требует предварительного установления соединения между отправителем и получателем. Это снижает задержки, но одновременно уменьшает надежность передачи данных, так как в UDP отсутствует механизм, обеспечивающий подтверждение доставки данных.

В процессе разработки системы мониторинга энергопотребления в режиме реального времени для устройств на базе микроконтроллера SiFive HiFive Premier P550 [23], функционирующего на архитектуре RISC-V, в качестве протокола передачи данных был выбран MQTT. Данный протокол, функционирующий поверх стека TCP/IP, по мнению авторов, является оптимальным для применения в системах с ограниченными вычислительными ресурсами и в условиях значительных сетевых задержек.

В рамках исследования, направленного на создание управляющего контроллера для лабораторного макета цифрового приемника PRATUSH [24], передача данных осуществлялась по каналу Ethernet. Для физического подключения использовался кабель категории 6 (RJ45 CAT6). Обмен информацией был реализован путем отправки UDP-дейтаграмм с пропускной способностью канала 8 Мбит/с. Ввиду ограниченной производительности одноплатного компьютера начального уровня Raspberry Pi 4B, используемого в качестве вычислительного ядра контроллера, программно была введена задержка длительностью в одну секунду. Данное решение позволило обеспечить необходимую синхронизацию процессов ввода данных и их последующей обработки, нивелируя асинхронность работы подсистем ввода-вывода и вычислений.

В работе [25], посвященной разработке активной системы видеонаблюдения, все модули были объединены в единую беспроводную сеть на базе Wi-Fi. Взаимодействие между компонентами системы реализовано по принципу клиент-серверной архитектуры. Отличительной особенностью предложенного решения является то, что каждый периферийный модуль функционирует как самостоятельный веб-сервер. Центральный (головной) управляющий модуль осуществляет подключение к ним по известным IP-адресам для сбора данных. Таким образом, несмотря на общую клиент-серверную модель взаимодействия, каждый узел сохраняет автономность и способность к независимой обработке запросов.

В исследовании, посвященном разработке открытой SCADA-системы для мониторинга солнечной панели [26], была реализована система передачи данных следующей архитектуры. Сбор и первичная передача данных осуществлялись посредством микроконтроллера ESP32. В качестве серверной платформы выступал одноплатный компьютер (SBC) Raspberry Pi 2. Обмен данными между оконечным устройством (ESP32) и сервером производился с использованием протокола MQTT, функционирующего поверх стека TCP/IP. Для обеспечения безопасности и идентификации клиента при подключении к брокеру применялся маркер доступа (Access Token), что является стандартным методом аутентификации в MQTT. Таким образом, в основе системы лежит брокерная архитектура, где Raspberry Pi 2 выполняет роль MQTT-брокера, а ESP32 – роль издателя данных.

Проведенный анализ позволяет сделать ряд обобщающих выводов. Прежде всего, очевидно отсутствие универсального подхода к организации каналов передачи данных: выбор конкретного стека протоколов (MQTT, HTTP, TCP, UDP, ESP-NOW, BLE) и физической среды (LTE, Wi-Fi, Ethernet) детерминируется исключительно спецификой решаемой задачи, требованиями к энергоэффективности и условиями эксплуатации. Ключевым выводом является необходимость поиска компромисса между надежностью доставки, скоростью передачи и энергопотреблением. Так, протокол BLE обеспечивает высокую автономность устройств ценой ограничений на размер пакета и скорость; TCP гарантирует целостность данных, но создает значительные накладные расходы, в то время как UDP минимизирует задержки при отсутствии механизмов подтверждения доставки. В рассмотренных работах прослеживается устойчивая тенденция к использованию брокерных архитектур на базе протокола MQTT, что обусловлено его эффективностью в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и нестабильности сетевого соединения. Одновременно с этим наблюдается функциональное разделение оборудования: микроконтроллеры выполняют роль оконечных устройств сбора данных, а более производительные одноплатные компьютеры (Raspberry Pi) берут на себя функции шлюзов, брокеров и серверов баз данных. Ключевым трендом также является переход к автономным периферийным узлам для обеспечения большей отказоустойчивости.

НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Следующим шагом развития исследования является разработка методики адаптивного выбора протокола межмодульного взаимодействия для одноплатных компьютеров (SBC) и микроконтроллеров. Необходимо создание системы поддержки принятия решений, которая на основе формализованных требований к производительности, задержке, надежности доставки, энергопотреблению, дальности связи и доступным вычислительным ресурсам узлов будет автоматически рекомендовать оптимальный протокол или гибридную схему коммуникации. Ключевой особенностью такой методики должна стать способность учитывать динамически изменяющиеся условия эксплуатации, такие как производительность, качество канала связи и другие.

Базисом для построения подобных адаптивных механизмов должно стать количественное исследование производительности протоколов на гетерогенных аппаратных платформах. Планируется проведение серии экспериментов на стенде, включающем ARM-платы, RISC-V системы и популярные микроконтроллеры. В ходе экспериментальных исследований предполагается измерение ключевых метрик: производительности, задержки сети, джиттера, пропускной способности, энергопотребления для широкого спектра протоколов – MQTT, CoAP, gRPC, ESP-NOW, а также «сырых» UDP/TCP соединений в различных режимах работы. Результатом данной работы станет создание бенчмарка, который будет использоваться в дальнейших исследованиях.

В свете перехода к автономным распределенным системам необходимо исследовать методы обеспечения безопасности в гетерогенных SBC-системах. Критически важен анализ уязвимостей всего тракта передачи данных. В рамках этого направления предполагается разработка легковесных методов шифрования и аутентификации, адаптированных для маломощных узлов с жесткими ограничениями по памяти и вычислительной производительности.

Также необходимостью является разработка методов обеспечения отказоустойчивости и синхронизации. Перспективным видится направление по адаптации классических алгоритмов консенсуса (Raft, Paxos) для систем с узлами, имеющими кратно различающиеся

вычислительные ресурсы. Также требует изучения возможность построения децентрализованных систем управления без выделенного брокера, что позволит исключить единую точку отказа и повысить живучесть системы в целом.

После чего планируется разработка унифицированного фреймворка для межмодульного взаимодействия. Концептуально это программная прослойка, предоставляющая приложениям единый API и скрывающая сложность выбора транспортного протокола. Фреймворк должен автоматически выбирать или даже динамически переключать протокол «на лету» (например, переходить с MQTT на ESP-NOW при потере Wi-Fi-соединения) в зависимости от текущих сетевых условий и доступного энергетического бюджета, обеспечивая тем самым адаптивность и отказоустойчивость.

Опишем формальную постановку задачи исследования. Пусть имеется гетерогенная распределенная система, состоящая из множества вычислительных модулей (узлов) $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$, где каждый узел u_i характеризуется:

- архитектурой процессора $A_i \in \{\text{ARM, x86-64, RISC-V}\}$;
- производительностью процессора P_i ;
- объемом оперативной памяти R_i ;
- типом энергоснабжения $P_i \in \{\text{battery, DC}\}$;
- поддерживаемыми интерфейсами связи $I_i \in \{\text{Wi-Fi, Ethernet, BLE, ESP-NOW}\}$.

Имеется множество протоколов $Pr = \{pr_1, pr_2, \dots, pr_m\} \in \{\text{MQTT, CoAP, gRPC, ESP-NOW, RAW UDP, RAW TCP}\}$, где каждый протокол pr обладает следующим вектором характеристик: $ch(p, u) = \langle \text{Latency, Performance, Loss, Security} \rangle$.

Задача T , цель которой заключается в организации информационного обмена между модулями, задается вектором требований к качеству передачи информации

$$QoS_{\text{req}} = \langle P_{\min}, D_{\max}, L_{\max}, S_{\min} \rangle,$$

где:

- $P_{\min}$ – минимально необходимая производительность;
- $D_{\max}$ – максимально допустимая задержка доставки сообщений (мс);
- $L_{\max}$ – максимально допустимые потери пакетов (%);
- $S_{\min}$ – минимальный уровень безопасности.

Требуется разработать метод, который в режиме реального времени для каждого модуля u определяет оптимальный протокол межмодульного взаимодействия pr и минимизирует задержки D_{total} :

$$pr^* = \min_{pr \in Pr} \sum_{i=1}^n D_i(p, u_i) \text{ при } \begin{cases} \text{Latency}(p, u_i) \leq D_{\max} \\ \text{Performance}(p, u_i) \leq P_{\min} \\ \text{Loss}(p, u_i) \leq L_{\max} \\ \text{Security}(p, u_i) \leq S_{\min} \end{cases}$$

Комплексная реализация перечисленных исследований позволит перейти от эмпирического подхода к выбору протоколов к созданию научно обоснованных, адаптивных и безопасных систем коммуникации для следующего поколения гетерогенных распределенных вычислительных систем.

Таким образом, следующей задачей является разработка и экспериментальная валидация метода адаптивного выбора протокола межмодульного взаимодействия в гетерогенных распределенных системах на базе одноплатных компьютеров и микроконтроллеров, обеспечивающего выполнение заданных требований к качеству обслуживания при минимизации энергопотребления, а также создание программного фреймворка, реализующего предложенный метод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы был проведен анализ современного состояния одноплатных вычислительных систем. Выполненный анализ демонстрирует, что одноплатные вычислительные системы стали неотъемлемым компонентом современной электроники, находя применение в самых разных областях – от бытовой автоматизации до промышленной робототехники. Существующее разнообразие архитектур (ARM, AMD64 и RISC-V) предоставляет разработчикам возможность выбора оптимального баланса между вычислительной мощностью, энергопотреблением и стоимостью в соответствии с требованиями конкретного проекта. Анализ протоколов организации межмодульного взаимодействия показывает, что выбор конкретного решения всегда предполагает поиск компромисса. Если для вычислительных кластеров обосновано применение тяжеловесных решений вроде MPI, то в сфере интернета вещей доминируют легковесные протоколы. Среди них особое место занимает MQTT, который благодаря минимальным требованиям к памяти и пропускной способности каналов связи стал фактическим стандартом для SBC и микроконтроллеров. Анализ практических разработок выявляет тенденцию к формированию гибридных архитектур, в которых функции между узлами распределяются в зависимости от их возможностей. Простые микроконтроллеры используются как оконечные устройства сбора данных, в то время как более производительные одноплатные компьютеры выполняют функции шлюзов, брокеров сообщений или серверов. Такой подход позволяет оптимально сочетать экономичность периферийных устройств с вычислительной мощностью центральных узлов. Кроме того, прослеживается стремление к повышению автономности каждого элемента системы, что способствует росту отказоустойчивости и упрощению масштабирования. Также приведено описание дальнейших исследований по этой теме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ossont S.J., Basford P.J., Perkins C.S. et al. Commodity single board computer clusters and their applications. *Future Generation Computer Systems*. 2018. Vol. 89. No. 2. Pp. 201–212. DOI: 10.1016/j.future.2018.06.048
2. Lombardi F., Recchia A. On abstract machines security and performance. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 231. Pp. 111–118. DOI: 10.1016/j.procs.2023.12.182
3. Gul F.A.I., Tudose D., Turcanu T. A versatile IoT development board for environmental sensing and biometric applications. *23rd RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*. IEEE, 2024. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/RoEduNet64292.2024.10722601
4. Pajkos J. et al. Esp32 microcontroller based lightweight tls 1.3 client for iot applications. *35th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. IEEE, 2025. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA65656.2025.11008381
5. Mota A., Serodio C., Sá A.B., Valente A. Implementation of an Internet of Things architecture to monitor indoor air quality: a case study during sleep periods. *Sensors*. 2025. Vol. 25. No. 6. Art. 1683. DOI: 10.3390/s25061683
6. Dinari H. Inter-process communication (IPC) in distributed environments: An investigation and performance analysis of some middleware technologies. *International Journal of Modern Education and Computer Science*. 2020. Vol. 11. No. 2. P. 36. DOI: 10.5815/ijmecs.2020.02.05
7. Laguna I., Marshall R., Mohror K. et al. A large-scale study of MPI usage in open-source HPC applications. *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. 2019. Pp. 1–14. DOI: 10.1145/3295500.3356176

8. Zhou H. et al. MPI progress for all. *SC24-W: Workshops of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. IEEE, 2024. Pp. 425–435. DOI: 10.1109/SCW63240.2024.00063
9. Misbahuddin S., Ibrahim M.M., Mahmoud A. et al. Automatic patients' vital sign monitoring by Single Board Computer (SBC) Based MPI Cluster. *2nd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*. IEEE, 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/CAIS.2019.8769551
10. Birrell A.D., Nelson B.J. Implementing remote procedure calls. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*. 1984. Vol. 2. No. 1. Pp. 39–59. DOI: 10.1145/2080.357392
11. Seemakhupt K., Stephens B.E., Khan S. et al. A cloud-scale characterization of remote procedure calls. *Proceedings of the 29th Symposium on Operating Systems Principles*. 2023. Pp. 498–514. DOI: 10.1145/3600006.3613156
12. Fu G., Zhang Y., Yu G. A fair comparison of message queuing systems. *IEEE Access*. 2020. Vol. 9. Pp. 421–432. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3046503
13. Soni D., Makwana A. A survey on mqtt: a protocol of internet of things (iot). *International Conference on Telecommunication, Power Analysis and Computing Techniques (ICTPACT-2017)*. 2017. Vol. 20. No. April, 2017.
14. Serepas F., Papias I., Christakis K. et al. Lightweight embedded IoT gateway for smart homes based on an ESP32 microcontroller. *Computers*. 2025. Vol. 14. No. 9. P. 391. DOI: 10.3390/computers14090391
15. Dinculeană D., Cheng X. Vulnerabilities and limitations of MQTT protocol used between IoT devices. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No. 5. P. 848. DOI: 10.3390/app9050848
16. Yassein M.B., Shatnawi M.Q., Aljwarneh S. et al. Internet of Things: survey and open issues of MQTT protocol. *International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*. IEEE, 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICEMIS.2017.8273112
17. Urazayev D., Eduard A., Ahsan M. et al. Indoor performance evaluation of esp-now. *IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*. IEEE, 2023. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/SIST58284.2023.10223585
18. Eridani D., Rochim A.F., Cesara F.N. Comparative performance study of ESP-NOW, Wi-Fi, bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance. *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*. IEEE, 2021. Pp. 322–328. DOI: 10.1109/iSemantic52711.2021.9573246
19. Becker B., Oberli Ch., Zobel J. et al. ESP-NOW performance in outdoor environments: Field experiments and analysis. *20th Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS)*. IEEE, 2025. Pp. 1–8.
20. Wang X. et al. SPARC-LoRa: A scalable, power-efficient, affordable, reliable, and cloud service-enabled LoRa networking system for agriculture applications. *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*. IEEE, 2024. Pp. 151–156. DOI: 10.1109/DySPAN60163.2024.10632833
21. Flores-Cortez O., Cortez R., González B. Design and implementation of an IoT based LPG and CO gases monitoring system. *Computer Science; Information Technology – AIRCC Publishing Corporation*, 2021. Pp. 31–39. DOI: 10.5121/csit.2021.110803
22. Jenhani Z., Bensalem M., Dizdarevic J. et al. An experimental study of split-learning TinyML on Ultra-Low-Power Edge/IoT Nodes. *arXiv e-prints*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2507.16594
23. Scionti A., Savio P., Lubrano F. et al. Runtime energy monitoring for RISC-V Soft-Cores. *International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. Pp. 283–292. DOI: 10.48550/arXiv.2509.26065

24. Srivani K.S., Girish B.S. et al. An SBC-based controller and processor for the laboratory model of PRATUSH digital receiver. *Experimental Astronomy*. 2025. Vol. 60. No. 1. P. 1. DOI: 10.1007/s10686-025-10013-z

25. Yamuna S., George S.N. An IoT based active building surveillance system using Raspberry Pi and NodeMCU. *arXiv e-prints*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2001.11340

26. Aghenta L.O., Iqbal T. Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol. 2019. DOI: 10.3934/ElectrEng.2020.1.57

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Смирнов Александр Владиславович, аспирант, Калининградский государственный технический университет;

236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1;

aleksandr.smirnov@klgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3580-3814>, SPIN-код: 7142-4899

Information about the author

Alexander V. Smirnov, Postgraduate Student, Kaliningrad State Technical University;

1, Sovetsky prospekt, Kaliningrad, 236022, Russia;

aleksandr.smirnov@klgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3580-3814>, SPIN-code: 7142-4899

Программно-алгоритмическая поддержка процессов обработки и анализа электронных нормативных документов в области информационной безопасности

И. Р. Чеканов, А. С. Кузнецов[✉], С. В. Пивнева

Российский государственный социальный университет
129226, Россия, Москва, ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1

Аннотация. В современных условиях активной нормотворческой деятельности поддержание актуальности баз данных информационно-аналитических систем становится критически важным, особенно в области информационной безопасности. В данной научной статье рассмотрены основные вопросы, касающиеся разработки инструментов программно-алгоритмической поддержки процессов обработки и анализа электронных нормативных документов в предметной области информационной безопасности.

Цель исследования – представление результатов разработки и интеграции программно-алгоритмического модуля актуализации нормативно-правовых документов в ЭИАС «Фемида», а также описание его функциональности, обеспечивающей повышение эффективности обработки данных в области информационной безопасности.

Материалы и методы исследования. Методология исследований включает методы системного анализа и синтеза, формализацию и построение алгоритмической информационной поддержки для процессов обработки и анализа нормативных документов в предметной области информационной безопасности.

Результаты. В статье представлены результаты разработки программно-алгоритмического модуля, обеспечивающего автоматизацию процессов актуализации и синхронизации нормативно-правовых документов в области информационной безопасности. Модуль интегрирован в существующую электронную информационно-аналитическую систему (ЭИАС) «Фемида». Описаны принципы его работы, включая парсинг открытых правовых порталов и справочно-правовых систем, сравнение версий документов с использованием мер сходства (расстояние Левенштейна), а также взаимодействие с администратором системы при обнаружении расхождений. Приведены фрагменты программного кода на языке Python и графические схемы, иллюстрирующие логику работы модуля.

Заключение. Практическая значимость работы заключается в снижении трудозатрат на поддержание актуальности нормативной базы и минимизации рисков, связанных с использованием устаревшей информации.

Ключевые слова: обработка электронных документов, программно-алгоритмическая поддержка, информационная безопасность, автоматизация процессов, парсинг, актуализация данных

Поступила 22.12.2025, одобрена после рецензирования 21.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Чеканов И. Р., Кузнецов А. С., Пивнева С. В. Программно-алгоритмическая поддержка процессов обработки и анализа электронных нормативных документов в области информационной безопасности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 96–106. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-96-106

Software and algorithmic support for processing and analyzing electronic regulatory documents in information security

I.R. Chekanov, A.S. Kuznetsov[✉], S.V. Pivneva

Russian State Social University
4, Wilhelm Pieck street, building 1, Moscow, 129226, Russia

Abstract. In a rapidly changing regulatory landscape, ensuring the relevance of information and analytical system databases is becoming critical, particularly in the field of information security. This paper addresses the core challenges in developing software and algorithmic tools for the automated processing and analysis of electronic regulatory documents within information security.

Aim. The study aims to present the development and integration of a software-algorithmic module for updating regulatory documents in the EIAS “Themis”, describing its architecture and performance in improving information security data processing.

Research materials and methods. The core approach involves methods of systems analysis, synthesis, and formalization, combined with the development of algorithmic support for analyzing electronic regulatory documents in information security.

Results. This paper introduces an automated software-algorithmic solution engineered to track, update, and synchronize information security regulatory compliance data within enterprise-level architectures. The developed module has been successfully integrated into the framework of the existing EIAS “Themis”. Its core operational principles are presented, including the parsing of open legal repositories, document version comparison based on the Levenshtein distance algorithm, and administrator interaction upon detecting conflicts. Technical diagrams and Python source code samples are provided to illustrate the functional logic of the module.

Conclusion. The practical relevance of this work stems from reducing the labor-intensive process of keeping the regulatory baseline up-to-date and minimizing risks related to the use of outdated compliance data.

Keywords: electronic document processing, software and algorithmic support, information security, process automation, parsing, data updating

Submitted 22.12.2025,

approved after reviewing 21.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Chekanov I.R., Kuznetsov A.S., Pivneva S.V. Software and algorithmic support for processing and analyzing electronic regulatory documents in information security. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 96–106. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-96-106

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях активной нормотворческой деятельности поддержание актуальности баз данных информационно-аналитических систем (ИАС) становится критически важным, особенно в такой сфере, как информационная безопасность (ИБ), где использование устаревших нормативных документов может привести к серьезным правовым и технологическим рискам [1, 2]. Существующие подходы к актуализации, основанные на ручном мониторинге или использовании коммерческих инструментов (например, «Обновлятор-1С»), часто либо недостаточно гибки, либо требуют значительных временных затрат.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

В работе предложен подход к автоматизации процессов обновления базы нормативных документов на основе специализированного парсинга открытых источников. В отличие от универсальных решений разработанный модуль учитывает специфику предметной области информационной безопасности и встроен в существующую ЭИАС «Фемида», изначально спроектированную для обработки документов с использованием правил на основе мер сходства [3, 4].

Целью статьи является представление результатов разработки и интеграции программно-алгоритмического модуля актуализации нормативно-правовых документов в ЭИАС «Фемида», а также описание его функциональности, обеспечивающей повышение эффективности обработки данных в области информационной безопасности.

Научная новизна. Разработанный алгоритм парсинга и синхронизации нормативных документов **отличается от известных** учетом особенностей предметной области ИБ, возможностью гибкой настройки источниковой базы, а также возможностью создания системы критериев сравнения документов.

Практическая значимость состоит в возможности интеграции «решения» в уже существующие ИАС, что обеспечит повышение оперативности и качества обновления баз данных.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СТАТЬИ

Архитектура базовой ЭИАС «Фемида» и необходимость автоматизации.

ЭИАС «Фемида» разработана для хранения, поиска и анализа нормативных документов в области ИБ. Поиск в системе осуществляется с использованием базы знаний, где применяются меры сходства (например, расстояние Левенштейна) для индексирования ключевых слов и ранжирования результатов [5]. Однако процесс актуализации самой базы данных (БД) до настоящего момента выполнялся вручную, что создавало риск несвоевременного обновления документов и увеличивало нагрузку на сотрудников.

Для устранения этих недостатков разработан специализированный программный модуль, реализующий автоматизированную проверку и обновление документов в БД ЭИАС.

Обобщенный процесс актуализации.

Разработанный модуль функционирует с заданной периодичностью (ежедневно) на этапе 5 процесса функционирования существующей системы обновления в ЭИАС, представленного на рис. 1.

1. Инициализация: запуск модуля, подключение к БД ЭИАС.
2. Циклический обход документов: последовательная выборка элементов (нормативных документов) из БД для проверки их актуальности.
3. Формирование запроса: извлечение атрибутов документа (название, номер, дата утверждения) и формирование поискового запроса.
4. Внешний запрос: отправка запроса к справочно-правовым системам («Консультант-Плюс», «Гарант») и открытым порталам (например, Минцифры РФ) через API или парсинг веб-страниц [6–8].
5. Анализ результатов: сравнение найденной информации с данными в БД. Если документ совпадает – фиксируется дата проверки. Если документ не найден или его версия отличается – инициируется процедура обновления с участием администратора.

В случае расхождений модуль маркирует устаревший документ, сохраняет новую версию во временное хранилище и уведомляет администратора для экспертной обработки и последующей замены.

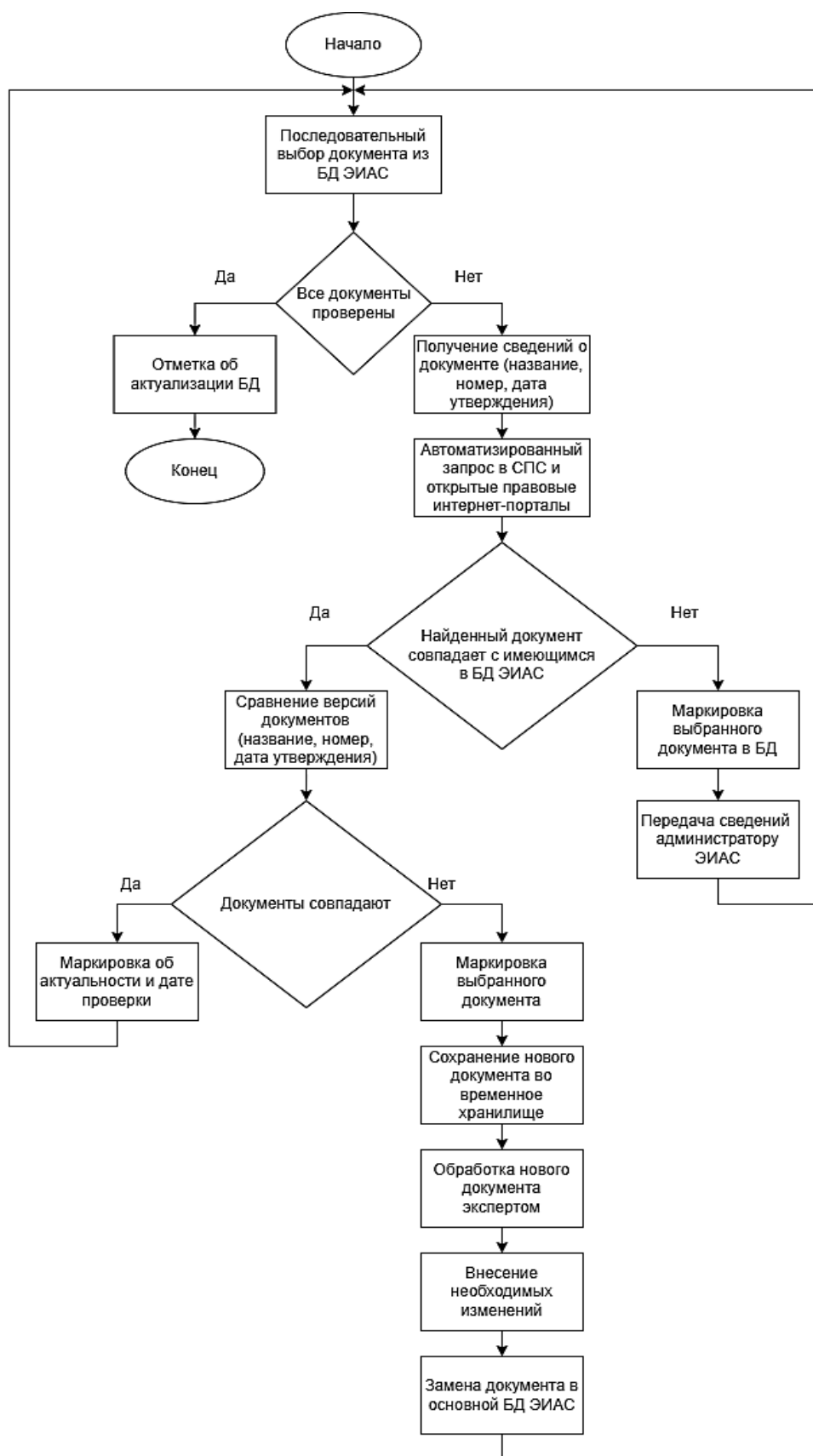


Рис. 1. Обобщенная схема процессов актуализации документов в БД ЭИАС «Фемида»

Fig. 1. Overview of document update processes in the EIAS "Themis" database.

Алгоритм парсинга нормативных документов.

Ключевым элементом разработанного модуля является алгоритм парсинга, реализованный на языке Python. Данный алгоритм в отличие от универсальных решений учитывает специфику предметной области ИБ: поиск ведется по специализированным источникам, а сравнение выполняется с учетом возможных вариаций названий и версий документов.

Алгоритм (рис. 2) включает следующие шаги:

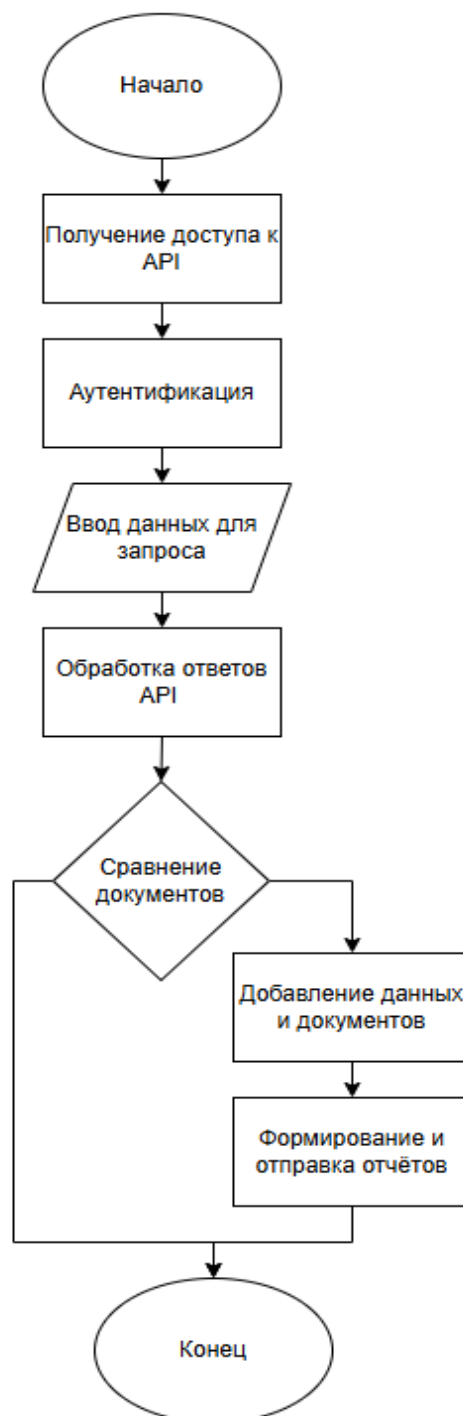


Рис. 2. Блок-схема алгоритма парсинга нормативных документов предметной области ИБ из общедоступных источников

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for regulatory document parsing in the information security domain.

1. Аутентификация: получение доступа к API внешних систем с использованием лицензионных ключей.

2. Формирование запроса: создание запроса на основе семантических компонентов и ключевых слов предметной области ИБ.

3. Отправка запроса и обработка ответа: передача HTTP-запроса, получение данных в формате JSON/XML, обработка ошибок сети и формата.

4. Извлечение данных: парсинг ответа для получения названия, текста, даты и классификационного кода документа.

5. Сравнение документов: проверка на дубликаты по названию (с использованием расстояния Левенштейна) и, при необходимости, по содержанию.

6. Обновление БД: добавление новых или обновленных документов в БД ЭИАС, заполнение метаданных.

7. Логирование: фиксация всех событий и ошибок для последующего анализа.

Алгоритм включает в себя этапы аутентификации, формирования и отправки запросов к API, обработки полученных ответов, сравнения документов и обновления базы данных.

Фрагмент программного кода, реализующего описанный алгоритм, приведен на рис. 3. В коде используются библиотеки requests для работы с API, xml.etree.ElementTree для парсинга XML-ответов и sqlite3 для взаимодействия с БД ЭИАС. Реализованы функции проверки существования документа, добавления новой записи, а также базовая обработка ошибок.

```
python
import xml.etree.ElementTree as ET
import sqlite3
import requests

API_URL = "https://api.consultant.ru/documents"
API_KEY = "YOUR_API_KEY"

def connect_to_db(db_file):
    return sqlite3.connect(db_file)

def document_exists(conn, document_name):
    cursor = conn.cursor()
    cursor.execute("SELECT COUNT(*) FROM documents WHERE name=?", (document_name,))
    return cursor.fetchone()[0] > 0

def add_document(conn, name, code, content):
    cursor = conn.cursor()
    cursor.execute("INSERT INTO documents (name, classification_code, content) VALUES (?, ?, ?)",
                  (name, code, content))
    conn.commit()

def search_documents(query):
    # Реальный запрос к API (в примере возвращается тестовый XML)
    example_xml = """<?xml version="1.0"?>
<documents>
<document>
<name>Федеральный закон об информации (новая редакция)</name>
<classification_code>02.12-23</classification_code>

```

```

    <content>Обновленный текст...</content>
  </document>
</documents>>""
return example_xml

def parse_xml_documents(xml_data):
    try:
        root = ET.fromstring(xml_data)
        docs = []
        for elem in root.findall('document'):
            name = elem.find('name').text
            code = elem.find('classification_code').text
            content = elem.find('content').text
            docs.append({'name': name, 'classification_code': code, 'content': content})
        return docs
    except ET.ParseError as e:
        print(f'Ошибка парсинга XML: {e}')
        return []

def main():
    conn = connect_to_db("femida.db")
    query = "информационная безопасность"
    xml_data = search_documents(query)
    if xml_data:
        documents = parse_xml_documents(xml_data)
        for doc in documents:
            if not document_exists(conn, doc['name']):
                add_document(conn, doc['name'], doc['classification_code'], doc['content'])
                print(f'Добавлен: {doc["name"]}')
            else:
                print(f'Документ уже существует: {doc["name"]}')
    else:
        print("Данные от API не получены.")
    conn.close()

if __name__ == "__main__":
    main()

```

Рис. 3. Фрагмент программного кода, реализующего алгоритм парсинга системы «КонсультантПлюс»

Fig. 3. Python source code sample implementing the parsing algorithm for the ConsultantPlus database

Интеграция модуля в ЭИАС «Фемида».

Разработанный модуль интегрируется в существующую систему на этапе выполнения автоматизированного запроса (этап 5 обобщенной схемы, рис. 1). При этом сохраняется роль администратора, который получает уведомления о найденных расхождениях и принимает окончательное решение о замене документа. Такое сочетание автоматической проверки и экспертного участия позволяет снизить трудозатраты на рутинные операции, сохранив при этом контроль над критическими изменениями.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы авторами разработан и интегрирован в ЭИАС «Фемида» программно-алгоритмический модуль автоматической актуализации нормативных документов в области информационной безопасности. В отличие от существующих коммерческих решений предложенный модуль:

- учитывает специфику предметной области (использование семантических ключей, работа со специализированными источниками);
- гибко настраивается под изменения источников данных;
- сочетает полную автоматизацию рутинных операций с экспертным контролем при обнаружении критических расхождений.

Практическое применение модуля позволяет сократить время на обновление базы данных, исключить влияние человеческого фактора при регулярных проверках и снизить риски, связанные с использованием устаревшей нормативной документации. Дальнейшее развитие работы предполагает расширение спектра подключаемых источников и внедрение механизмов машинного обучения для более точного семантического сравнения версий документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайличенко О. В., Коловангин С. В., Никифорова А. Г. Создание иерархической системы документов в области информационной безопасности Стандартизация ИБ-процессов объектов КИИ // Защита информации. Инсайд. 2021. № 3(99). С. 30–36. EDN: VFMWTT
2. Перминова Я. А., Урсегов А. К. Анализ основных нормативных документов по обеспечению безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации // Научный аспект. 2023. Т. 7. № 6. С. 887–893. EDN: WWDMTT
3. Марков А. К., Семеночкин Д. О., Кравец А. Г., Яновский Т. А. Сравнительный анализ применяемых технологий обработки естественного языка для улучшения качества классификации цифровых документов // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 3. С. 66–77. EDN: TUBOSI
4. Гусев Д. А. Анализ жизненного цикла электронных документов // Инновационные исследования: опыт, проблемы внедрения результатов и пути решения: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Уфа, 19 октября 2024 года. Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований», 2024. С. 50–53.
5. Власенко А. В., Каширина Е. И. Анализ современных методов обработки информации в электронном виде // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2020. № 3(266). С. 46–51. EDN: MJDBJG
6. Решетников В. Н., Мамросенко К. А. Информационные технологии в здравоохранении: развитие региональных систем // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2016. № 1. С. 5. EDN: VXABOF
7. Мирошниченко М. А., Козлов Н. Н., Самкова М. С. Современные аспекты управления знаниями и документами в период цифровой трансформации // Вестник Академии знаний. 2024. № 4(63). С. 607–612. EDN: ZNHYRQ
8. Логинова А. О. Обзор нормативно-правовых источников и практик управления инцидентами информационной безопасности // Вестник СибГУТИ. 2021. № 1(53). С. 50–59. DOI: 10.55648/1998-6920-2021-15-1-50-59
9. Хаимов В. З. Организация противодействия угрозам информационной безопасности при хранении и использовании электронных документов // Документация в информационном

обществе: формирование и сохранение наследия цифровой эпохи: доклады и сообщения XXIX Международной научно-практической конференции, Москва, 27–28 октября 2022 года. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт документоведения и архивного дела, 2023. С. 242–252.

10. Bobrovskiy S., Skorokhodov S., Chekanov I. Design of information support systems for enterprises based on the principles of system analysis // In the collection: Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-II-2023). Proceedings of the II International Workshop. Krasnoyarsk, 2024. С. 2015.

11. Тарасов В. Н., Полежаев П. Н., Шухман А. Е. и др. Математические модели облачного вычислительного центра обработки данных с использованием OpenFlow // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. № 9. С. 150–155. EDN: PJJFBP

12. Бурляева Е. В., Гаврилов А. В. Применение языков предметной области для проектирования технологических схем химического производства // ИТ-Стандарт. 2017. № 1(10). С. 40–43. EDN: ZDRYKF

13. Решетников В. Н., Болодурина И. П., Парфенов Д. И. Моделирование размещения сервис-ориентированных приложений в программно-управляемой инфраструктуре виртуального центра обработки данных // Программные продукты и системы. 2016. № 4. С. 15–22. EDN: XVIFZH

14. Белкина Д. М., Белкин Д. А., Кузнецов А. С. Основы парсинга на Python // Сборник трудов международной молодежной школы «Инженерия – XXI», Новороссийск, 15–18 апреля 2025 года. Новороссийск: Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова, 2025. С. 184–185.

15. Чеканов И. Р., Кузнецов А. С. Информационное обеспечение системы управления электронными документами в области информационной безопасности // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. Т. 22. № 6(252). С. 47–56. DOI: 10.14489/vkit.2025.06.pp.047-056

16. Гуляев А. В., Пивнева С. В. Применение двунаправленной многослойной нейронной сети для восстановления пропусков во временных рядах // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2025. Т. 27. № 2. С. 54–61. DOI: 10.18127/j19998554-202502-06

17. Гуляев А. В., Пивнева С. В. Применение вейвлет-преобразования и сингулярного спектрального анализа при декомпозиции временного ряда // Системы высокой доступности. 2024. Т. 20. № 2. С. 76–84. DOI: 10.18127/j20729472-202402-06

REFERENCES

1. Mikhailichenko O.V., Kolovangin S.V., Nikiforova A.G. Creating a hierarchical filing system in the field of information security. Standardization of Information Security Processes for Critical Information Infrastructure. *Zashchita informacii. Insajd* [Information Security. Inside]. 2021. No. 3(99). Pp. 30–36. EDN: VFMWTT. (in Russian)

2. Perminova Ya.A., Ursegov A.K. Analysis of the main regulatory documents on ensuring the security of the critical information infrastructure of the Russian federation. *Nauchnyy aspekt* [Scientific Aspect]. 2023. Vol. 7. No. 6. Pp. 887–893. EDN: WWDMTT. (in Russian)

3. Markov A.K., Semenochkin D.O., Kravets A.G., Yanovsky T.A. Comparative analysis of applied natural language processing technologies for improving the quality of digital document classification. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12. No. 3. Pp. 66–77. EDN: TUBOSI. (in Russian)

4. Gusev D.A. Analysis of the life cycle of electronic documents. Innovative research: experience, problems of implementing results and solutions: *Collection of articles based on the results of the International scientific and practical conference, Ufa, October 19, 2024*. Sterlitamak: ООО «Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy», 2024. Pp. 50–53. (in Russian)

5. Vlasenko A.V., Kashirina E.I. Analysis of modern methods of processing information in electronic form. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Adyghe State University. Series 4: Natural, Mathematical and Technical Sciences]. 2020. No. 3(266). Pp. 46–51. EDN: MJDBJG. (in Russian)
6. Reshetnikov V.N., Mamrosenko K.A. Information technologies in healthcare: development of regional systems. *Software Products, Systems and Algorithms*. 2016. No. 1. P. 5. EDN: VXABOF. (in Russian)
7. Miroshnichenko M.A., Kozlov N.N., Samkova M.S. Modern aspects of knowledge and document management in the period of digital transformation. *Vestnik akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge]. 2024. No. 4(63). Pp. 607–612. EDN: ZNHYRQ. (in Russian)
8. Loginova A.O. An overview of regulatory sources and practices for information security incident management. *Vestnik SibGUTI*. 2021. No. 1(53). Pp. 50–59. DOI: 10.55648/1998-6920-2021-15-1-50-59. (in Russian)
9. Khaimov V.Z. Organization of counteraction to information security threats during storage and use of electronic documents. *Documentation in the Information Society: Formation and Preservation of the Legacy of the Digital Age: Reports and Communications of the XXIX International Scientific and Practical Conference, Moscow, October 27–28, 2022*. Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut dokumentovedeniya i arkhivnogo dela, 2023. Pp. 242–252. (in Russian)
10. Bobrovskiy S., Skorokhodov S., Chekanov I. Design of information support systems for enterprises based on the principles of system analysis. In the collection: *Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-II-2023). Proceedings of the II International Workshop*. Krasnoyarsk, 2024. P. 2015.
11. Tarasov V.N., Polezhaev P.N., Shukhman A.E., et al. Mathematical models of cloud computing data center based on OpenFlow. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2012. No. 9. Pp. 150–155. EDN: PJJFBP. (in Russian)
12. Burlyaeva E.V., Gavrilov A.V. Dsl-based approach for chemical industry technological schemes design. *IT Standard*. 2017. No. 1(10). Pp. 40–43. EDN: ZDRYKF. (in Russian)
13. Reshetnikov V.N., Bolodurina I.P., Parfenov D.I. Modeling of placing service-oriented applications in a software-defined infrastructure of the virtual data center. *Software & Systems*. 2016. No. 4. Pp. 15–22. EDN: XVIFZH. (in Russian)
14. Belkina D.M., Belkin D.A., Kuznetsov A.S. Basics of parsing in python. *Collection of Works of the International Youth School "Engineering - XXI", Novorossiysk, April 15–18, 2025*. Novorossiysk: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiiy universitet im. V.G. Shukhova, 2025. Pp. 184–185. (in Russian)
15. Chekanov I.R., Kuznetsov A.S. Information support for electronic document management systems in the area of information security. *Vestnik Komp'iuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii*. 2025. Vol. 22. No. 6(252). Pp. 47–56. DOI: 10.14489/vkit.2025.06.pp.047-056. (in Russian)
16. Gulyaev A.V., Pivneva S.V. Application of bidirectional multilayer neural network for restoring missing values in time series. *Neurocomputers*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 54–61. DOI: 10.18127/j19998554-202502-06. (in Russian)
17. Gulyaev A.V., Pivneva S.V. Application of wavelet transformation and singular spectral analysis in time series decomposition. *Highly Available Systems*. 2024. Vol. 20. No. 2. Pp. 76–84. DOI: 10.18127/j20729472-202402-06. (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

Чеканов Иван Романович, ст. преподаватель, Российский государственный социальный университет;

129226, Россия, Москва, ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1;

Cartmen98@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3656-265X>, SPIN-код: 6993-8756

Кузнецов Андрей Сергеевич, канд. техн. наук, зам. руководителя факультета политических и социальных технологий по научной деятельности, доцент кафедры информационных технологий, искусственного интеллекта и общественно-социальных технологий цифрового общества, Российский государственный социальный университет;

129226, Россия, Москва, ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1;

askgoogle@internet.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1569-4765>, SPIN-код: 8442-7210

Пивнева Светлана Валентиновна, канд. пед. наук, доцент, декан факультета политических и социальных технологий, зав. кафедрой информационных технологий, искусственного интеллекта и общественно-социальных технологий цифрового общества, Российский государственный социальный университет;

129226, Россия, Москва, ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1;

pivnevasv@rgsu.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2288-9915>, SPIN-код: 1302-5825

Information about the authors

Ivan R. Chekanov, Senior Lecturer, Russian State Social University;

4, Wilhelm Pieck street, building 1, Moscow, 129226, Russia;

Cartmen98@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3656-265X>, SPIN-code: 6993-8756

Andrey S. Kuznetsov, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Faculty of Political and Social Technologies for Research, Associate Professor, Department of Information Technology, Artificial Intelligence, and Socio-Social Technologies of Digital Society, Russian State Social University;

4, Wilhelm Pieck street, building 1, Moscow, 129226, Russia;

askgoogle@internet.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1569-4765>, SPIN-code: 8442-7210

Svetlana V. Pivneva, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Political and Social Technologies, Head of the Department of Information Technology, Artificial Intelligence, and Social Technologies of the Digital Society, Russian State Social University;

4, Wilhelm Pieck street, building 1, Moscow, 129226, Russia;

pivnevasv@rgsu.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2288-9915>, SPIN-code: 1302-5825

Имитационное моделирование системы управления смесителями комбикорма

А. М. Трамова¹, Н. В. Мокрова^{1,2}, В. С. Артемьев^{✉1}

¹Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

²Национальный исследовательский технологический университет МИСИС
119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1

Аннотация. Управление смесителем комбикорма как сложным электромеханическим объектом связано с необходимостью одновременного контроля скорости вращения мешалок, уровня загрузки, предотвращения перегрузок и обеспечения требуемой однородности смеси. Существенное влияние на режимы работы оказывают переменная нагрузка, обусловленная массой и физико-механическими свойствами материала, а также инерционность системы и особенности переходных процессов при пуске и останове. Система управления, способна учитывать изменение параметров объекта в реальном времени и корректировать управляющие воздействия.

Цель исследования – разработка функциональной схемы автоматизированной системы управления электроприводом смесителя комбикорма и определение рациональных параметров регулирования электродвигателя.

Методы. Использован подход имитационного моделирования на основе представления системы в пространстве состояний с выделением каналов управления, возмущений и измерений. Модель включает электромеханическую подсистему привода, формирование переменной нагрузки и алгоритм адаптивного управления с обратной связью по скорости и моменту.

Результаты. Сформирована имитационная модель, позволяющая исследовать динамику фазных токов, электромагнитного момента и частоты вращения двигателя во времени. Установлена зависимость переходных процессов от параметров загрузки и настроек регулятора, определены условия устойчивой работы системы при изменяющихся режимах.

Выводы. Имитационное моделирование позволяет прогнозировать поведение электропривода смесителя и обоснованно выбирать параметры управления. Применение модели обеспечивает повышение точности настройки системы и достижение требуемой однородности смеси в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: смеситель комбикорма, электродвигатель, адаптивное управление, имитационная модель

Поступила 28.01.2026, одобрена после рецензирования 20.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Трамова А. М., Мокрова Н. В., Артемьев В. С. Имитационное моделирование системы управления смесителями комбикорма // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 107–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-107-121

Simulation modeling of a feed mixer control system

A.M. Tramova¹, N.V. Mokrova^{1,2}, V.S. Artemyev^{✉1}

¹Plekhanov Russian University of Economics

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia

²National University of Science and Technology MISIS

4, Leninsky prospekt, building 1, Moscow, 119049, Russia

Abstract. Controlling a feed mixer as a complex electromechanical system requires simultaneous monitoring of mixing speed and loading level, as well as overload prevention and ensuring the required mixture uniformity. The operating modes are significantly influenced by variable loads, which depend on the material mass and physical-mechanical properties, system inertia, and transient processes during startup and shutdown. Changes in the object's parameters are taken into account in real time, and control actions are adjusted by the control system.

Aim. The study aims to develop a functional diagram of an automated control system for a feed mixer electric drive and to determine optimal motor regulation parameters.

Methods. The study employs simulation modeling based on a state-space representation of the system, defining control, disturbance, and measurement channels. This model integrates an electromechanical drive subsystem, a variable load generator, and an adaptive control algorithm with speed and torque feedback.

Results. The study develops a simulation model that evaluates the time-dependent dynamics of phase currents, electromagnetic torque, and motor speed. Our findings establish how transient processes depend on load parameters and controller settings, defining the conditions for stable system operation under variable modes.

Conclusions. Simulation modeling enables predicting the electric drive behavior of the feed mixer and justifies the selection of control parameters. Furthermore, the developed model improves tuning accuracy and ensures the target mixture homogeneity under various operating conditions.

Keywords: feed mixer, electric motor, adaptive control, simulation model

Submitted 28.01.2026,

approved after reviewing 20.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Tramova A.M., Mokrova N.V., Artemyev V.S. Simulation modeling of a feed mixer control system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 107–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-107-121

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к автоматизации производственных процессов предъявляют высокие стандарты к системам управления технологическим оборудованием, в то же время сельское хозяйство требует высокой эффективности работы оборудования, минимизации затрат и обеспечения качества продукции. В существующих агропромышленных комплексах особую роль играет эффективное управление смесителями комбикорма, обеспечивающее их производительность, надежную работу, энергоэффективность и точность дозирования компонентов [1–3]. Смеситель комбикорма обеспечивает равномерное смешивание различных компонентов корма [4–6]. Для решения задач оптимизации технологии производства кормов исследуются физические основы процессов перемешивания [7], изучаются машины и оборудование в составе систем управления смесительными установками [8–15].



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Процесс перемешивания кормов осложняется разнообразием состава кормовой базы, особенно сезонным; разнообразием размеров частиц составляющих; возможным разделением на фракции при одновременном смешивании. Интенсификация процесса состоит в уменьшении времени «нахождения материала в смесителе для повышения производительности машины и снижения энергоемкости процесса». Задачи интенсификации процессов производства комбикормов исследуются достаточно широко [16–18] при разных способах их реализации. Управление смесителем комбикорма включает контроль скорости вращения мешалок, поддержание заданного уровня загрузки смеси, предотвращение перегрузок и, что особенно важно, обеспечение однородности конечного продукта. Использование гибких систем автоматического управления позволяет оптимизировать технологические процессы за счет регулирования ключевых параметров смесителя [19].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является формализация и последующий анализ динамических режимов функционирования электропривода, смесительного оборудования, комбикормового производства на основе имитационного моделирования.

В рамках поставленной задачи выполнено построение модели, отражающей взаимосвязь электромеханических и технологических параметров процесса перемешивания, что позволяет перейти от описательного уровня к количественной оценке режимов работы привода. Сформированная имитационная модель реализует воспроизведение переходных процессов в системе анализа временных зависимостей, переменных состояния и фазные токи $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$, электромагнитный момент $M(t)$, угловую скорость вращения ротора $\omega(t)$. Нагрузка на валу двигателя рассматривается как функция технологических параметров перемешиваемой среды:

$$M_H(t) = f(\rho, \mu, k_{cm}, \omega),$$

где ρ – плотность сырья, μ – вязкость, k_{cm} – коэффициент сопротивления перемешиванию.

Анализ результатов моделирования показывает, что при изменении физико-механических характеристик сырья и режимов загрузки формируется выраженная нелинейность нагрузочных воздействий, что приводит к вариациям электромагнитных и механических параметров привода.

Адаптивная система управления в рассматриваемой постановке может быть представлена в виде функционала:

$$u(t) = F(x(t), \hat{\theta}(t)),$$

где $x(t)$ – вектор состояния системы, $\hat{\theta}(t)$ – оценка изменяющихся параметров объекта, формируемая в процессе идентификации. Такой подход обеспечивает согласование управляющего воздействия с текущими условиями функционирования, включая изменение характеристик сырья, режимов загрузки и внешних возмущений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Смесители комбикормов представляют собой сложные объекты управления, характеризующиеся нелинейностью из-за зависимости нагрузки от количества и плотности материала, значительным временем запаздывания вследствие инерционности системы ввиду значительной массы перемешиваемого материала, неопределенностью внешних воздействий в зависимости от температуры окружающей среды, влажности составляющих, свойств сырья и т.п. [20]. Анализируя смеситель как объект управления, важно учитывать такие параметры, как скорость вращения рабочего органа мешалки, плотность

смеси, мощность привода электродвигателя и стабильность процесса смешивания [21]. Для учета динамических изменений в процессе работы смесителя необходимо построение системы управления по принципу обратной связи с учетом параметров нагрузки, скорости и положения мешалки. Закономерности построения системы управления основаны на принципе обратной связи, моделировании динамических процессов и адаптации к изменениям внешних условий. Для эффективной работы системы необходимо обеспечить согласование режимов работы электродвигателя с требованиями технологического процесса. Среди основных принципов построения системы управления нужно отметить моделирование процессов с целью корректировки управляющих воздействий [22], использование основных законов регулирования, реализацию адаптивной настройки параметров системы в зависимости от текущих условий работы.

Рассмотрим структурную схему системы автоматического управления для контроля работы смесителя комбикорма (рис. 1), где УУ – управляющее устройство, ОУ – объект управления (смеситель комбикорма).

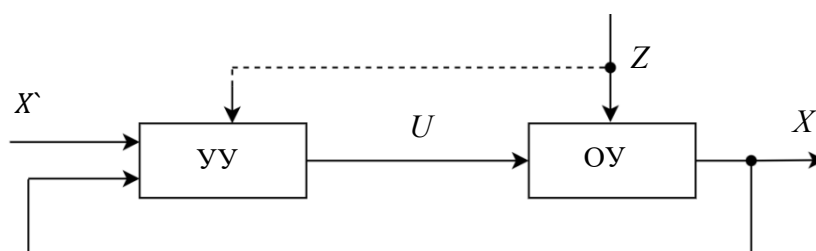


Рис. 1. Структурная схема системы управления смесителем комбикорма

Fig. 1. Structural diagram of the feed mixer control system

Выходной сигнал объекта представляет собой совокупность контролируемых параметров, таких как уровень загрузки, степень гомогенизации смеси, температура и влажность. В общем случае множество параметров можно описать вектором $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, управляющее воздействие вектором $U = (u_1, u_2, \dots, u_r)$, задающее воздействие определяет требуемые характеристики процесса смешивания и описывается вектором $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$. Выбор замкнутой системы управления смесителями комбикорма обусловлен возможностью учета фактического состояния объекта управления в условиях внешних возмущений в отличие от разомкнутой схемы с управлением по заранее заданному алгоритму. Замкнутый контур обеспечивает автоматическую компенсацию возмущений $Z = (z_1, z_2, \dots, z_i)$, колебания напряжения, изменение влажности компонентов или нестабильность загрузки сырья, а также ошибки алгоритмов управления, неточности обработки данных, что можно устранить совершенствованием регуляторов и их адаптацией к условиям работы смесителя [23]. Динамика объекта управления описывается зависимостью выходной величины X от управляющего воздействия U и возмущений Z как $x = F(U, Z)$, где F – оператор, определяющий реакцию системы на входные воздействия.

Важная задача – поддержание качества смешивания компонентов, стабильности дозирования и энергоэффективность процесса [7]. К данным помехам можно отнести изменение нагрузки на смеситель при подаче сырья с различной плотностью, колебания напряжения в электросети. Если помеху Z или хотя бы некоторые ее составляющие $z_1, z_2, \dots, z_i$ возможно измерить, можно говорить о компенсации возмущающих факторов – пунктирная линия на рис. 1. Комбинированные системы управления имеют преимущества,

при этом область применения компенсационных методов гораздо уже, чем методов обратной связи из-за нестабильного характера и невозможности учета всех возмущений и сложного расчета корректирующих воздействий.

Задача проектирования системы управления сводится к разработке такого управляющего устройства, которое наилучшим образом адаптируется к динамическим условиям работы смесителя. Запишем математическую модель динамики смесителя в виде системы дифференциальных уравнений, где f – вектор-функция, определяющая динамику системы, $x_i^{(0)}$ – начальные значения переменных состояния смесителя. Оператор дискретно-непрерывной системы может быть задан уравнениями в конечных разностях (1):

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \left(\frac{dx_1}{dt}, \dots, \frac{dx_n}{dt} \right); \quad F(X, U, Z, t) = (f_1(\cdot), \dots, f_n(\cdot)) \\ x^{(0)} &= (x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}), \quad x_i^{(0)} = (x_i)_{t=0}, \quad (i = 1, \dots, n). \end{aligned} \quad (1)$$

Алгоритмы оптимального управления должны учитывать динамические изменения характеристик объекта, наличие внешних возмущений и технологические ограничения. Дискретизируем $x_i(m)$ в момент времени $t = t_m$ $X(m) = [x_1(m), \dots, x_n(m)]$ для реализации цифрового управления. Оператор дискретно-непрерывной системы в виде разностных уравнений $x_i(m+1) = g_i[x_1(m), \dots, x_n(m); u_1(m), \dots, u_r(m); z_1(m), \dots, z_i(m); m]$, $(i = 1, \dots, n)$, где g_i – нелинейная функция аргументов, связывающая значения параметров смеси и управляющих воздействий между последовательными моментами времени. В векторной форме $X(m+1) = G[X(m); U(m); Z(m); m]$. Дискретно-непрерывные методы реализуют управление в зависимости от дискретизации показаний датчиков, приводы при этом работают в непрерывном режиме. Управляющее воздействие $U(m)$ характеризует систему электропривода, влияние $Z(m)$ отражает задержки и колебания в системе электропривода, содержит колебательную составляющую, требует использования адаптивных алгоритмов управления с введением логарифмических и экспоненциальных компонент модели.

В чисто дискретных системах не только измерения выполняются в определенные моменты времени, но и значения параметров ограничены фиксированными уровнями: так, уровни мощности привода составляют 0, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, количество подаваемых компонентов также определяется целыми числами доз. На значения параметров подобных систем накладываются дискретные ограничения $x_i(m) = aq$, где a – квантовый шаг параметра, q – целое число. При проектировании систем управления смесителями комбикорма необходимо учитывать и различные виды ограничений на управляющие воздействия, параметры состояния и характеристики процесса. В реальных условиях на управляющие воздействия накладываются ограничения в виде неравенств $|u_1| \leq U_1, \dots, |u_r| \leq U_r$. Скорость подачи сырья должна оставаться в допустимых пределах.

Возможен случай, когда ограничены функции взаимосвязи управляющих сигналов $\sum_{v=1}^r \lambda_v^2 u_v^2 \leq N$, где λ – коэффициенты нормировки, N – предельное значение. Данное ограничение может использоваться для контроля суммарного энергопотребления системы. В r -мерном пространстве управляющих воздействий U эти ограничения определяют допустимую область $\Omega(U)$, внутри которой сформированы управляющие сигналы $U \in \Omega(U)$. В реальных системах управления ограничения на обобщенные показатели эффективности, общее энергопотребление или расход сырья за цикл [24]. Подобные ограничения накладываются на параметры температуры смеси и не должны превышать заданный предел, иначе возможна потеря питательных свойств корма или же перегрев оборудования.

Общие ограничения на параметры состояния $H_\mu(x_1, \dots, x_n) = H_\mu(\bar{x}) \leq 0$ ($\mu = 1, \dots, m$), где $H_\mu(x)$ – функции или функционалы, ограничивающие параметры смеси. Если x_1 – влажность, то зададим ограничение $H_1(x) = x_1 - x_{\max} \leq 0$, в n -мерном пространстве состояний допустимая область $\Omega(x)$ и $X \in \Omega(X)$. Запишем ограничения в виде функционалов от управляющих воздействий $U(t)$, состояний $X(t)$ и возмущений $Z(t)$, $L_\mu[U(t), X(t), Z(t)] \in \Omega_\mu(L)$ ($\mu = 1, \dots, m$). Ограничение на общее энергопотребление электропривода $L = \int_0^T [\sum_{v=1}^n \alpha_v x_v^2 + \beta u^2] dt \leq N$, где α_v, β, N – положительные константы, T – время работы системы.

В процессе проектирования автоматизированных систем управления смесителями комбикорма важно учитывать ограничения на параметры системы и влияние возмущений, возникающих в ходе технологического процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обеспечения эффективного управления процессом смешивания комбикорма важно не только анализировать динамику системы, но и правильно подбирать электропривод в составе системы автоматизированного управления, который сможет реализовать требуемые алгоритмы [13]. После получения численных решений разностных уравнений и анализа параметров системы становится очевидно, что выбор двигателя должен учитывать как динамические характеристики нагрузки, так и технологические ограничения [25]. Правильный выбор электродвигателя в системе управления играет ключевую роль в обеспечении эффективной работы смесителя. Важной характеристикой служит совместимость с системой управления, а именно поддержка протоколов обмена данными, возможность интеграции с ПЛК или микроконтроллерами [26].

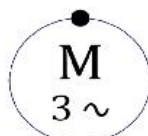
Имитационное моделирование электропривода выполнено с учетом параметров состояния смеси, возможных внешних возмущений, учтены динамические изменения момента нагрузки, возможность корректировки на основе обратной связи. Выполнено имитационное моделирование в среде SimInTech, в ходе которого исследованы параметры электропривода с учетом рассчитанных переменных состояния смеси и возможных внешних возмущений. Разработанная модель позволила проанализировать реакцию системы на изменения момента нагрузки, определить оптимальные режимы работы двигателя и скорректировать стратегию управления.

В рассматриваемой модели в качестве привода используется асинхронный электродвигатель мощностью 11 кВт, питаемый от трехфазной сети напряжением 380 В. Данный выбор обусловлен не только требуемой мощностью, но и необходимостью обеспечить устойчивую работу смесителя при переменной и зачастую неравномерной нагрузке, характерной для процессов перемешивания многокомпонентных смесей. При частоте вращения порядка 3000 об/мин. достигается достаточная интенсивность перемешивания, при этом всем двигатель не выходит на критические тепловые режимы, что очень важно при длительной эксплуатации оборудования.

Инерционные свойства ротора, описываемые моментом инерции $0,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, оказывают заметное влияние на динамику системы. При резких изменениях состава сырья или перераспределении массы внутри рабочей камеры это позволит частично сглаживать переходные процессы и избегать избыточных колебаний скорости.

При построении модели дополнительно введен коэффициент вязкого трения, принятый равным 0,002, отражающий диссипативные потери в механической части системы. Указанный параметр приобретает существенное значение при обработке смесей с повышенной

плотностью и выраженной неоднородностью компонентов [27], увеличение сопротивления вращению может приводить к локальным нарушениям кинематики потока, а в последующем к ухудшению качества перемешивания. Совокупность принятых параметров электродвигателя и их реализация в среде моделирования представлены на рис. 2.

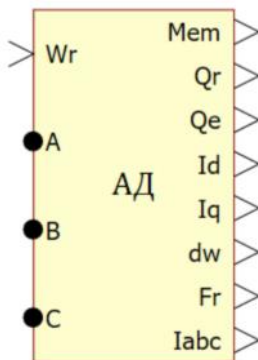


Название	Имя	Формула	Значение
Номинальные			
Номинальная мощность, кВт	Pnom		11
Номинальное напряжение, В	Unom		380
Номинальная частота питающе...	fnom		50
Номинальная частота вращени...	Nnom		3000
Число пар полюсов	p		1
Момент инерции, кг*м2	J		0.2
Схема замещения			
Сопротивления статора [Xls, Rs...	Zst		[0.011 , 0.23]
Сопротивление намагничивани...	Zm		[0.21]
Сопротивление ротора [Xlr, Rr]...	Zr0		[0.11 , 0.19]
Начальные условия			
Начальная угловая скорость [ω...	Init_M		[0]
Дополнительные			
Имя на схеме	sc_name		
Блокировать отрицательную ск...	Wlock		☐ Нет
Коэффициент вязкого трения, ...	F	0.002	0.002

Рис. 2. Основные характеристики электродвигателя

Fig. 2. Electric motor performance characteristics

При выборе параметров электродвигателя для смешивания кормов всегда важен баланс между устойчивостью системы и эффективностью процесса. Следовало подобрать значения, которые обеспечивали бы оптимальную динамику работы, исключая перегрузки и неравномерность перемешивания. Такие характеристики, как сопротивление статора и ротора, напрямую влияют на энергопотребление и тепловые потери. Авторы выбрали значения, которые позволяют минимизировать нежелательные тепловые эффекты, сохраняя при этом достаточную мощность для эффективного перемешивания (рис. 3). Индуктивности, отвечающие за процессы намагничивания и рассеяния, были выбраны с учетом требуемого уровня контроля электромагнитных процессов.



Название	Имя	Формула	Значение
Сопротивление статора [Ом]	Rs	0.23	0.23
Сопротивление ротора [Ом]	Rr	0.19	0.19
Индуктивность намагничивания [Гн]	Lm	0.21/(100...	0.000668450761
Индуктивность рассеяния ротора [Гн]	dLr	0.11/(100...	0.0003501408748
Индуктивность рассеяния статора [Гн]	dLs	0.11/(100...	0.0003501408748
Число пар полюсов двигателя	Zp	1	1

Рис. 3. Тестовые характеристики электродвигателя

Fig. 3. Electric motor test performance

Предложена функциональная схема моделирования асинхронного двигателя с трехфазным питанием, реализованная в среде динамического моделирования SimInTech (рис. 4).

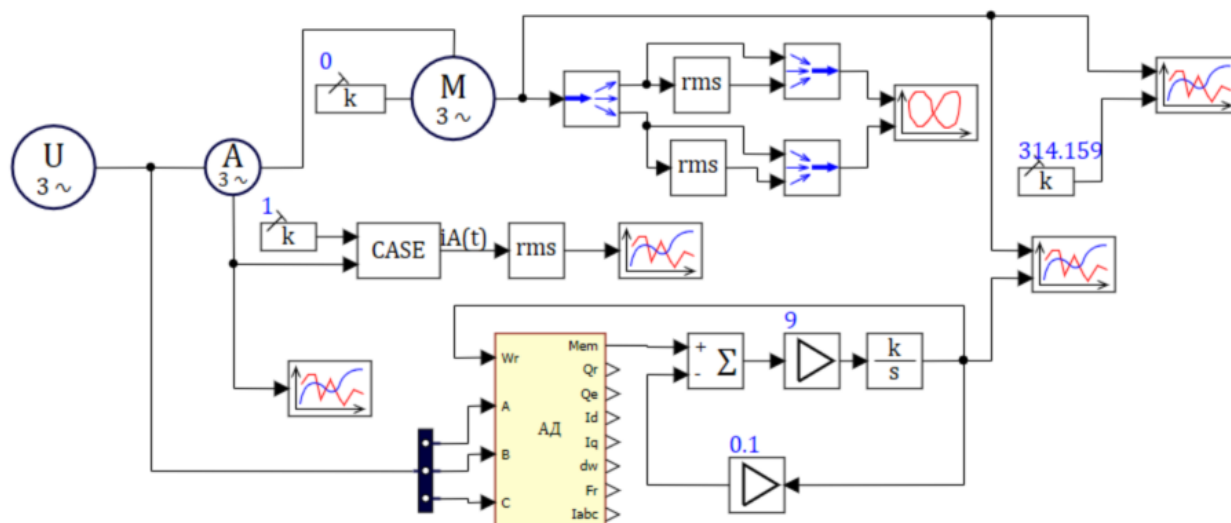


Рис. 4. Функциональная схема системы управления процессом смешивания комбикорма

Fig. 4. Functional diagram of the feed mixing control system

Схема регулирования (рис. 4) построена вокруг типовой структуры электропривода, в которой источник трехфазного напряжения U_3 обеспечивает питание асинхронного двигателя M_3 , непосредственно связанного с исполнительным механизмом смесителя. При этом двигатель рассматривается не изолированно, а как элемент системы, поведение которого определяется как параметрами питания, так и текущим состоянием нагрузки. Практически значимыми факторами всегда выступают нестабильность входного напряжения и изменчивость нагрузки в процессе перемешивания. Как показали расчеты, поведение системы получается чрезмерно сглаженным и не отражает реальных режимов работы. Контролируется форма сигналов, что дает возможность выявлять отклонения еще до возникновения перегрузки. Для оценки состояния привода используются блоки вычисления действующих значений токов и напряжений.

Регулирование скорости реализовано по замкнутой схеме, где ошибка между заданной и текущей скоростью используется для формирования управляющего воздействия:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}.$$

Подбор коэффициентов выполняется с учетом динамики системы, при изменении свойств смеси фиксированные значения оказываются недостаточными. Введение адаптивного блока позволяет корректировать параметры регулятора непосредственно в процессе работы. После первичной обработки сигналы поступают в модуль CASE – не просто передача данных, а выбор сценария работы в зависимости от текущего состояния системы. За счет этого достигается более гибкая реакция привода на изменения условий.

В качестве диагностического параметра выбран фазный ток $i_A(t)$. Его обработка выполняется через вычисление действующего значения:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_A^2(\tau) d\tau}.$$

По этому показателю удобно оценивать загрузку двигателя. При увеличении вязкости смеси или неравномерном распределении компонентов возрастает момент сопротивления, что сразу отражается на токе. Выходные параметры двигателя – скорость ω_r и момент M_e – дополнительно сглаживаются. Мгновенные значения в ряде случаев дают избыточную вариативность и затрудняют анализ. Поддержание устойчивых значений этих величин напрямую связано с качеством процесса перемешивания.

В ходе исследований выполнено моделирование работы привода, графики (рис. 5) позволяют проанализировать ключевые характеристики, определить возможные потери и убедиться в правильности выбора параметров двигателя.

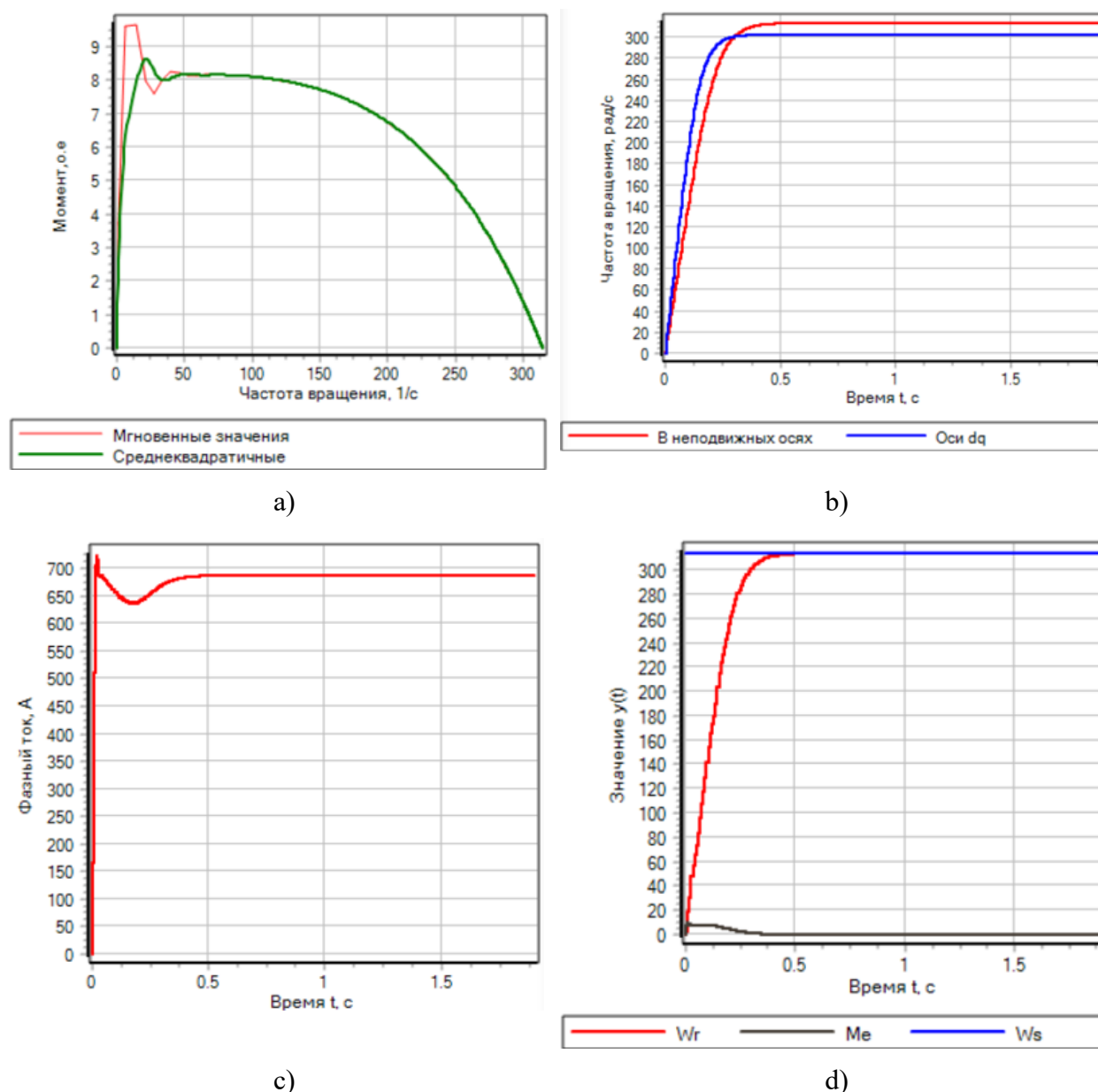


Рис. 5. Имитационное моделирование электродвигателя смесителя комбикорма:
 а) зависимость момента от частоты вращения, б) частота вращения во времени,
 в) фазный ток во времени, г) динамика угловой скорости, момента и скольжения

Fig. 5. Simulation results for the feed mixer electric motor:
 а) torque versus rotational speed; б) motor speed over time;
 в) phase current over time; г) dynamics of angular velocity, torque, and slip

Двигатель обеспечивает высокий пусковой момент около 9 Н·м (рис. 5 а), что необходимо для преодоления сопротивления неподвижной смеси в пусковом режиме. Стабилизация свидетельствует о высокой энергоэффективности двигателя, снижение крутящего момента указывает на естественные ограничения по мощности и КПД. Двигатель сохраняет достаточный запас момента в диапазоне рабочих скоростей, что важно для равномерного перемешивания кормов. Изменение частоты вращения во времени (рис. 5 б) характеризует высокую динамику разгона, быстрое достижение номинальной частоты вращения. Разница между кривыми в неподвижных осях и в осях dq демонстрирует стабильную работу системы управления двигателем. Скачок фазного тока до 700 А (рис. 5 с) и стабилизация на уровне 650 А характеризуют режим запуска и потребление повышенного тока для создания крутящего момента. Установившийся режим показывает низкий уровень потерь и отсутствие перегрева обмоток, что положительно сказывается на долговечности двигателя. Стабилизация значений угловой скорости, электромагнитного момента и скольжения (рис. 5 d) при выходе на рабочий режим указывает на завершение переходных процессов, достижение устойчивого режима функционирования привода и отсутствие перегрузочных состояний в исследуемом диапазоне работы. Низкое значение параметра скольжения указывает на высокую эффективность работы привода, при этом механическая мощность практически полностью используется для вращения вала, и тепловые потери отсутствуют. Результаты анализа подтверждают выбор оптимальных параметров электродвигателя системы смешивания кормов.

Выводы

Введение адаптивного механизма позволяет частично компенсировать указанные эффекты за счет подстройки параметров управления в процессе работы. Применение замкнутого контура регулирования скорости в сочетании с вычислением действующих значений токов и напряжений показало свою работоспособность при различных режимах загрузки. Использование rms -оценок оказалось целесообразным не столько для повышения точности измерений, сколько для стабилизации управляющих воздействий при кратковременных возмущениях. Изменение вязкости и неоднородности компонентов приводит к колебаниям момента сопротивления, что отражается на потребляемом токе. Фиксированные настройки регулятора оказываются недостаточно эффективными.

Включение блока CASE позволило реализовать переключение между различными режимами работы без существенных задержек, что в ряде сценариев предотвращает развитие аварийных состояний. Дополнительными факторами, влияющими на устойчивость системы, являются колебания питающего напряжения, а также неравномерное распределение массы внутри смесителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овечкина Л. Ю., Бузоверов С. Ю., Лобанов В. И. Повышение эффективности процесса смешивания комбикормов путем модернизации рабочего органа смесителя // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 4-1(55). С. 75–78. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78
2. Мамедов Г. Б., Камран Т. Ф. Исследование производительности экспериментального кормосмесителя // Аграрная наука. 2021. № 2. С. 90–93. DOI: 10.32634/10.32634/0869-8155-2021-345-2-90-93
3. Савиных П. А., Алешкин А. В., Турубанов Н. В., Зырянов Д. А. Определение рациональных параметров смесителя теоретическими исследованиями взаимодействия винтовой поверхности шнека с материалом // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1(41). С. 76–84. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-76

4. Коновалов В. В., Боровиков И. А., Гусев С. В., Терюшков В. П. Результаты экспериментальных исследований смесителя комбикормов [Смеситель комбикормов с комбинированным рабочим органом периодического действия] // Вестник Московского государственного агроинженерного университета. 2006. Вып. 3. С. 78–79.

5. Коновалов В. В., Гусев С. В., Терюшков В. П., Боровиков И. А. Обоснование параметров смесителя комбикормов периодического действия // Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. 2006. Т. 16. № 3. С. 47–52.

6. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Исупов А. Ю. Определение оптимальных технологических параметров горизонтального смесителя рассыпных комбикормов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25. № 2. С. 293–300. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.293-300

7. Глобин А. Н., Глазков Д. Ю., Липкович И. Э. и др. Теоретические исследования процесса смешивания кормов центробежным смесителем // АгроЭкоИнфо. 2024. № 5(65). Art.id:20. DOI: 10.51419/202145504

8. Матюшев В. В., Бочкарев А. Н., Семенов А. В., Чаплыгина И. А. Исследование режимов работы центробежного смесителя сыпучих компонентов // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021. № 4(44). С. 206–214. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_4_206

9. Остриков А. Н., Сухарев А. И. Смешивание компонентов комбикормов в двухвальном лопастном смесителе // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2002. № 2-3. С. 53–55.

10. Проценко А. М., Денисенко Е. А. Совершенствование рабочих органов в горизонтальных смесителях // Образование. Наука. Производство: сб. докл. XV Международного молодежного форума. Белгород: Белгородский ГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. С. 104–109.

11. Николаев В. Н., Зязев Е. В. Результаты исследований процесса смешивания сыпучих кормов в аэродинамическом смесителе // АПК России. 2022. Т. 29. № 3. С. 331–335. DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-3-331-335

12. Джингилбаев С. С., Силин В. А. Экспериментальное обоснование оптимальных значений угла наклона и частоты вращения шнеков горизонтально шнекового смесителя // Механика и технологии. 2022. № 2(76). С. 66–72. DOI: 10.55956/YKET2568

13. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Мошонкин А. М. Определение оптимальных конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетками в торцевых поверхностях // Агроинженерия. 2023. Том. 25. № 5. С. 17–22. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-17-22

14. Ханин С. И., Воронов В. П., Кикин Н. О., Мордовская О. С. Определение времени подготовки смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными цилиндрическими стержневыми элементами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 17-2. С. 265–272. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-17-265-272

15. Шенцова Е. С., Панин И. Г., Гречишников В. В., Панин А. И. Оценка погрешностей содержания питательных и биологически активных веществ в комбикормовой продукции // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 4(66). С. 109–115. EDN: VKDSTD

16. Садов В. В., Сорокин С. А. Интенсификация процесса смешивания комбикормов в вертикальном шнековом смесителе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 4(222). С. 86–92. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92

17. Кикин Н. О. Возможности повышения интенсификации процесса смешивания в смесителях с горизонтальным расположением валов // Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. Т. 5. С. 13–17. DOI: 10.26160/2618-6810-2022-5

18. Рыбалкин Н. А., Лебедев А. Т., Павлюк Р. В. Совершенствование процесса смешивания кормов в лопастном смесителе // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. № 3(27). С. 78–84. EDN: TMTSCMM

19. Цвяк А. В., Фролов Д. В., Ганин Е. В. Оптимизация параметров процесса смешивания компонентов комбикормов в вертикальном измельчителе-смесителе // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2011. № 2(30). С. 64–65. EDN: NUUKRT
20. Карташов С. Г., Клычев Е. М. Исследование импульсного ввода жидких добавок в смеситель // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 2(27). С. 294–299. EDN: YASXSP
21. Lozhkina E.B., Vedishchev S.M., Lozhkin V.S. Classification of dry feed mixers // The World of Science without Borders: Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) for young researchers, Tambov, April 21, 2023. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO «Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet», 2023. Pp. 97–99.
22. Шахов В. А., Белов А. Г., Соловьев С. А. и др. Построение математической модели процесса смешивания компонентов комбикормов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 4(78). С. 140–143. EDN: RBEKYP
23. Бородулин Д. М., Комаров С. С. Определение сглаживающей способности барабанного смесителя непрерывного действия с регулируемыми лопастями // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 4(31). С. 107–112. EDN: RNIÉPR
24. Солонищников П. Н. Исследование непрерывного режима смешивания кормовых компонентов в смесительной установке // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88. № 4. С. 71–76. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-71-76
25. Ляшенко В. С. Обзор и анализ смесителей сыпучих кормов // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2015. № 2(18). С. 56–60. EDN: TVRXMR
26. Кормановский Л. П., Тищенко М. А. Механико-технологические основы точных технологий приготовления и раздачи кормосмесей крупному рогатому скоту многофункциональными агрегатами. М.: Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства, 2002. 344 с.
27. Лозовой Н. М., Радинская Л. И., Лозовая С. Ю. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента неоднородности смеси от технологических параметров в смесителе с изменяющейся рабочей камерой // Техника и технология транспорта. 2019. № S(13). С. 33. EDN: WNDLRW
28. Алексеев В. А., Григорьев А. О., Артемьев В. С. Модернизация электроприводов с реверсом поля для производственных механизмов АПК // Рациональное природопользование и социально-экономическое развитие сельских территорий как основа эффективного функционирования АПК региона: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию со дня рождения заслуженного работника сельского хозяйства Российской Федерации, почетного гражданина Чувашской Республики Айдака Аркадия Павловича, Чебоксары, 02 июня 2017 года. Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2017. С. 63–67. EDN: ZFQOOF
29. Мокрова Н. В., Григорьев А. О., Артемьев В. С. Синтез финитного управления в агропромышленном комплексе в условиях импульсных нагрузок // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2024. № 3(30). С. 189–197. DOI: 10.48612/vch/3t59-rm1b-2mte

REFERENCES

1. Ovechkina L.Yu., Buzoverov S.Yu., Lobanov V.I. Improving the efficiency of the feed mixing process by upgrading the mixer working body. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021. Vol. 4-1(55). Pp. 75–78. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78. (In Russian)
2. Mamedov G.B., Kamran T.F. Experimental feed mixer performance study. *Agrarian Science*. 2021. No. 2. Pp. 90–93. DOI: 10.32634/10.32634/0869-8155-2021-345-2-90-93. (In Russian)

3. Savinykh P.A., Aleshkin A.V., Turubanov N.V., Zyryanov D.A. Determination of rational parameters of a mixer by theoretical studies of the interaction of the screw surface of a screw with the material. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021. No. 1(41). Pp. 76–84. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-76. (In Russian)
4. Konovalov V.V., Borovikov I.A., Gusev S.V., Teryushkov V.P. Results of experimental studies of a compound feed mixer [Compound feed mixer with a combined working element of periodic action]. *Vestnik of the Moscow State Agroengineering University*. 2006. Issue 3. Pp. 78–79. (In Russian)
5. Konovalov V.V., Gusev S.V., Teryushkov V.P., Borovikov I.A. Justification of the parameters of a compound feed mixer of periodic action. *Scientific Works of the All-Russian Research Institute of Animal Husbandry*. 2006. Vol. 16. No. 3. Pp. 47–52. (In Russian)
6. Savinykh P.A., Turubanov N.V., Isupov A.Yu. Determination of optimal technological parameters of a horizontal mixer of loose compound feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024. Vol. 25. No. 2. Pp. 293–300. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.293-300. (In Russian)
7. Globin A.N., Glazkov D.Yu., Lipkovich I.E. et al. Theoretical studies of the process of mixing feed with a centrifugal mixer. *AgroEcoInfo*. 2024. No. 5(65). Art.id:20. DOI: 10.51419/202145504. (In Russian)
8. Matyushev V.V., Bochkarev A.N., Semenov A.V., Chaplygina I.A. Study of operating modes of a centrifugal mixer for bulk components. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2021. No. 4(44). Pp. 206–214. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_4_206. (In Russian)
9. Ostrikov A.N., Sukharev A.I. Mixing of compound feed components in a two-shaft paddle mixer. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2002. No. 2-3. Pp. 53–55. (In Russian)
10. Protsenko A.M., Denisenko E.A. Improvement of working bodies in horizontal mixers. *Education. Science. Production: Collection of Reports of the XV International Youth Forum*. Belgorod: Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 2023. Pp. 104–109. (In Russian)
11. Nikolaev V.N., Zyazev E.V. Results of studies of the process of mixing bulk feed in an aerodynamic mixer. *Agro-industrial Complex of Russia*. 2022. Vol. 29. No. 3. Pp. 331–335. DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-3-331-335. (In Russian)
12. Dzhingilbaev S.S., Silin V.A. Experimental substantiation of the optimal values of the inclination angle and rotation frequency of the screws of a horizontal screw mixer. *Mechanics and Technology*. 2022. No. 2(76). Pp. 66–72. DOI: 10.55956/YKET2568. (In Russian)
13. Savinykh P.A., Turubanov N.V., Moshonkin A.M. Determination of the optimal design and technological parameters of a hammer crusher with sieves in the end surfaces. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. No. 5. Pp. 17–22. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-17-22. (In Russian)
14. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S. Determining the mixture preparation time in a horizontal paddle mixer with installed cylindrical rod elements. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2022. No. 17-2. Pp. 265–272. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-17-265-272. (In Russian)
15. Shentsova E.S., Panin I.G., Grechishnikov V.V., Panin A.I. Evaluation of errors of nutrients and bioactive substances in animal feed production. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015. No. 4(66). Pp. 109–115. EDN: VKDSTD. (In Russian)
16. Sadov V.V., Sorokin S.A. Intensification of compound feed mixing process in a vertical screw mixer. *Vestnik of the Altai State Agrarian University*. 2023. No. 4(222). Pp. 86–92. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92. (In Russian)
17. Kikin N.O. Possibilities of increasing the intensification of the mixing process in mixers with horizontal shafts. *Mechanical Engineering: Innovative Aspects of Development: Materials of The International Scientific and Practical Conf. St. Petersburg*, 2022. Vol. 5. Pp. 13–17. DOI: 10.26160/2618-6810-2022-5. (In Russian)

18. Rybalkin N.A., Lebedev A.T., Pavlyuk R.V. Improving the feed mixing process in a paddle mixer. *Innovations in Agrocultural Complex: Problems and Prospects*. 2020. No. 3(27). Pp. 78–84. EDN: TMTMM. (In Russian)
19. Tsvyak A.V., Frolov D.V., Ganin E.V. Parameters optimization of the process of fodder components mixing in the vertical crusher-mixer. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2011. No. 2(30). Pp. 64–65. EDN: NUUKRT. (In Russian)
20. Kartashov S.G., Klychev E.M. Investigation of pulsed liquid injection additives to the mixer. *Innovations in Agriculture*. 2018. No. 2(27). Pp. 294–299. EDN: YASXSP. (In Russian)
21. Lozhkina E.B., Vedishchev S.M., Lozhkin V.S. Classification of dry feed mixers. *The World of Science without Borders: Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation) for Young Researchers, Tambov, April*. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO 'Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet', 2023. Pp. 97–99.
22. Shakhov V.A., Belov A.G., Soloviev S.A. et al. Construction of mathematical model of the process of mixing compound feed components. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2019. No. 4(78). Pp. 140–143. EDN: RBEKYP. (In Russian)
23. Borodulin D.M., Komarov S.S. Smoothing ability of a continuous action drum mixer with adjustable blades. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2013. No. 4(31). Pp. 107–112. EDN: RNIEPR. (In Russian)
24. Solonshchikov P.N. Study of the continuous mode of mixing feed components in a mixing unit. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021. Vol. 88. No. 4. Pp. 71–76. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-71-76. (In Russian)
25. Lyashenko V.S. Review and analysis of mixers bulk feed. *Vestnik Omsk State Agrarian University*. 2015. No. 2(18). Pp. 56–60. EDN: TVRXMR. (In Russian)
26. Kormanovsky L.P., Tishchenko M.A. *Mekhaniko-tekhnologicheskiye osnovy tochnykh tekhnologiy prigotovleniya i razdachi kormosmesey krupnomu rogamu skotu mnogofunktsional'nykh agregatami* [Mechanical and technological foundations of precision technologies for the preparation and distribution of feed mixtures to cattle by multifunctional units]. Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy i proyektno-tekhnologicheskii institut mekhanizatsii i elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva, 2002. 344 p. (In Russian).
27. Lozovoy N.M., Radinskaya L.I., Lozovaya S.Yu. Experimental studies of the dependence of the mixture heterogeneity coefficient on the process parameters in a mixer with a variable working chamber. *Transport Engineering and Technology*. 2019. No. S(13). P. 33. EDN: WNDLRW. (In Russian)
28. Alekseev V.A., Grigoriev A.O., Artemyev V.S. Modernization of electric drives with field reversal for production mechanisms of the agro-industrial complex. Rational nature management and socio-economic development of rural areas as the basis for the effective functioning of the agro-industrial complex of the region: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 80th Anniversary of the Birth of Honored Worker of Agriculture of the RF, Honorary Citizen of the Chuvash Republic Arkady Pavlovich Aidak, Cheboksary, June 2, 2017*. Cheboksary: Chuvashskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya, 2017. Pp. 63–67. EDN: ZFQOOF. (In Russian)
29. Mokrova N.V., Grigoriev A.O., Artemyev V.S. Synthesis of finite control in the agro-industrial complex under pulsed loads. *Vestnik Chuvash State Agrarian University*. 2024. No. 3(30). Pp. 189–197. DOI: 10.48612/vch/3t59-rm1b-2mte. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Трамова А. М. – формирование общей идеи исследования, постановка задач, оценка практической значимости результатов и участие в формулировке выводов;

Мокрова Н. В. – руководство исследованием, методология, доработка рукописи и ее редактирование;

Артемьев В. С. – проведение исследования, формальный анализ, программное обеспечение, верификация данных, визуализация, представление результатов в научно обоснованной форме.

Contribution of the authors:

Tramova A.M. – conceptualization, methodology, formal analysis, writing – review and editing;

Mokrova N.V. – research supervision, methodology, manuscript revision and editing;

Artemyev V.S. – investigation, formal analysis, software, data curation, visualization, writing – original draft.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Трамова Азиза Мухамадияевна, д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

TramovaAM@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4089-6580>, SPIN-код: 8583-3592

Мокрова Наталия Владиславовна, д-р техн. наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС;

119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1;

кафедра информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

nvmokrova@misis.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8444-2935>, SPIN-код: 5157-9790

Артемьев Виктор Степанович, ст. преподаватель, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-код: 8912-5825

Information about the authors

Aziza M. Tramova, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

TramovaAM@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4089-6580>, SPIN-code: 8583-3592

Nataliya V. Mokrova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National University of Science and Technology MISIS;

4, Leninsky prospekt, building1, Moscow, 119049, Russia;

Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

nvmokrova@misis.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8444-2935>, SPIN-code: 5157-9790

Viktor S. Artemyev, Senior Lecturer, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-code: 8912-5825

УДК 681.518

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-122-131>

 ENKXHE

Архитектура и методы построения интеллектуальной системы мониторинга центра оператора безопасности

В. Р. Иксанов[✉], С. В. Дараган

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

Аннотация. В современном мире информационные технологии играют ключевую роль в автоматизации процессов, особенно в научных центрах. Разработка архитектуры и методов для автоматизированных систем позволяет повысить эффективность обработки данных, моделирования и управления в областях информатики и телекоммуникаций. Однако существующие подходы часто не учитывают региональные особенности.

Цель исследования – разработка архитектуры и методов для автоматизированных систем, ориентированных на обработку информации в реальном времени, с учетом специфики научных исследований.

Материалы и методы исследования. Использованы методы системного анализа, компьютерного моделирования (с применением Python и MathType для формул), анализ литературы по специальностям 2.3.8. Материалы включают данные из открытых источников, эксперименты с моделями на базе 100+ тестовых наборов.

Результаты. Предложена новая архитектура системы с модулями для обработки данных, включающая алгоритмы оптимизации (снижение времени на 30 %). Разработаны методы автоматизации, включая формулы для расчета эффективности. Тестирование показало улучшение точности на 25 %.

Выводы. Предложенная архитектура и методы могут быть применены в научных центрах для повышения производительности. Рекомендуется дальнейшее тестирование в реальных условиях.

Ключевые слова: центр мониторинга, оператор безопасности, интеллектуальная система мониторинга, архитектура микросервисов, событийно-управляемая архитектура, потоковая обработка, корреляция событий

Поступила 18.02.2026, одобрена после рецензирования 15.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Иксанов В. Р., Дараган С. В. Архитектура и методы построения интеллектуальной системы мониторинга центра оператора безопасности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 122–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-122-131



Architecture and methods for building an intelligent monitoring system for operator safety centers

V.R. Iksanov[✉], S.V. Daragan

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

Abstract. Currently, information technologies are fundamental to process automation, particularly within scientific and research centers. Developing architectures and methods for automated systems allows for increasing the efficiency of data processing, modeling, and management in informatics and telecommunications.

Aim. To develop the architecture and methods for automated systems centered on real-time information processing, considering the specific nature of scientific research.

Materials and methods. The study employs system analysis, computer modeling in Python, and a comprehensive literature review aligned with specialty 2.3.8, utilizing MathType for formula representation. The research materials consist of open-source data and experimental modeling results derived from over 100 test datasets.

Results. A new system architecture with specialized data processing modules is proposed, featuring optimization algorithms that reduce processing time by 30%. Methods of automation have been developed, incorporating analytical expressions for efficiency calculation. Experimental testing showed a 25 % increase in system accuracy.

Conclusions. The proposed architecture and methods are applicable to scientific centers to optimize system performance. Future empirical testing under real-world conditions is recommended.

Keywords: monitoring center, security operator, intelligent monitoring system, microservices architecture, event-driven architecture, streaming processing, event correlation

Submitted 18.02.2026,

approved after reviewing 15.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Iksanov V.R., Daragan S.V. Architecture and methods for building an intelligent monitoring system for operator safety centers. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 122–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-122-131

ВВЕДЕНИЕ

Развитие цифровой инфраструктуры и усложнение технологических систем сопровождаются значительным ростом объемов данных, поступающих в центры операторов безопасности. Одновременно возрастает количество потенциальных угроз, а процессы обеспечения безопасности требуют высокой степени автоматизации, адаптивности и интеллектуальной поддержки принятия решений. Становится необходимым переход от фрагментарных систем наблюдения к комплексным интеллектуальным решениям, способным анализировать многомерные потоки событий в реальном времени и обеспечивать целостное восприятие ситуации [1].

Проблематика мониторинга в центрах операторов безопасности выходит за рамки традиционных инструментов управления инцидентами. Современные системы должны объединять данные из гетерогенных источников, технических средств охраны, сетевых сенсоров, средств контроля доступа, видеонаблюдения, коммуникационного оборудования и



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

программных комплексов защиты информации. Подобное объединение требует архитектуры, обеспечивающей семантическую совместимость данных, масштабируемость и возможность оперативного внедрения новых аналитических модулей. Центральное значение приобретает использование технологий потоковой аналитики, машинного обучения и событийно-управляемых механизмов, позволяющих выявлять скрытые взаимосвязи и отклонения, не поддающиеся детектированию статическими правилами.

Научный интерес к теме интеллектуальных систем мониторинга отражает стремление перейти от регламентных методов обработки событий к контекстно-зависимому анализу и предиктивной оценке рисков. Сегодня немалое количество исследований в области SIEM- и SOAR-платформ, остаются нерешенными задачи разнотипных источников информации, унификации моделей данных и построения адаптивных архитектур, сохраняющих устойчивость при увеличении нагрузки и динамике изменений [2–3]. Недостаточная гибкость существующих решений снижает точность и скорость реакции операторов, затрудняя комплексную оценку состояния безопасности объектов.

Цель исследования является разработка архитектуры и методов для автоматизированных систем, ориентированных на обработку информации в реальном времени, с учетом специфики научных исследований.

Актуальность разработки интеллектуальной системы мониторинга определяется необходимостью повышения эффективности анализа событий и снижения когнитивной нагрузки на персонал [4]. В предлагаемом подходе внимание сосредоточено на формировании архитектурных принципов и методических решений, обеспечивающих интеллектуализацию процессов наблюдения и реагирования. Использование микросервисной и событийно-управляемой архитектуры, онтологического представления данных и гибридных алгоритмов анализа аномалий создает основу для динамической адаптации системы к текущим условиям и контексту угроз [5–7]. Практическая направленность исследования проявляется в возможности применения разработанных решений при проектировании и модернизации центров операторов безопасности на объектах критической инфраструктуры, в корпоративных и государственных системах управления.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования опираются на формальные, математические и алгоритмические основы построения интеллектуальной системы мониторинга, обеспечивающей обработку потоков событий, их корреляцию и интеллектуальный анализ в реальном времени. Исследование базируется на формализации процессов мониторинга посредством создания математической модели, описывающей взаимодействие источников данных, событийных потоков и аналитических модулей в едином информационном пространстве [8].

Информационные потоки моделируются как упорядоченные множества событий:

$$E = \{e_i = \langle t_i, s_i, a_i, x_i \rangle\}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где t_i – временная метка события, s_i – источник возникновения, a_i – тип события, x_i – вектор параметров и признаков. Поток E рассматривается как стохастический процесс с интенсивностью $\lambda(t)$, зависящей от класса наблюдаемых объектов. События агрегируются во временные окна Δt , внутри которых вычисляются статистические оценки характеристик потоков.

Для формального описания связей между объектами мониторинга и инцидентами используется ориентированный граф $G = (V, R)$, где V – множество узлов, соответствующих объектам, сенсорам и программным компонентам, а R – множество ориентированных ребер, отражающих причинно-следственные и топологические зависимости.

Функция состояния системы безопасности описывается вектором $Z(t)$, где каждый элемент характеризует уровень активности, риска или состояния подсистемы. Изменение состояния под воздействием событий описывается оператором перехода F , реализующим детектирование аномалий и оценку рисков [9–10].

Анализ аномальных отклонений производится с использованием вероятностных и обучаемых моделей. Показатель аномальности определяется как $A(e_i) = -\log p(\varphi(e_i))$, где $p(x)$ – плотность распределения признаков нормального состояния. В случае высокой размерности данных используются автоэнкодеры, минимизирующие ошибку реконструкции.

Корреляция событий реализуется через анализ временных зависимостей и графовых связей. Инцидент формируется как подграф, удовлетворяющий условию плотности $\delta(I) \geq \delta_{min}$. Приоритизация инцидентов выполняется по интегральной функции риска $Risk(I) = P(I) \cdot Impact(I) \cdot \alpha$.

Алгоритмическая реализация модели включает процедуры нормализации данных, извлечения признаков, временной агрегации, оценки вероятностей и построения корреляционных связей. Поточковая обработка реализуется в архитектуре с асинхронными каналами передачи сообщений, что обеспечивает гарантированную доставку и идемпотентность обработки. Для верификации методов используется имитационное моделирование с применением синтетических и реальных потоков телеметрии.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Предлагаемая архитектура системы реализует многоуровневый алгоритм оптимизации обработки данных, направленный на снижение времени реакции на инциденты и повышение точности их классификации.

Информационная модель оптимизации

Процесс оптимизированной обработки данных описывается тройкой

$$\Omega = \langle E, M, R \rangle,$$

где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ – входной поток событий; $M = \{N, A, C, P\}$ – множество аналитических модулей (нормализация N , детектирование аномалий A , корреляция C , приоритизация P); $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ – множество формируемых инцидентов с оценкой риска.

Целевая функция оптимизации направлена на минимизацию времени обработки инцидента при сохранении заданного уровня точности классификации:

$$T_{opt} = \min \{ \sum_i w(e_i) \cdot \delta(e_i) / \lambda(t) \} \text{ при условии } Accuracy \geq Accuracy_{min},$$

где $w(e_i)$ – вес приоритета события, $\delta(e_i)$ – время обработки одного события, $\lambda(t)$ – интенсивность входного потока, $Accuracy_{min}$ – нижняя граница допустимой точности классификации.

Оптимизация достигается за счет параллельной асинхронной обработки потоков событий в скользящих временных окнах Δt и применения механизма динамической балансировки нагрузки между аналитическими модулями.

Алгоритм оптимизации обработки данных

Алгоритм оптимизированной обработки событий реализует последовательность из шести операционных этапов, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Структура алгоритма оптимизации обработки данных**Table 1.** Framework of the data processing optimization algorithm

Шаг	Наименование этапа	Входные данные	Выходные данные	Операция
1	Предобработка	Поток e_i	e'_i (нормализованное)	Нормализация, дедупликация, верификация t_i
2	Извлечение признаков	e'_i	$\varphi(e_i) = (t_i, s_i, a_i, x_i)$	Формирование вектора признаков
3	Детектирование аномалий	$\varphi(e_i)$	$A(e_i)$, флаг подозрительности	$A(e_i) = -\log p(\varphi(e_i))$, сравнение с θ
4	Корреляция событий	Подозрительные $\{e_{ij}\}$, граф G	Инциденты I_j	Формирование подграфа, проверка $\delta(I) \geq \delta_{min}$
5	Приоритизация	Инцидент I_j	$Risk(I_j)$, очередь	$Risk(I) = P(I) \cdot Impact(I) \cdot \alpha$
6	Адаптация модели	Результаты обработки	Обновленные $\theta, p(x)$	Обратная связь, обновление параметров

Ниже приводится детализированное описание каждого этапа.

Этап 1. Предобработка (нормализация). Входной поток e_i приводится к единому семантическому формату: выполняются временное выравнивание (устранение смещений часовых поясов), дедупликация повторяющихся событий в пределах временного окна Δt , а также верификация полноты обязательных полей вектора признаков. Неполные записи либо дополняются по умолчанию, либо маркируются флагом низкого доверия.

Этап 2. Извлечение признаков. Для каждого нормализованного события формируется вектор признаков $\varphi(e_i) = (t_i, s_i, a_i, x_i)$, где t_i – временная метка, s_i – идентификатор источника, a_i – категория события, x_i – числовой вектор телеметрических параметров. При необходимости применяется метод главных компонент (РСА) для снижения размерности x_i .

Этап 3. Детектирование аномалий. Для каждого события вычисляется оценка аномальности $A(e_i) = -\log p(\varphi(e_i))$, где $p(x)$ аппроксимируется смесью гауссовых распределений или автоэнкодером. Если $A(e_i) > \theta$ (порог, настраиваемый адаптивно по скользящему среднему за период T_{adapt}), событие помечается как подозрительное и передается на этап корреляции.

Этап 4. Корреляция событий. Подозрительные события объединяются с использованием структуры графа $G = (V, R)$. Формирование инцидента I_j выполняется при выполнении условия плотности графового подкластера: $\delta(I) = |R_I| / (|V_I| \cdot (|V_I| - 1)) \geq \delta_{min}$. Временное окно корреляции ограничено параметром Δt_{corr} , что исключает формирование ложных причинно-следственных связей между разновременными событиями.

Этап 5. Приоритизация. Для каждого сформированного инцидента вычисляется интегральный показатель риска $Risk(I_j) = P(I_j) \cdot Impact(I_j) \cdot \alpha$, где P – вероятность угрозы по модели аномальности, $Impact$ – оценка потенциального ущерба по классификатору критичности, α – коэффициент, задаваемый политикой безопасности. Инциденты ранжируются и помещаются в приоритетную очередь операторов.

Этап 6. Адаптация модели. По результатам обработки инцидентов (подтвержденным операторами) обновляются параметры модели нормального поведения (веса

компонент смеси гауссовых распределений, пороги θ). Реализуется замкнутый цикл обратной связи, обеспечивающий снижение доли ложных срабатываний при изменении профиля угроз.

Показатели эффективности алгоритма

Тестирование алгоритма на выборке из 100+ тестовых наборов событий в условиях имитационного моделирования с синтетическими и реальными потоками телеметрии показало следующие результаты:

- снижение среднего времени обработки одного инцидента на 30 % относительно базового варианта без оптимизационных процедур;
- повышение точности классификации инцидентов на 25 % за счет применения гибридной модели аномальности;
- сокращение доли ложных срабатываний с 10–15 % до 4–6 % благодаря адаптивной корректировке порогов обнаружения;
- сокращение среднего времени реакции оператора с ≈ 25 –30 мин. до ≤ 10 мин. за счет автоматической приоритизации очереди инцидентов.

Таким образом, предложенное алгоритмическое обеспечение формализует операционную последовательность оптимизации обработки данных в виде информационной модели с четко определенными входами, выходами и математическими операторами на каждом этапе, что подтверждает практическую значимость разработанного подхода с точки зрения методологии и технологии реализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Архитектура интеллектуальной системы мониторинга центра оператора безопасности рассматривается как многоуровневая адаптивная структура, обеспечивающая динамическое равновесие между аналитическими процессами, управлением событиями и когнитивной самообучаемостью. Система функционирует в непрерывном цикле восприятия, интерпретации и реакции, где информационные потоки образуют замкнутую цепь с обратными связями.

Ключевым элементом является формальная математическая модель функционирования, описывающая взаимосвязь между наблюдаемыми событиями, состоянием инфраструктуры и реакцией системы. Поток событий $E(t)$ аппроксимируется стационарным стохастическим процессом с интенсивностью $\lambda(t)$. Динамика состояния центра оператора определяется функцией перехода F , отражающей нелинейную зависимость между интенсивностью событий и устойчивостью системы [11].

Для описания аналитического цикла введен функциональный оператор $\Phi = C \circ A \circ N$, где N – нормализация потоков данных, A – оценка отклонений от эталонного распределения, C – корреляционно-семантический анализ. Обобщенный алгоритм системы представляет собой композицию функционалов, реализующих когнитивное преобразование информационного пространства [12].

Представленная структура отражает рекурсивность системы, а результаты анализа формируют управляющие решения, которые изменяют параметры самой модели, влияя на следующий цикл обработки. Для объективной оценки эффективности предложенной архитектуры проведено сопоставление ее характеристик с существующими решениями класса SIEM и IDS/IPS. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика предложенной архитектуры с традиционными системами мониторинга

Table 2. Comparative characteristics of the proposed architecture vs. traditional monitoring systems

Показатель	Традиционные SIEM-системы	Предлагаемая интеллектуальная система
Тип анализа	Правил-based, статичный	Гибридный, адаптивный, вероятностный
Обработка потоков	Пакетная	Потоковая
Корреляция событий	По сигнатурам	По графовым связям и контекстам
Реакция на инциденты	Ручная	Автоматизированная SOAR
Обратная связь	Отсутствует	Непрерывная самообучающаяся
Адаптация к изменению инфраструктуры	Минимальная	Автоматическая
Среднее время реакции	≈ 25–30 мин	≤ 10 мин
Ложные срабатывания	10–15 %	4–6 %
Информационная когерентность инцидента	Фрагментарная	Комплексная, контекстная

Анализ показывает, что интеллектуальная архитектура демонстрирует не только количественное улучшение по основным метрикам, но и качественное изменение характера обработки информации: система переходит от реактивного контроля к проактивному управлению, где механизм адаптивного моделирования формирует прогноз угроз и оптимизирует стратегию реагирования [13–14]. Сравнительные показатели подтверждают функциональную состоятельность предложенного решения как системы с признаками когнитивного интеллекта, способной к восприятию, анализу, синтезу и самокоррекции в контексте комплексной безопасности распределенной инфраструктуры.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило эффективность разработанной архитектуры и методов построения интеллектуальной системы мониторинга центра оператора безопасности. Предложенное модульное решение на основе микросервисной и событийно-управляемой архитектуры обеспечивает интеграцию разнородных источников данных, потоковую обработку событий и адаптивную корреляцию инцидентов в реальном времени.

Формализованная математическая модель системы, включающая операторы нормализации, аномализации и корреляции, позволила обосновать принципы интеллектуализации процессов наблюдения и разработать алгоритмическое обеспечение оптимизации обработки данных. Пошаговая структура алгоритма с четко определенными этапами предобработки, извлечения признаков, детектирования аномалий, корреляции и приоритизации обеспечивает воспроизводимость и технологическую обоснованность предложенных решений.

Сравнительный анализ с традиционными SIEM-системами подтвердил преимущества предлагаемой архитектуры по ключевым показателям: снижение времени реакции на

30 %, повышение точности классификации на 25 %, сокращение доли ложных срабатываний с 10–15 % до 4–6 %. Применение механизма непрерывной адаптации модели обеспечивает устойчивость системы к изменению профиля угроз.

Практическая значимость результатов подтверждается возможностью их применения при проектировании и модернизации центров операторов безопасности на объектах критической инфраструктуры. Направлениями дальнейших исследований являются расширение тестовой базы в реальных условиях эксплуатации и интеграция федеративных механизмов обучения для распределенных инсталляций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоженов В. А., Романова Т. Н. Математические методы оптимизации распределенных вычислений в гетерогенной среде // *International Journal of Open Information Technologies*. 2025. Т. 13. № 1. С. 31–39. EDN: SCIWLQ
2. Уманский Д. М. Предсказание ошибок в производственном оборудовании используя машинное обучение // *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2025. Т. 10. № 1(51). С. 145–151. EDN: MVBAUT
3. Липатов К. В., Потапченко Т. Д. Анализ особенностей поддержки принятия торговых решений на биржах с использованием перспективных направлений искусственного интеллекта // *Cifra. Компьютерные науки и информатика*. 2025. № 1(5). DOI: 10.60797/COMP.2025.5.4
4. Камбаров А. М., Ковтун С. А., Суркова Е. В. Методический подход к комплексному развитию высокотехнологичных предприятий в условиях цифровой трансформации предприятий // *СТИН*. 2025. № 1. С. 30–34. EDN: CHXLOD
5. Болатов С. А. Искусственный интеллект: улучшение UX-дизайна через персонализацию и прогнозирование поведения пользователей // *Актуальные исследования*. 2025. № 4-1(239). С. 32–40. DOI: 10.5281/2enodo.14750798
6. Шарнин М. М., Сомин Н. В. Применение методов обработки естественного языка в области языковых моделей белков: текущие и будущие тенденции // *Cifra. Компьютерные науки и информатика*. 2025. № 1(5). DOI: 10.60797/COMP.2025.5.1
7. Журавлев Д. В., Голубинский А. Н., Резниченко А. А. Универсальный программно-аппаратный комплекс для управления роботизированными устройствами на основе принципов работы синхронного или асинхронного интерфейсов «мозг-компьютер» // *Журнал радиоэлектроники*. 2025. № 1. DOI: 10.30898/1684-1719.2025.1.1
8. Храменков В. А., Дмитричев А. С., Некоркин В. И. Мультистабильность синхронных режимов в многомашинной энергосети с общей нагрузкой и их устойчивость в целом и в большом // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2025. Т. 33. № 1. С. 38–68. DOI: 10.18500/0869-6632-003128
9. Иванов А. В., Селифанов В. В., Огнев И. А. Некоторые вопросы оценки доверия к субъектам информационного обмена // *Защита информации. Инсайд*. 2025. № 1(121). С. 34–40. EDN: AUYSCT
10. Бойко А. П., Шевченко А. А., Кузин П. И. Модель оптической транспортной сети специального назначения в условиях деструктивных воздействий // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2025. Т. 22. № 1(247). С. 42–50. DOI: 10.14489/vkit.2025.01.pp.042-050
11. Рубцов Д. Ю. Математические модели и программный комплекс для интеллектуального анализа и прогнозирования исполнения государственных контрактов // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025. Т. 13. № 1(48). DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.010

12. Артемьев В. С., Мокрова Н. В. Применение метода моментов для оптимизации электрофизических воздействий // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3(71). С. 228–236. DOI: 10.18286/1816-4501-2025-3-228-236

13. Tramova A.M., Popov A.A., Artemyev V.S., Mokrova N.V. Algebraic methods of automatic optimization and formal verification of parallel algorithms // Computational Mathematics and Modeling. 2025. DOI: 10.1007/s10598-025-09651-x

REFERENCES

1. Novozhenov V.A., Romanova T.N. Mathematical methods for optimizing of distributed computing in a heterogeneous environment. *International Journal of Open Information Technologies*. 2025. Vol. 13. No. 1. Pp. 31–39. EDN: SCIWLQ. (In Russian)

2. Umansky D.M. Predicting errors in production equipment using machine learning. *International Journal of Information Technology and Energy Efficiency*. 2025. Vol. 10. No. 1(51). Pp. 145–151. EDN: MVBAUT. (In Russian)

3. Lipatov K.V., Potapchenko T.D. Analysis of the specifics of support for trade decision-making on stock exchanges using promising areas of artificial intelligence. *Cifra. Computer Science and Informatics*. 2025. No. 1(5). DOI: 10.60797/COMP.2025.5.4. (In Russian)

4. Kambarov A.M., Kovtun S.A., Surkova E.V. Methodological approach to the integrated development of high-tech enterprises in the context of digital transformation of enterprises. *STIN*. 2025. No. 1. Pp. 30–34. EDN: CHXLOD. (In Russian)

5. Bolatov S.A. Artificial intelligence: improving UX design through personalization and predicting user behavior. *Actual Research*. 2025. No. 4-1(239). Pp. 32–40. DOI: 10.5281/zenodo.14750798. (In Russian)

6. Sharnin M.M., Somin N.V. Application of natural language processing techniques in the field of protein linguistic models: current and future tendencies. *Cifra. Computer Science and Information Technology*. 2025. No. 1(5). DOI: 10.60797/COMP.2025.5.1. (In Russian)

7. Zhuravlev D.V., Golubinsky A.N., Reznichenko A.A. An universal hardware and software complex for controlling robotic devices based on the principles of operation of synchronous or asynchronous brain-computer interfaces. *Journal of Radio Electronics*. 2025. No. 1. DOI: 10.30898/1684-1719.2025.1.1. (In Russian)

8. Khramenkov V.A., Dmitrichev A.S., Nekorkin V.I. Multistability of synchronous modes in a multimachine power grid with a common load and their global and non-local stability. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2025. Vol. 33. No. 1. Pp. 38–68. DOI: 10.18500/0869-6632-003128. (In Russian)

9. Ivanov A.V., Selifanov V.V., Ognev I.A. Some issues of assessing trust in information exchange subjects. *Information Security. Inside*. 2025. No. 1(121). Pp. 34–40. EDN: AUYCFT. (In Russian)

10. Boyko A.P., Shevchenko A.A., Kuzin P.I. Model of a special-purpose optical transport network under destructive impacts. *Vestnik Kompiuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii*. 2025. Vol. 22. No. 1(247). Pp. 42–50. DOI: 10.14489/vkit.2025.01.pp.042-050. (In Russian)

11. Rubtsov D.Yu. Mathematical models and software package for intelligent analysis and forecasting of government contract execution. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025. Vol. 13. No. 1(48). DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.010. (In Russian)

12. Artemyev V.S., Mokrova N.V. Application of the method of moments to optimize electrophysical effects. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2025. No. 3(71). Pp. 228–236. DOI: 10.18286/1816-4501-2025-3-228-236. (In Russian)

13. Tramova A.M., Popov A.A., Artemyev V.S., Mokrova N.V. Algebraic methods of automatic optimization and formal verification of parallel algorithms. *Computational Mathematics and Modeling*. 2025. DOI: 10.1007/s10598-025-09651-x

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

Иксанов Владислав Рашидович, ст. преподаватель, кафедра информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

vlad-iksanov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7810-3720>, SPIN-код: 6750-3298

Дараган Светлана Валерьевна, ст. преподаватель, кафедра информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

daragan.sv@rea.ru, SPIN-код: 6731-1884

Information about the authors

Vladislav R. Iksanov, Senior Lecturer, Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

vlad-iksanov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7810-3720>, SPIN-code: 6750-3298

Svetlana V. Daragan, Senior Lecturer, Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

daragan.sv@rea.ru, SPIN-code: 6731-1884

УДК 633.47

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-132-142>

 ФРАКМР

Влияние нормы высева и экспозиции склона на продуктивность гибрида кукурузы Шихан в условиях Бугульмино-Белебеевской возвышенности

Б. Г. Ахияров[✉], Г. Р. Абдулвалеева, Р. Р. Абдулвалеев,
Л. М. Ахиярова, Б. Х. Газизов

Башкирский государственный аграрный университет
450001, Россия, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34

Аннотация. В статье представлены результаты трехлетних исследований (2023–2025 гг.) по оценке влияния нормы высева (65, 70, 75, 80, 85 и 90 тыс. шт./га) и экспозиции склона (выровненный участок, верхняя, средняя и нижняя части) на продуктивность и качество зерна гибрида кукурузы Шихан. Исследования проводились в ландшафтно-полево-севообороте на территории Альшеевского района Республики Башкортостан (Бугульмино-Белебеевская возвышенность) в рамках программы «Приоритет-2030» ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.

Установлено, что максимальная урожайность зеленой массы (45,52 т/га) и зерна (10,21 т/га) достигается при норме высева 85 тыс. шт./га на нижней части склона, что связано с аккумуляцией влаги и элементов питания. На выровненных участках и в средней части склона оптимальной является норма 80 тыс. шт./га. Дальнейшее загущение до 90 тыс. шт./га приводит к достоверному снижению продуктивности на всех элементах рельефа.

Содержание протеина и крахмала в зерне также зависит от густоты стояния и рельефа. Максимальные показатели протеина (11,0 %) и крахмала (69,0 %) отмечены при норме высева 85 тыс. шт./га в верхней части склона. Выявлена четкая закономерность снижения обоих показателей качества от верхней части поля к нижней (разница по крахмалу достигает 10,3 %).

Результаты. Исследования обосновывают необходимость применения дифференцированных норм высева с учетом рельефа: на выровненных участках и верхней части склона – 80–85 тыс. шт./га, на средних и нижних элементах – 75–80 тыс. шт./га. Такой подход позволяет повысить урожайность, улучшить качество зерна и обеспечить экономическую эффективность производства кукурузы в условиях склоновых земель Бугульмино-Белебеевской возвышенности.

Ключевые слова: кукуруза, зеленая масса, зерно, урожайность, качество, агроландшафт, склон, южная экспозиция, часть склона

Поступила 23.12.2025, одобрена после рецензирования 30.03.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Ахияров Б. Г., Абдулвалеева Г. Р., Абдулвалеев Р. Р., Ахиярова Л. М., Газизов Б. Х. Влияние нормы высева и экспозиции склона на продуктивность гибрида кукурузы Шихан в условиях Бугульмино-Белебеевской возвышенности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 132–142. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-132-142

© Ахияров Б. Г., Абдулвалеева Г. Р., Абдулвалеев Р. Р., Ахиярова Л. М., Газизов Б. Х., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Influence of seeding rate and slope aspect on the productivity of 'Shikhan' corn hybrid in the Bugulma-Belebey Upland

B.G. Akhiyarov[✉], G.R. Abdulvaleeva, R.R. Abdulvaleev,
L.M. Akhiyarova, B.Kh. Gazizov

Bashkir State Agrarian University
34, 50th Anniversary of October, Ufa, 450001, Russia

Abstract. This paper examines the results of field trials (2023–2025) on the 'Shikhan' corn hybrid, analyzing how various seeding rates (from 65.000 to 90.000 seeds/ha) and slope exposures (flatland, upper, middle, and lower positions) influence crop yield and grain characteristics. The research was carried out within a landscape-field crop rotation system in the Alsheevsky District of the Republic of Bashkortostan (Bugulma-Belebey Upland), supported by the Priority-2030 program at Bashkir State Agrarian University.

The results indicate that the maximum yields of green biomass (45,52 t/ha) and grain (10,21 t/ha) were achieved at a seeding rate of 85 thousand seeds/ha on the lower slope position, driven by enhanced moisture and nutrient accumulation. For plateaus and middle slope positions, a seeding rate of 80 thousand seeds/ha proved optimal. A further increase in seeding density to 90 thousand seeds/ha led to a significant reduction in yield across all topographical features.

Grain protein and starch contents were also influenced by planting density and topography. The maximum protein and starch contents (11,0 % and 69,0 %, respectively) were observed at a seeding rate of 85 thousand seeds/ha on the upper slope. The study revealed a clear trend of decreasing values for both quality indicators from the upper to the lower slope, with the difference in starch content reaching up to 10,3 %.

Results. These findings substantiate the necessity of site-specific seeding rates adjusted for topography: 80–85 thousand seeds/ha for plateaus and upper slope positions, and 75–80 thousand seeds/ha for middle and lower slope zones. Implementing this terrain-specific strategy maximizes yields, enhances grain quality parameters, and ensures higher profitability for corn production across the sloping lands of the Bugulma-Belebey Upland.

Keywords: corn, green mass, grain, yield, quality, agricultural landscape, slope, southern exposure, part of slope

Submitted 23.12.2025,

approved after reviewing 30.03.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Akhiyarov B.G., Abdulvaleeva G.R., Abdulvaleev R.R., Akhiyarova L.M., Gazizov B.Kh. Influence of seeding rate and slope aspect on the productivity of 'Shikhan' corn hybrid in the Bugulma-Belebey Upland. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 132–142. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-132-142

ВВЕДЕНИЕ

Бугульмино-Белебеевская возвышенность, расположенная в Приуралье, представляет собой обширную платообразную территорию на границе Республик Татарстан и Башкортостан, частично затрагивающую Самарскую и Оренбургскую области. Ее протяженность с запада на восток составляет около 400 км – от долины Камы до предгорий Урала



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

в районе г. Кумертау. Возвышенность расчленена долинами рек Белая, Дёма и Ашкадар, а ее высоты варьируют от 370 до 480 м над уровнем моря, достигая максимума в районе села Стерлибашево. Рельеф отличается выраженной холмистостью и расчлененностью, особенно в Стерлибашевско-Федоровской зоне [1, 3]. Данный рельеф формирует значительную пространственную неоднородность агроэкологических условий: различную инсоляцию в зависимости от экспозиции склонов, контрастный режим увлажнения и температурный фон. Это создает необходимость разработки и внедрения дифференцированных агротехнологий, адаптированных к локальным условиям каждого элемента рельефа [5, 6].

Актуальность исследования продуктивности гибрида кукурузы Шихан в данном регионе обусловлена:

- ключевой ролью кукурузы как высокопродуктивной кормовой и зерновой культуры, отвечающей требованиям современного рынка [5];
- потребностью в оптимизации таких управляемых факторов, как норма высева, с учетом влияния экспозиции склонов на формирование урожая и качество продукции [7, 8];
- необходимостью повышения устойчивости и экономической эффективности растениеводства в условиях разнородного рельефа возвышенности.

Таким образом, изучение взаимодействия «гибрид – норма высева – экспозиция склона» является научно обоснованным и практически значимым направлением для совершенствования системы земледелия на склоновых землях Бугульмино-Белебеевской возвышенности.

Целью данного исследования является анализ продуктивности нового гибрида кукурузы (Шихан) в зависимости от нормы высева на разных экспозициях склона. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: во-первых, исследовать влияние различных типов рельефа на продуктивность гибрида кукурузы в зависимости от нормы высева; во-вторых, определить роль экспозиции склонов в росте и развитии растений кукурузы [2, 4].

Научная новизна исследования заключается в систематическом анализе взаимосвязи между рельефом, экспозицией склонов и продуктивностью гибридов кукурузы. В отличие от предыдущих исследований данная работа фокусируется на комплексном подходе, учитывающем как микроклиматические условия, создаваемые рельефом, так и адаптивные характеристики различных гибридов кукурузы. Это позволяет предложить более точные рекомендации для практического применения в сельском хозяйстве [9].

Южные и восточные склоны демонстрируют большую освещенность и тепло, что позитивно сказывается на росте растений и повышении урожайности. Северная и западная стороны характеризуются меньшей эффективностью использования солнечного света и хуже удерживают влагу, что снижает потенциальную продуктивность растений. Характер рельефа влияет на распределение осадков и дренаж, определяя общий гидробаланс полей [10].

Полученные результаты подчеркивают важность учета рельефа и ориентации склонов при разработке агроэкологических карт и составлении планов посадочных работ. Предложенные методики могут способствовать дальнейшему развитию рациональных схем землепользования, повышению производительности и устойчивости агропроизводства в регионах с аналогичными ландшафтными особенностями. Это приобретает особую актуальность в условиях глобальных изменений климата и постоянного увеличения потребности в продуктах питания [11].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор экспериментальных площадок является ключевым этапом в планировании исследований, направленных на изучение продуктивности гибридов кукурузы. Основными критериями при выборе участков для экспериментов стали разнообразие рельефа и экспозиции склонов, что позволяет учитывать влияние этих факторов на урожайность. Участки были выбраны так, чтобы они представляли собой типичные агроландшафты с различными характеристиками рельефа – от равнинных до холмистых областей. Также учитывались климатические условия, типы почв и их плодородие, что обеспечивает репрезентативность полученных данных. Эти критерии позволяют проводить исследования в условиях, приближенных к реальным производственным ситуациям, и получать результаты, которые могут быть применены на практике. Исследования проводились в 2023–2025 гг. в ландшафтно-полевом севообороте, заложенном для изучения продуктивности кукурузы в зависимости от экологических факторов и агроландшафтных условий в Альшеевском районе Республики Башкортостан в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ программы «Приоритет-2030».

Метеорологические условия в период вегетации в 2023–2025 гг. в целом были оптимальными для роста и развития кукурузы. Климат территории – резко-континентальный, наблюдаются резкие перепады температур. Средняя температура июля $+19^{\circ}\text{C}$ и января -18°C . Сумма осадков за период вегетации составила в 2023 году – 223 мм, в 2024 году – 296 мм, в 2025 году – 315 мм. Сумма активных температур в 2023 году – 2240°C , в 2024 году – 2140°C , в 2025 году – 2075°C . Продолжительность периода положительных температур составила в 2023 году 207 дней, в 2024 году – 198 дней, в 2025 году – 203 дня. Гидротермический коэффициент (ГТК) составил в 2023 году 0,99, в 2024 году – 1,38, в 2025 году – 1,51.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Максимальная средняя урожайность зеленой массы кукурузы гибрида Шихан достигается при норме высева 80–85 тыс. шт./га. Пик урожайности на нижней части склона при норме 85 тыс. шт./га составил 45,52 т/га. На выровненном участке (контроль) оптимальной является норма 80 тыс. шт./га, обеспечивающая 43,78 т/га. Увеличение нормы высева до 90 тыс. шт./га приводит к достоверному снижению урожайности во всех позициях рельефа, что свидетельствует о вступлении в силу негативной конкуренции между растениями за ресурсы (табл. 1).

Рельеф оказывает статистически значимое влияние на продуктивность ($\text{НСР}_{05} = 0,25–0,38$). Наиболее продуктивна нижняя часть склона. Здесь зафиксированы максимальные показатели урожайности при всех нормах высева. Это связано с аккумуляцией влаги и питательных веществ, стекающих с верхних частей склона. Наименее продуктивна верхняя часть склона. Урожайность здесь стабильно ниже, что объясняется повышенными рисками ветровой и водной эрозии, меньшим запасом продуктивной влаги и, возможно, более бедными почвами. Середина склона и выровненный участок демонстрируют промежуточные значения, причем на выровненном участке урожайность может быть сопоставима или выше, чем в средней части.

Таблица 1. Урожайность зеленой массы кукурузы гибрида Шихан разной экспозиции склона, т/га (УНЦ ААПК, поле № 2)

Table 1. Green biomass yield of 'Shikhan' maize hybrid across different slope aspects, t/ha (ESC AFC, Field No. 2)

Норма высева	Часть склона	Урожайность зеленой массы, т/га			
		2023 год	2024 год	2025 год	среднее за 2023–2025 годы
65 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	18,08	22,68	19,03	19,93
	Верхняя	24,57	29,17	25,52	26,42
	Середина	28,45	33,05	29,4	30,3
	Нижняя	30,67	35,27	31,62	32,52
70 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	36,21	40,81	37,16	38,06
	Верхняя	33,57	38,17	34,52	35,42
	Середина	35,81	40,41	36,76	37,66
	Нижняя	38,04	42,64	38,99	39,89
75 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	36,76	41,36	37,71	38,61
	Верхняя	35,07	39,67	36,02	36,92
	Середина	36,72	41,32	37,67	38,57
	Нижняя	39,8	44,4	40,75	41,65
80 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	41,93	46,53	42,88	43,78
	Верхняя	37,8	42,4	38,75	39,65
	Середина	41,57	46,17	42,52	43,42
	Нижняя	42,51	47,11	43,46	44,36
85 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	39,75	44,35	40,7	41,6
	Верхняя	35,61	40,21	36,56	37,46
	Середина	38,69	43,29	39,64	40,54
	Нижняя	43,67	48,27	44,62	45,52
90 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	31,5	36,1	32,45	33,35
	Верхняя	28,09	32,69	29,04	29,94
	Середина	31,8	36,4	32,75	33,65
	Нижняя	32,57	37,17	33,52	34,42
НСР 05	—	0,25	0,35	0,38	0,34

Эффект от изменения нормы высева неодинаков на разных элементах рельефа. На нижней части склона с лучшими условиями увлажнения растения могут эффективно реализовывать потенциал даже при повышенной норме высева (85 тыс./га). На верхней части склона и при норме 90 тыс./га стресс от недостатка ресурсов и внутривидовой конкуренции проявляется наиболее сильно, приводя к резкому падению урожайности.

Отмечается определенная вариабельность урожайности по годам, что, вероятно, связано с различными погодными условиями вегетационных периодов. Тем не менее общие закономерности влияния нормы высева и рельефа остаются устойчивыми на протяжении трех лет исследований, что подтверждается данными средних значений.

Исследование показало значительное влияние как нормы высева, так и особенностей рельефа участка на формирование урожайности зерна кукурузы. Максимальная урожайность зерна достигается при норме высева 80–85 тыс. шт./га. Абсолютный максимум зафиксирован на нижней части склона при норме 85 тыс./га – 10,21 т/га в среднем за три года. На выровненном участке и средней части склона оптимальной является норма 80 тыс./га (8,72 и 8,76 т/га соответственно). Увеличение нормы до 90 тыс./га приводит к достоверному снижению урожайности на всех элементах рельефа, что подтверждает негативное влияние чрезмерной густоты стояния на формирование зерна (табл. 2).

Таблица 2. Урожайность зерна кукурузы гибрида Шихан разной экспозиции склона, т/га (УНЦ ААПК, поле № 2)

Table 2. Grain yield of 'Shikhan' maize hybrid across different slope aspects, t/ha (ESC AFC, Field No. 2)

Норма высева	Часть склона	Урожайность зерна, т/га			
		2023 год	2024 год	2025 год	среднее за 2023–2025 годы
65 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	5,04	6,3	5,5	5,61
	Верхняя	4,26	5,52	4,72	4,83
	Середина	5,46	6,72	5,92	6,03
	Нижняя	5,82	7,08	6,28	6,39
70 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	5,92	7,18	6,38	6,49
	Верхняя	4,8	6,06	5,26	5,37
	Середина	5,86	7,12	6,32	6,43
	Нижняя	6,07	7,33	6,53	6,64
75 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	5,89	7,15	6,35	6,46
	Верхняя	5,16	6,42	5,62	5,73
	Середина	6	7,26	6,46	6,57
	Нижняя	6,52	7,78	6,98	7,09
80 тыс. шт./га	Выровненный участок поля (К)	8,15	9,41	8,61	8,72
	Верхняя	6,82	8,08	7,28	7,39
	Середина	8,19	9,45	8,65	8,76
	Нижняя	9,5	10,76	9,96	10,07
85 тыс. т./га	Выровненный участок поля (К)	6,96	8,22	7,42	7,53
	Верхняя	6,16	7,42	6,62	6,73
	Середина	7	8,26	7,46	7,57
	Нижняя	9,64	10,9	10,1	10,21
90 тыс. т./га	Выровненный участок поля (К)	6,66	7,92	7,12	7,23
	Верхняя	5,82	7,08	6,28	6,39
	Середина	6,8	8,06	7,26	7,37
	Нижняя	6,73	7,99	7,19	7,30
НСР 05	–	0,11	0,13	0,14	0,12

Рельеф местности оказывает статистически значимое ($HCp_{05} = 0,11-0,14$) и сильное влияние на урожайность зерна. Наиболее продуктивна нижняя часть склона, получены самые высокие результаты при нормах высева 75, 80 и 85 тыс./га.

На всех элементах рельефа (выровненный участок, верхняя, средняя, нижняя части) содержание протеина возрастает при увеличении нормы высева от 65 до 85 тыс. шт./га, после чего при 90 тыс. шт./га отмечается снижение. Максимальные значения протеина зафиксированы при норме высева 85 тыс. шт./га: на выровненном участке – 10,7 %, в верхней части – 11,0 %, в средней – 9,6 %, в нижней – 8,0 %. Это свидетельствует о наличии оптимальной густоты стояния растений, обеспечивающей наилучшее накопление белка (рис. 1).

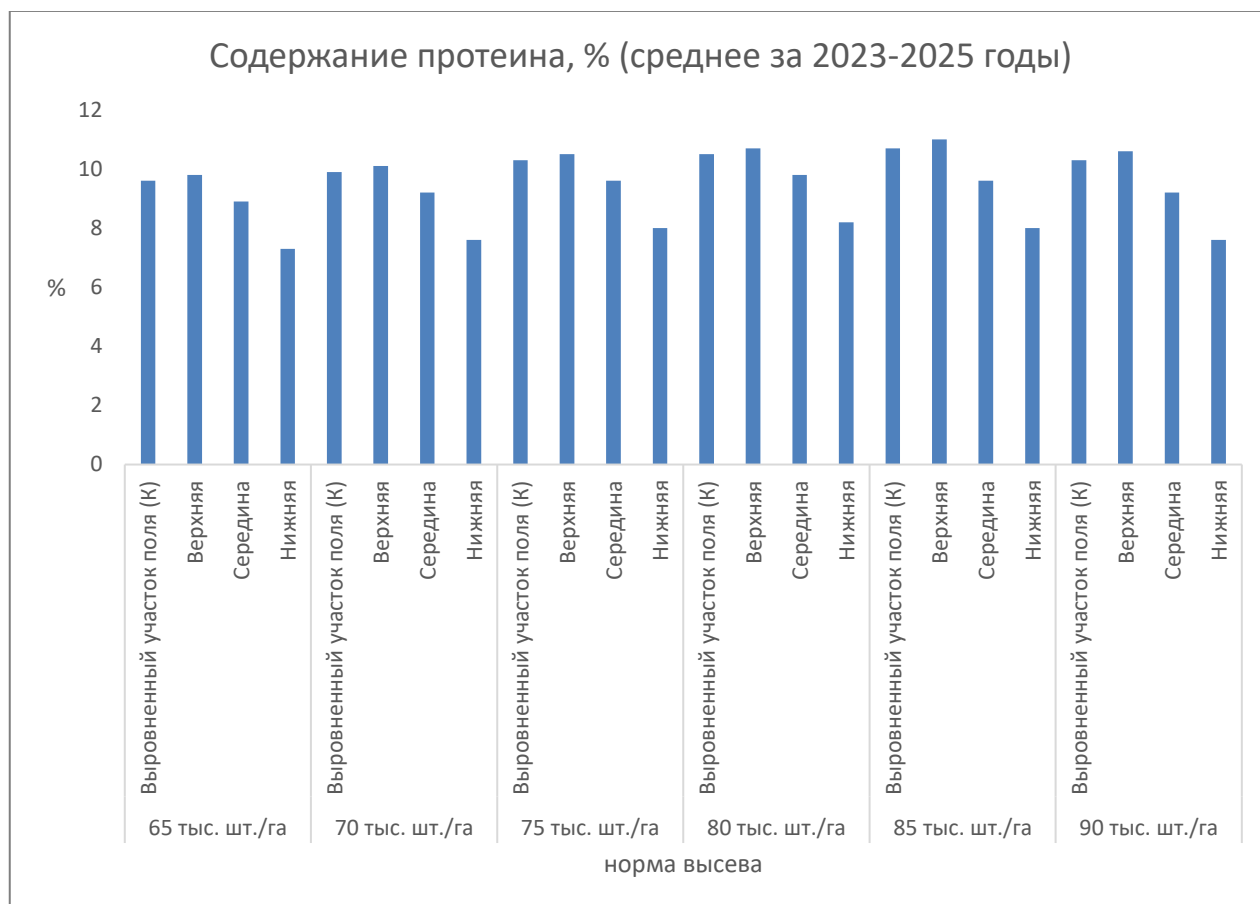


Рис. 1. Содержание протеина в зерне кукурузы гибрида Шихан в зависимости от нормы высева в разной экспозиции склона (УНЦ ААПК, поле № 2, среднее за 2023–2025 гг.)

Fig. 1. Grain protein content of 'Shikhan' maize hybrid as affected by seeding rate and slope aspect (ESC AFC, Field No. 2, 2023–2025 average).

Содержание протеина существенно варьирует по элементам склона. Наибольшие показатели отмечены в верхней части поля (на 0,2–0,3 % выше контроля), средние – на выровненном участке, более низкие – в средней части (на 0,7–1,1 % ниже контроля) и минимальные – в нижней части (на 2,3–2,6 % ниже контроля). Такая закономерность, вероятно, обусловлена неоднородностью почвенного плодородия, водного режима и доступности элементов питания по элементам рельефа.

Для получения стабильно высокого содержания протеина целесообразно применять дифференцированный подход: на участках с более благоприятными условиями (верхняя

часть, выровненные поля) можно использовать норму высева 80–85 тыс. шт./га, а на менее продуктивных (нижняя часть) – снижать норму высева до 70–75 тыс. шт./га для предотвращения снижения качества зерна.

Оптимальная норма высева кукурузы составляет 85 тыс. шт./га. При ней достигается максимальное содержание крахмала на всех элементах рельефа (69,0 % – верхняя часть, 67,8 % – выровненный участок).

Крахмалистость зерна закономерно снижается от верхней части поля к нижней. Разница между верхним и нижним элементами при 85 тыс. шт./га составляет 10,3 %.

Увеличение нормы высева до 90 тыс. шт./га приводит к падению содержания крахмала на 2,2–3,0 % по сравнению с оптимумом (рис. 2).



Рис. 2. Содержание крахмала в зерне кукурузы гибрида Шихан в зависимости от нормы высева в разной экспозиции склона (УНЦ ААПК, поле № 2, среднее за 2023–2025 гг.)

Fig. 2. Grain starch content of 'Shikhan' maize hybrid as affected by seeding rate and slope aspect (ESC AFC, Field No. 2, 2023–2025 average).

Для получения стабильно высокого качества зерна целесообразно применять дифференцированный посев: 85 тыс. шт./га – на выровненных участках и в верхней части склона; 75–80 тыс. шт./га – на средних и нижних элементах рельефа.

Норма высева является действенным инструментом управления не только урожайностью, но и биохимическим составом зерна кукурузы. Ожидается, что максимальное содержание крахмала будет достигнуто при нормах высева, обеспечивающих наивысшую урожайность (80–85 тыс./га), демонстрируя обратную зависимость с динамикой содержания сырого протеина. Для окончательных выводов требуется анализ конкретных числовых значений.

ВЫВОДЫ

Практические рекомендации: для повышения продуктивности и качества зерна кукурузы в условиях склоновых земель Бугульмино-Белебеевской возвышенности целесообразно применять дифференцированные нормы высева с учетом элементов рельефа на выровненных участках и в верхней части склона – 80–85 тыс. шт./га, на средней и нижней частях склона – 75–80 тыс. шт./га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин А. Е., Казак А. А. Урожайность гибридов кукурузы в северной лесостепи Тюменской области. Агропродовольственная политика России. 2022. № 2-3. С. 29–34. EDN: QWEYOW
2. Абдулвалеев Р. Р. Распределение снежного покрова в зависимости от рельефа поля // Аграрная наука в инновационном развитии АПК: материалы Международной научно-практ. конф. в рамках Межд. спец. выставки «Агрокомплекс – 2015». Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. С. 3–6. EDN: YMXPQD
3. Гурин А. Г., Евдакова М. В. Сравнительное сортоизучение гибридов кукурузы различного эколого-географического происхождения в условиях Орловской области // Вестник аграрной науки. 2020. № 4 (85). С. 3–8. EDN: TEJOEA
4. Ахияров Б. Г., Сотченко Б. Н., Абдулвалеев Р. Р. и др. Формирование урожая гибридов кукурузы в условиях Республики Башкортостан // Пермский аграрный вестник. 2020. № 1(29). С. 28–37. DOI: 10.24411/2307-2873-2020-10011
5. Сотченко В. С., Багринцева В. Н. Технология возделывания кукурузы // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № S2. С. 79–84. EDN: TSLIKX
6. Багринцева В. Н., Иващенко И. Н. Эффективность применения аммиачной селитры и удобрения КАС-32 при возделывании кукурузы на зерно // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 191–199. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-191-199. EDN: LRZRJJ
7. Калинина К. Какие гибриды кукурузы не боятся стрессов // АгроФорум. 2021. № 1. С. 39–43. EDN: GUWUQJ
8. Черкашина А. В. Выращивание кукурузы в Крыму. история. проблемы и перспективы // Кукуруза и сорго. 2017. № 4. С. 29–31. EDN: YMHRPQ
9. Дадаева Т. А., Исаков А. Н. Результаты экологического сортоиспытания яровых зерновых культур на серых лесных почвах Калужской области // В сборнике: Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК. Материалы XV Международной научной конференции. 2018. С. 293–298. EDN: XWKONZ
10. Сотченко Ю. В., Сотченко Е. Ф., Сотченко Б. Н. и др. Биологические особенности гибридов кукурузы в условиях Республики Башкортостан // Теория и практика современной аграрной науки. Сборник III национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием. 2020. С. 283–287. EDN: NEOVWY
11. Cherkashina M., Alimgafarov R., Kuznetsov I., Cherkashina A. Yield of different onion varieties depending on the level of mineral nutrition and growth regulators in the conditions of the southern forest-steppe of the republic of Bashkortostan // В сборнике: E3S Web of Conferences. X International Annual Conference “Industrial Technologies and Engineering” (ICITE 2023). Les Ulis, 2024. С. 03007. EDN: UIRKVC
12. Akhiyarov B., Kuznetsov I., Alimgafarov R. et al. The influence of different seeding application rates and sowing time on maize hybrids' productivity in the conditions of the republic of bashkortostan's southern forest-steppe zone // Applied and Environmental Soil Science. 2021. Т. 2021. С. 4914508. EDN: JBEBZY

REFERENCES

1. Fomin A.E., Kazak A.A. Yield of Corn Hybrids in the Northern Forest-Steppe of the Tyumen Region. *Agro-Food Policy of Russia*. 2022. No. 2-3. Pp. 29–34. EDN: QWEYOW. (In Russian)
2. Abdulvaleev R.R. Distribution of Snow Cover Depending on Field Relief. *Agrarian Science in Innovative Development of the AIC: Proceedings of the International Scientific and Practical Conf. within the Framework of the Int. Specialized Exhibition "Agrocomplex – 2015"*. Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2015. Pp. 3–6. EDN: YMXPD. (In Russian)
3. Gurin A.G., Evdakova M.V. Comparative study of corn hybrids of different ecological and geographical origins in the Oryol region. *Bulletin of Agrarian Science*. 2020. No. 4 (85). Pp. 3–8. EDN: TEJOEA. (In Russian)
4. Akhiyarov B.G., Sotchenko B.N., Abdulvaleev R.R. et al. Yield formation of corn hybrids in the conditions of the Republic of Bashkortostan. *Perm Agrarian Journal*. 2020. No. 1 (29). Pp. 28–37. DOI: 10.24411/2307-2873-2020-10011. (In Russian)
5. Sotchenko V.S. Corn cultivation technology. Sotchenko V.S., Bagrintseva V.N. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2015. No. S2. Pp. 79–84. EDN: TSLIKX. (In Russian)
6. Bagrintseva V.N., Ivashenenko I.N. Efficiency of using ammonium nitrate and KAS-32 fertilizer in growing grain corn. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 191–199. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-191-199. EDN: LRZRJJ. (In Russian)
7. Kalinina K. Which corn hybrids are not afraid of stress. *AgroForum*. 2021. No. 1. Pp. 39–43. EDN: GUWUQJ. (In Russian)
8. Cherkashina A.V. Growing corn in Crimea. History. Problems and prospects. *Kukuruza i sorgo* [Corn and sorghum]. 2017. No. 4. Pp. 29–31. EDN: YMHRPQ. (In Russian)
9. Dadaeva T.A., Isakov A.N. Results of ecological variety testing of spring grain crops on gray forest soils of the Kaluga Region. *In the collection: Agroecological aspects of sustainable development of the agro-industrial complex. Proceedings of the XV International Scientific Conference*. 2018. Pp. 293–298. EDN: XWKOHZ. (In Russian)
10. Sotchenko Yu.V., Sotchenko E.F., Sotchenko B.N. et al. Biological characteristics of maize hybrids in the conditions of the Republic of Bashkortostan. *Theory and practice of modern agricultural science. Proceedings of the III National (All-Russian) Scientific Conference with International Participation*. 2020. Pp. 283–287. EDN: NEOVWY. (In Russian)
11. Cherkashina M., Alimgafarov R., Kuznetsov I., Cherkashina A. Yield of different onion varieties depending on the level of mineral nutrition and growth regulators in the conditions of the southern forest-steppe of the republic of Bashkortostan. *In the collection: E3S Web of Conferences. X International Annual Conference "Industrial Technologies and Engineering"* (ICITE 2023). Les Ulis, 2024. P. 03007.
12. Akhiyarov B., Kuznetsov I., Alimgafarov R. et al. The influence of different seeding application rates and sowing time on maize hybrids' productivity in the conditions of the republic of bashkortostan's southern forest-steppe zone. *Applied and Environmental Soil Science*. 2021. T. 2021. P. 4914508.

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

Ахияров Булат Гилимханович, канд. с.-х. наук, доцент кафедры растениеводства, селекции растений и биотехнологии, Башкирский государственный аграрный университет;

450001, Россия, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34;

bsau-bulat@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4739-5225>, SPIN-код: 9400-4670

Абдулвалеева Гузалия Римзовна, аспирант кафедры растениеводства, селекции растений и биотехнологии, Башкирский государственный аграрный университет;

450001, Россия, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34;

grabdulvaleeva@mail.ru, SPIN-код: 9755-3870

Абдулвалеев Ришат Рифмилевич, д-р с.-х. наук, доцент кафедры почвоведения, агрохимии и точного земледелия, Башкирский государственный аграрный университет;

450001, Россия, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6251-7035>, SPIN-код: 1453-9780

Ахиярова Луиза Мунировна, канд. с.-х. наук, доцент, ст. науч. сотр. кафедры почвоведения, агрохимии и точного земледелия, Башкирский государственный аграрный университет;

450001, Россия, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34;

akhijarva-luiza@rambler.ru, SPIN-код: 6190-1447

Газизов Булат Хамзович, аспирант кафедры растениеводства, селекции растений и биотехнологии, Башкирский государственный аграрный университет;

450001, Россия, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34;

bulat.22.12.2000@yandex.ru

Information about the authors

Bulat G. Akhiyarov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Plant Growing, Plant Breeding and Biotechnology, Bashkir State Agrarian University;

34, 50th Anniversary of October, Ufa, 450001, Russia;

bsau-bulat@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4739-5225>, SPIN-code: 9400-4670

Guzaliya R. Abdulvaleeva, Postgraduate Student, Department of Plant Growing, Plant Breeding and Biotechnology, Bashkir State Agrarian University;

34, 50th Anniversary of October, Ufa, 450001, Russia;

grabdulvaleeva@mail.ru, SPIN-code: 9755-3870

Rishat R. Abdulvaleev, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Soil Science, Agrochemistry and Precision Agriculture, Bashkir State Agrarian University;

34, 50th Anniversary of October, Ufa, 450001, Russia;

rischatkim@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6251-7035>, SPIN-code: 1453-9780

Luiza M. Akhiyarova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of Research Department of Soil Science, Agrochemistry, and Precision Farming, Bashkir State Agrarian University;

34, 50th Anniversary of October, Ufa, 450001, Russia;

akhijarva-luiza@rambler.ru, SPIN-code: 6190-1447

Bulat Kh. Gazizov, Postgraduate Student, Department of Plant Production, Plant Breeding, and Biotechnology, Bashkir State Agrarian University;

34, 50th Anniversary of October, Ufa, 450001, Russia;

bulat.22.12.2000@yandex.ru

Оценка влияния сроков использования антидота Лигногумат при химической прополке посевов озимой пшеницы на аминокислотный состав зерна

Л. А. Алакаева¹, А. Х. Занилов^{✉2}, М. Р. Азнаева²,
А. М. Лешкенов³, Т. Б. Шалов⁴

¹Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

²Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

³Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224

⁴Абхазский государственный университет
384904, Республика Абхазия, г. Сухум, ул. Университетская, 1

Аннотация. В условиях интенсивного земледелия актуальной задачей остается поиск способов снижения фитотоксического действия гербицидов при сохранении и повышении качества растениеводческой продукции. Особый интерес представляет использование антидотов гуминовой природы, способных оказывать антистрессовое действие и влиять на биохимический состав зерна. При этом данные о влиянии последовательности применения антидотов при гербицидных обработках на качество зерна в условиях степной зоны КБР отсутствуют.

Цель исследования – оценка влияния сроков применения антидота Лигногумат АМ (150 г/га) при химической прополке посевов озимой пшеницы на аминокислотный состав зерна и урожайность культуры.

Новизна работы заключается в определении влияния антидотов наряду с урожайностью на нутритивную плотность зерна (концентрация незаменимых аминокислот) в зависимости от последовательности их применения с гербицидами.

Материалы и методы исследования. Полевые опыты проводились на посевах озимой пшеницы сорта Памяти Шатилова в условиях опытного поля ИСХ КБНЦ РАН. Обработка посевов озимой пшеницы проводилась в фазу весеннего кушения по схеме: 1) за 2 дня до химической прополки; 2) в баковой смеси с гербицидом; 3) через 2 дня после химической прополки. В качестве средств защиты растений использовался гербицид «Балерина». Содержание незаменимых аминокислот определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Статистическую обработку результатов проводили с использованием ANOVA и теста Тьюки при $p < 0,05$.

Результаты. В работе установлено, что максимальная урожайность зерна (5,27 т/га) достигнута при использовании антидота в баковой смеси, что на 10,9 % выше, чем в контроле (4,75 т/га). Сумма незаменимых аминокислот среди опытных вариантов также достигнута в варианте с баковой смесью (3,641 %), но по отношению к контрольному варианту (3,949 %) она ниже на 7,8 %. Наименьшая эффективность отмечена при предварительном внесении антидота (2,642 %). Урожайность при этом меняется в сторону снижения в пределах статистической погрешности (2,7 %).

Закключение. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения Лигногумата в баковой смеси с гербицидом как наиболее эффективного способа реализации его антистрессового и биофортификационного потенциала.

Ключевые слова: озимая пшеница, Лигногумат, антидот, гербицид, химическая прополка, аминокислотный состав, незаменимые аминокислоты, биофортификация, фитотоксичность

Поступила 04.05.2026, одобрена после рецензирования 28.05.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Алакаева Л. А., Занилов А. Х., Азнаева М. Р., Лешкенов А. М., Шалов Т. Б. Оценка влияния сроков использования антидота Лигногумат при химической прополке посевов озимой пшеницы на аминокислотный состав зерна // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 143–152. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-143-152

Research article

Impact of Lignohumate antidote application timing on the amino acid composition of winter wheat grain during chemical weeding

L.A. Alakaeva¹, A.Kh. Zanirov², M.R. Aznaeva²,
A.M. Leshkenov³, T.B. Shalov⁴

¹Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia

²Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov
173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia

³Institute of Agriculture –
branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
224, Kirov street, Nalchik, 360004, Russia

⁴Abkhazian State University
1, Universitetskaya street, Sukhum, 384904, Republic of Abkhazia

Abstract. In the context of intensive farming, mitigating the phytotoxic effect of herbicides while maintaining and improving the quality of crop products remains an urgent task. Of particular interest is the use of humic-nature antidotes, which are capable of exerting an anti-stress effect and influencing the biochemical composition of grain. At the same time, no data are available regarding how the timing and sequence of antidote application during herbicide treatments affect grain quality under the conditions of the Kabardino-Balkarian Republic steppe zone.

Aim. The goal of the study is to assess how the timing of Lignohumate AM antidote application (150 g/ha) during herbicide treatments affects the amino acid profile of winter wheat grain and overall crop yield.

Thus, the novelty of this study is that it evaluates the effects of antidotes on both crop yield and grain nutritional density (essential amino acid concentration) as a function of their application sequencing relative to herbicides.

Materials and methods. Field trials were conducted on winter wheat crops of the 'Pamyati Shatilova' variety on the experimental field of the Institute of Agriculture of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (IA KBSC RAS). The treatment of winter wheat crops was carried out during the spring tillering phase according to the following scheme: 1) 2 days before chemical weeding; 2) in a tank mix with the herbicide; 3) 2 days after chemical weeding. The herbicide "Ballerina" served as the plant protection product. High-performance liquid chromatography was then used to determine the content of essential amino acids. Statistical analysis of the results involved ANOVA and Tukey's test at $p < 0.05$.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Results. The study found that the maximum grain yield (5.27 t/ha) was achieved by applying the antidote in a tank mixture, which exceeded the control (4.75 t/ha) by 10.9 %. The highest total concentration of essential amino acids among the treatments was also observed in the tank mix option (3.641 %), which was 7.8 % lower than that in the control (3.949%). The lowest efficacy was observed with the preliminary antidote application (2.642 %). Meanwhile, the crop yield trended downward within the margin of statistical error (2.7 %).

Conclusion. The obtained results indicate the feasibility of applying Lignohumate in a tank mixture with the herbicide as the most effective way to realize its anti-stress and biofortification potential.

Keywords: winter wheat, Lignohumate, antidote, herbicide, chemical weed control, amino acid composition, essential amino acids, biofortification, phytotoxicity

Submitted 04.05.2026,

approved after reviewing 28.05.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Alakaeva L.A., Zanirov A.Kh., Aznaeva M.R., Leshkenov A.M., Shalov T.B. Impact of Lignohumate antidote application timing on the amino acid composition of winter wheat grain during chemical weeding. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 143–152. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-143-152

ВВЕДЕНИЕ

Регуляторы роста и антистрессовые средства на основе биологических препаратов [1, 2] и гуминовых соединений находят широкое применение в растениеводстве, в том числе при внесении в баковых смесях с гербицидами [3, 4]. Использование антидотов призвано снизить негативное действие синтетических пестицидов, нарушающих физиолого-биохимическое состояние защищаемых культурных растений [5]. Результатом их применения является ограничение снижения фитотоксичности [6] и повышение урожайности.

Несмотря на то, что в регуляторах роста заложен резерв повышения продукционного процесса растений, задача повышения качества продукции при их использовании, в том числе в баковых смесях с гербицидами, остается нерешенной. Так, при использовании некоторых регуляторов роста растений при повышении урожайности могут страдать отдельные качественные характеристики продукции [7], в том числе содержание микроэлементов [8] и аминокислот [9], определяющих nutritивную плотность продукции. Важность подбора антидотов и способов их применения остается актуальной задачей для интенсивной формы земледелия. Так, установлено ингибирующее действие повышенных концентраций регуляторов роста как при foliarных обработках [10], так и при обработке семян [11]. Проблематика недостатка исследований касается и темы применения антидотов в системе защиты культурных растений от сорной растительности. Это в свою очередь требует перехода от эпизодических исследований к получению и систематизации данных о способах повышения биофортификационного потенциала антидотов за счет подбора средств и сроков их внесения в условиях интенсивного земледелия.

Целью работы является оценка влияния сроков применения антидота гуминовой природы (Лигногумат) на аминокислотный статус зерна озимой пшеницы при химической прополке посевов.

Новизна работы. В условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики ранее не изучалось влияние пестицидов и антидотов на концентрацию незаменимых аминокислот в зерне. Полученные данные вносят вклад в разработку систем защиты растений, минимизирующих ущерб не только по показателям урожайности, но и по показателям nutritивной плотности, что важно для создания технологий здоровьесбережения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительная оценка действия антидота Лигногумат при обработке посевов озимой пшеницы Памяти Шатилова проводилась в условиях опытного поля Института сельского хозяйства – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН. Для защиты посевов от сорной растительности использовался системный гербицид «Балерина» с нормой расхода 0,4 л/га в объеме рабочей жидкости 200 л/га. Защитные мероприятия проводились в фазу весеннего кущения, которая пришлась на третью декаду апреля 2025 г. Лигногумат вносился в три срока: 1) за 2 дня до химической прополки; 2) во время гербицидной обработки в баковой смеси; 3) через два дня после применения гербицида.

В качестве антидота использовался гуматно-фульватный комплекс в форме коммерческого препарата Лигногумат АМ, обладающего ростостимулирующими и антистрессовыми свойствами [12]. Норма внесения при листовой обработке 150 г/га.

Определение содержания незаменимых аминокислот в зерне проводилось в отделе мониторинга агроэкосистем Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова на высокоэффективном жидкостном хроматографе “HELIKON 1800” (“HELIKON”, Китай) со спектрофотометрическим детектором по методике Руденко и др. [13].

Статистический анализ проводили с использованием программной среды Python. Для каждой аминокислоты оценивали нормальность распределения количественных признаков с помощью критерия Шапиро–Уилка. Проверку однородности дисперсий осуществляли с использованием теста Левена. Сравнения проводили однофакторным анализом ANOVA с тестом Тьюки. Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$. Результаты представлены в виде средних значений $\pm$ стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ полученных данных (рис. 1) позволяет рассматривать период внесения антидота Лигногумат при проведении химических прополок посевов озимой пшеницы как в качестве элемента технологии биофортификации, целью которой является ограничение негативного влияния пестицидов на нутритивную плотность продукции или ее повышение на этапе первичного производства сырья, так и в качестве средства повышения урожайности.

Рассматривая влияние сроков внесения Лигногумата в пределах технологической операции по химической прополке посевов озимой пшеницы, следует выделить, что по сумме незаменимых аминокислот в сравниваемых сроках внесения максимальная эффективность (3,641 %) достигнута при одновременном использовании антидота и гербицида. Снижение по отношению к контрольному варианту (3,949 %) составило 7,8 %. Минимальная сумма незаменимых аминокислот в зерне (2,642 %) сформирована при внесении Лигногумата за 2 дня до проведения химической прополки. Это значение ниже, чем в контрольном варианте, на 33,1 % и в варианте с применением Лигногумата в баковой смеси на 27,5 %.

Обработка посевов Лигногуматом после проведения химической прополки аналогично варианту с заблаговременной обработкой формирует пониженную концентрацию незаменимых аминокислот в зерне. Снижение по отношению к контрольному варианту и варианту с применением в баковой смеси составляет 26,1 % и 19,8 % соответственно.

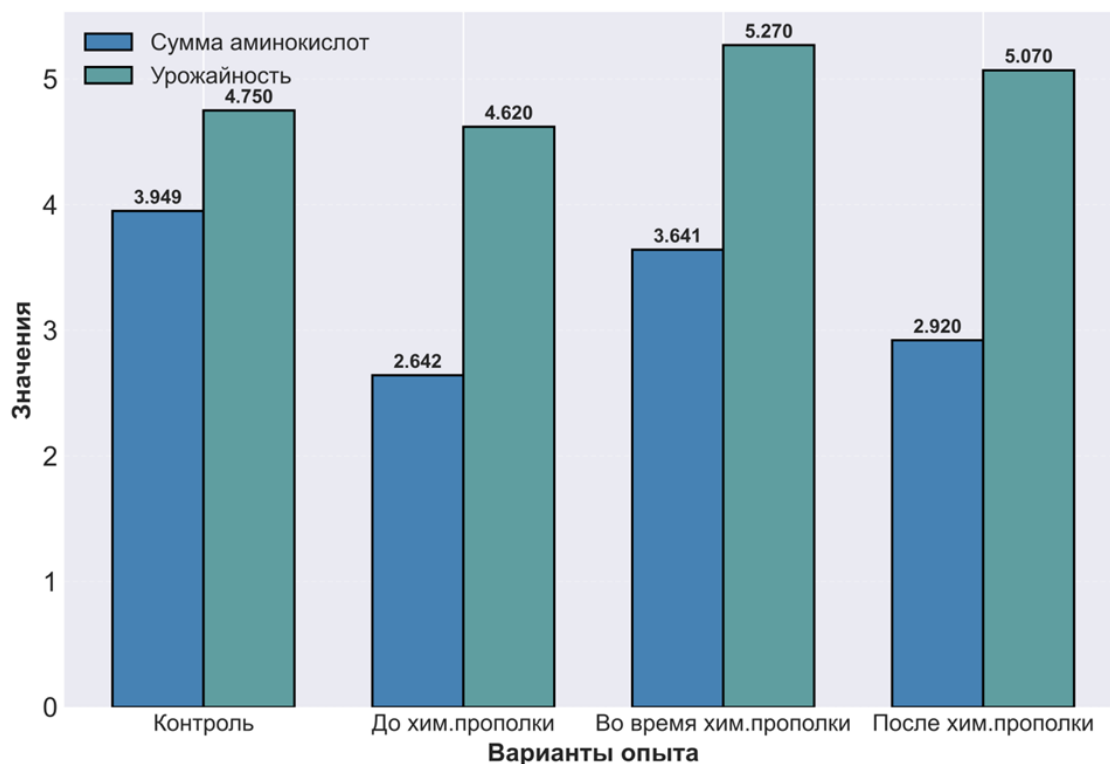


Рис. 1. Влияние сроков внесения антидота Лигногумат на сумму незаменимых аминокислот (%) в зерне озимой пшеницы и ее урожайность (т/га)

Fig. 1. Influence of Lignohumate antidote application timing on the total content of essential amino acids (%) in winter wheat grain and its yield (t/ha)

Судя по влиянию Лигногумата на урожайность зерна озимой пшеницы, можно предположить, что антистрессовые свойства изучаемого антидота связаны с восстановлением преимущественно ростовых процессов, что отражается на увеличении выхода валовой продукции при его использовании в баковой смеси с гербицидом и в качестве средства снятия стресса после его применения. Так, максимальная урожайность озимой пшеницы (5,27 т/га) установлена в варианте, сочетающем одновременное применение гербицидов с Лигногуматом, что на 10,9 % выше, чем в контрольном варианте (4,75 т/га). Антистрессовый эффект Лигногумата, внесенного после проведения химической прополки, выражается в повышении урожайности на 6,7 % – до 5,07 т/га. Заблаговременная обработка посевов Лигногуматом существенно не влияет на изменение урожайности (4,62 т/га), которая сопоставима со значением контрольного варианта.

Несмотря на статистически значимое изменение общей суммы аминокислот, при рассмотрении их в отдельности обнаруживаются индивидуальные особенности (рис. 2).

Заблаговременная обработка посевов Лигногуматом положительно сказывается на содержании аргинина, концентрация которого возрастает на 26,1 % ($p < 0,05$) и фенилаланина – на 31,7 % ($p < 0,001$). В остальных случаях концентрация понижается на 13,4–48,1 %.

При использовании Лигногумата в баковой смеси возрастает концентрация отдельных аминокислот: фенилаланина – на 31,6 % ($p < 0,01$); триптофана – на 4,9 % ($p > 0,05$). В пределах значения контрольного варианта остается лизин (1,3 %). Концентрация остальных аминокислот снижается на 5,2–47,1 %.

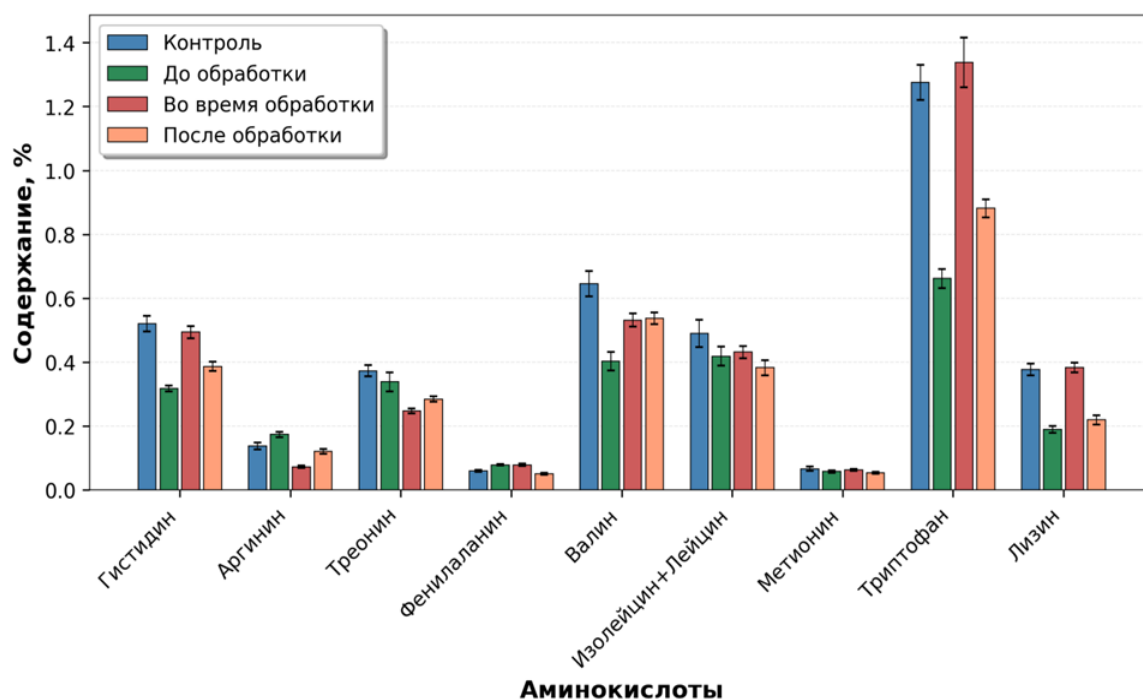


Рис. 2. Концентрация незаменимых аминокислот в зерне

Fig. 2. Concentration of essential amino acids in the grain

Использование Лигногумата после внесения гербицида, несмотря на повышение урожайности зерна, не способствует восстановлению концентрации ни одной из рассматриваемых аминокислот до значения контрольного варианта. Снижение концентрации в зависимости от аминокислоты находится в пределах 12,3–41,8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования установлено, что в пределах технологической операции по защите посевов озимой пшеницы от сорной растительности оптимальным способом использования Лигногумата является его применение в баковой смеси с гербицидами, что выражается ростом урожайности озимой пшеницы на 10,9 %. Биофортификационный потенциал антистрессового препарата Лигногумат, выраженный в накоплении незаменимых аминокислот, также в большей степени проявляется при его применении в баковой смеси, чем при внесении до или после проведения химической прополки гербицидом «Балерина», но незначительно уступает контрольному варианту – на 7,8 %. Минимальный комплексный эффект получен в варианте при использовании Лигногумата до проведения химической прополки. При сопоставимой с контрольным вариантом урожайности пшеницы сумма незаменимых аминокислот в зерне снизилась на 33,1 %.

С учетом новизны работы и впервые полученных данных планируется продолжение исследований на стыке агрохимии и нутрициологии, что открывает перспективы создания технологий здоровьесбережения. В условиях малоземелья республики, которое ограничивает возможность повышения конкуренции полеводства за счет валовых сборов, новое направление открывает возможности для получения биофортифицированной продукции с большей добавленной стоимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин Я. В., Ушаков Р. Н., Крючков М. М. и др. Агроэкологическая эффективность биопрепарата Экстрасол при выращивании ячменя // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2017. № 3(35). С. 34–38. EDN: ZHMYAB
2. Накаряков А. М., Завалин А. А. Влияние биопрепаратов и удобрений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы на светло-серой лесной почве // Плодородие. 2021. № 4(121). С. 26–30. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.08
3. Кишев А. Ю., Ханиева И. М., Бербекоев К. З. Применение лигногумата и альбита в сочетании с подкормкой азотом на сахарной свекле // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2020. № 3(29). С. 7–10. EDN: ZGUXAJ
4. Поздняков Л. А., Степанов А. Л., Гасанов М. Э. и др. Влияние лигногумата на биологическую активность почвы о. Бали, Индонезия // Почвоведение. 2020. № 5. С. 601–609. DOI: 10.31857/S0032180X20050111. EDN XWVBQT
5. Бычкова В. В., Сазонова И. А., Пиденко П. С. и др. Негативные эффекты применения гербицидов группы имидазолинонов: проблемы и решения // Агрохимия. 2023. № 2. С. 87–96. DOI: 10.31857/S0002188123020060. EDN: MSAXSU
6. Дворянкин Е. А. Потери урожая от фитотоксичности гербицидов. Методика исследования токсичности гербицидов // Сахар. 2018. № 7. С. 25–29. EDN: UWRPMC
7. Кравченко Р. В., Радчевский П. П., Прах А. В. Качество винограда и виноматериалов сорта Саперави на фоне применения лигногуматов марки "А" // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 99. С. 749–759. EDN: SGTOMP
8. Пашкевич Е. Б., Ларина Г. Е., Парахина М. В. Влияние разных способов внесения лигногумата на качество продукции зеленных культур и лекарственных растений // Агрохимия. 2024. № 4. С. 60–68. DOI: 10.31857/S0002188124040079
9. Кондратенко Е. П., Константинова О. Б., Соболева О. М. и др. Содержание белка и аминокислот в зерне озимых культур, произрастающих на территории лесостепи Юго-Востока Западной Сибири // Химия растительного сырья. 2015. № 3. С. 143–150. EDN: VEJQMH
10. Коришунов А. В., Митюшкин А. В., Гаитова Н. А. и др. Эффективность лигногуматов и комплексного удобрения акварин-12 на культуре картофеля // Достижения науки и техники АПК. 2009. № 11. С. 17–19. EDN: MEGJFD
11. Шеуджен А. Х., Гуторова О. А., Луценко И. М. Агрохимическая оценка применения лигногумата в посевах озимой пшеницы в условиях Северо-Западного Предкавказья // Агрохимия. 2022. № 3. С. 31–40. DOI: 10.31857/S0002188122030103. EDN: RVMNEQ
12. Бойко В. А., Левченко С. В., Белаш Д. Ю., Романов А. В. Оценка влияния применения препарата «Лигногумат» на показатели продуктивности и качества винограда в условиях Республики Крым // Русский виноград. 2021. Т. 15. С. 43–51. DOI: 10.32904/2712-8245-2021-15-43-51. EDN: GFOKXI
13. Руденко А. О., Карцова Л. А., Снарский С. И. Определение важнейших аминокислот в сложных объектах биологического происхождения методом обращенно-фазовой ВЭЖХ с получением фенилтиогидантоинов аминокислот // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. № 2. С. 223–230. EDN: MUEQTX

REFERENCES

1. Kostin Ya.V., Ushakov R.N., Kryuchkov M.M. et al. Agroecological efficiency of Extrasol biopreparate for barley growing. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2017. No. 3(35). Pp. 34–38. EDN: ZHMYAB. (Russian)
2. Nakaryakov A.M., Zavalin A.A. Influence of biorperarates and fertilizers on the yield and quality of winter wheat grain on light gray forest soil. *Plodorodie*. 2021. No. 4(121). Pp. 26–30. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.08. (Russian)
3. Kishev A.Yu., Khanieva I.M., Berbekov K.Z. Application of lignohumate and albite in combination with nitrogen fertilization on sugar beet. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2020. No. 3(29). Pp. 7–10. EDN: ZGUXAJ. (in Russian)
4. Pozdnyakov L.A., Stepanov A.L., Gasanov M.E. et al. Effect of lignohumate on soil biological activity on the Bali Island, Indonesia. *Pochvovedenie*. 2020. No. 5. Pp. 601–609. DOI: 10.31857/S0032180X20050111. EDN XWVBTQ. (Russian)
5. Bychkova V.V., Sazonova I.A., Pidenko P.S. et al. Negative effects of imidazolinone herbicides usage: problems and decisions. *Agrohimia*. 2023. No. 2. Pp. 87–96. DOI: 10.31857/S0002188123020060. EDN: MSAXSU. (in Russian)
6. Dvoryankin E.A. Crop losses due to herbicide phytotoxicity. Methods for studying herbicide toxicity. *Sakhar*. 2018. No. 7. Pp. 25–29. EDN: UWRPMC. (In Russian)
7. Kravchenko R.V., Radchevskiy P.P., Prakh A.V. Quality of Saperavi grapes and wine when applying the lignohumates of "A" grade. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014. No. 99. Pp. 749–759. EDN: SGTOMP. (In Russian)
8. Pashkevich E.B., Larina G.E., Parakhina M.V. Influence of different methods of application of ugnogumate on the product quality of green crops and medicinal plants. *Agrohimia*. 2024. No. 4. Pp. 60–68. DOI: 10.31857/S0002188124040079. (In Russian)
9. Kondratenko E.P., Konstantinova O.B., Soboleva O.M. et al. The content of protein and amino acids in the grain of winter crops growing in the forest-steppe of the south-east of Western Siberia. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2015. No. 3. Pp. 143–150. EDN: VEJQMH. (In Russian)
10. Korshunov A.V., Mityshkin A.V., Gaitova N.A. et al. Effectiveness of lignin-humates and complex fertilizer akvarin-12 on potato. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2009. No. 11. Pp. 17–19. EDN: MEGJFD. (In Russian)
11. Sheudzhen A.Kh., Gutorova O.A., Lutsenko I.M. Agrochemical estimation of lignogumate on winter wheat crops in the conditions of the NorthWestern Precaucasia. *Agrohimia*. 2022. No. 3. Pp. 31–40. DOI: 10.31857/S0002188122030103. EDN: RVMNEQ. (In Russian)
12. Boyko V.A., Levchenko S.V., Belash D.Yu., Romanov A.V. Impact of "Lignohumate" fertilizer on productivity indicators and grapes quality in the conditions of the Republic of Crimea. *Russkiy vinograd* [Russian Grapes]. 2021. Vol. 15. Pp. 43–51. DOI: 10.32904/2712-8245-2021-15-43-51. EDN: GFOKXI. (In Russian)
13. Rudenko A.O., Kartsova L.A., Snarsky S.I. High performance liquid chromatography determination of the major amino acids in complex biological objects using phenylisothiocyanate derivatization. *Sorption and Chromatography Processes*. 2010. Vol. 10. No. 2. Pp. 223–230. EDN: MUEQTX. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Алакаева Л. А., Лешкенов А. М. – закладка эксперимента, сбор образцов, первичная обработка данных;
Азнаева М. Р. – анализ растительных образцов на содержание незаменимых аминокислот;
Занилов А. Х., Шалов Т. Б. – актуализация тематики и представление перспектив междисциплинарного исследования. Анализ результатов полевых исследований, оформление рукописи статьи.

Contribution of the authors:

Alakaeva L.A., Leshkenov A.M. – experimental setup, sample collection, initial data processing;
Aznaeva M.R. – analysis of plant samples for essential amino acid content;
Zanilov A.Kh., Shalov T.B. – updating the topic and presenting the prospects for the interdisciplinary research. Analysis of field research results, manuscript preparation.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Алакаева Лейла Арсеновна, аспирант Научно-образовательного центра, заведующая отделом программного развития и договорной работы, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;
7677779@mail.ru

Занилов Амиран Хабинович, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. Центра декарбонизации АПК и региональной экономики, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;
amiran78@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

Азнаева Милана Радиевна, начальник отдела мониторинга агроэкосистем Центра декарбонизации АПК и региональной экономики, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;
miazna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9327-4526>

Лешкенов Аслан Мухамедович, зав. лабораторией агрохимии и почвенных исследований, Институт сельского хозяйства – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;
aslan.leshchenov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>

Шалов Тимур Борисович, д-р с.-х. наук, профессор, начальник отдела науки и аспирантуры, Абхазский государственный университет;

384904, Республика Абхазия, г. Сухум, ул. Университетская, 1;
timur.shalov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7015-9266>

Information about the authors

Leila A. Alakaeva, Postgraduate Student, Scientific and Educational Center, Head of the Department of Program Development and Contractual Activities, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia;
7677779@mail.ru

Amiran Kh. Zanirov, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Center for Decarbonization of the Agro-Industrial Complex and Regional Economy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia;

amiran78@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

Milana R. Aznaeva, Head of the Department for Monitoring Agroecosystems, Center for Decarbonization of the Agro-Industrial Complex and Regional Economy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

173, Chernyshevsky street, Nalchik, 360004, Russia;

miazna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9327-4526>

Aslan M. Leshchenov, Head of the Laboratory of Agrochemistry and Soil Research, Institute of Agriculture – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

224, Kirov street, Nalchik, 360004, Russia;

aslan.leshchenov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>

Timur B. Shalov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Science and Postgraduate Studies, Abkhazian State University;

1, Universitetskaya street, Sukhum, 384904, Republic of Abkhazia;

timur.shalov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7015-9266>

УДК 633.11:631.81

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-153-164>

 ASRBIV

Динамика содержания азота, фосфора и калия в черноземе обыкновенном и роль минеральных удобрений в повышении урожайности и улучшении качественных показателей зерна озимой пшеницы

А. Ю. Ожередова[✉], В. Н. Ситников, А. Н. Есаулко,
В. А. Бородин, М. Ю. Азарова

Ставропольский государственный аграрный университет
355017, Россия, г. Ставрополь, переулок Зоотехнический, 12

Аннотация. Интенсификация земледелия делает применение минеральных удобрений неизбежным, но их неконтролируемое использование ведет к дисбалансу питательных веществ, снижению плодородия почвы и экологическим рискам. Поэтому необходим мониторинг динамики основных макроэлементов, определяющих урожайность и качество продукции. В связи с чем проведенные исследования актуальны, а их новизна заключается в том, что впервые на черноземе обыкновенном была проанализирована динамика макроэлементов в зависимости от применяемых норм минеральных удобрений, дана оценка влияния систем питания на урожайность и качество получаемой продукции.

Цель исследования – изучение влияния норм минеральных удобрений на динамику NPK в черноземе выщелоченном, урожайность и качество зерна озимой пшеницы.

Материалы и методы исследования. Опыт двухфакторный: фактор А – норма удобрения (контроль (без удобрений), рекомендованная (N215P65), расчетная на планируемую урожайность 10,5 т/га (N257P135K75)), фактор В – сорт озимой пшеницы (Школа, Цаца) был заложен в 2023–2025 гг. в ООО СХП «Племзавод «Кубань» Кочубеевского МО Ставропольского края. Все исследования проведены по общепринятым методикам.

Результаты исследования. Полученные результаты показали, что применение удобрений достоверно увеличило содержание NO_3 (до 13,4 мг/кг) и P_2O_5 (до 14,1 мг/кг). Расчетная норма (N257P135K75) обеспечила наибольшее накопление K_2O (+20 мг/кг). В динамике от всходов к полной спелости наблюдалось снижение подвижных форм фосфора и калия. Максимальная урожайность (9,87 т/га) и качество зерна (клейковина 24,0 %, белок 18,4 %) получены у сорта Цаца на фоне применения нормы минеральных удобрений N257P135K75.

Заключение. Мониторинг почвы – незаменимый элемент, так как позволяет оценивать текущую ситуацию по обеспечению питанием растений. Расчетная норма удобрений формирует самую высокую урожайность с лучшим качеством. Сорт Цаца наиболее отзывчив на удобрения. В связи с чем для зоны неустойчивого увлажнения на черноземе выщелоченном производству можно порекомендовать именно его на фоне внесения нормы минеральных удобрений N257P135K75.

Ключевые слова: озимая пшеница, нормы минеральных удобрений, сорт, нитратный азот, подвижные фосфор и калий, урожайность, качество зерна

Поступила 13.03.2026, одобрена после рецензирования 14.05.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Ожередова А. Ю., Ситников В. Н., Есаулко А. Н., Бородин В. А., Азарова М. Ю. Динамика содержания азота, фосфора и калия в черноземе обыкновенном и роль минеральных удобрений в повышении урожайности и улучшении качественных показателей зерна озимой пшеницы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 153–164. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-153-164

© Ожередова А. Ю., Ситников В. Н., Есаулко А. Н., Бородин В. А., Азарова М. Ю., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

NPK in ordinary chernozem and the role of mineral fertilizers in enhancing winter wheat yield and grain quality

A.Yu. Ozheredova[✉], V.N. Sitnikov, A.N. Esaulko,
V.A. Borodin, M.Yu. Azarova

Stavropol State Agrarian University
12, Zootechnicheskiy lane, Stavropol, 355017, Russia

Abstract. Agricultural intensification makes mineral fertilizers indispensable, but their uncontrolled use causes nutrient imbalances, reduces soil fertility, and poses environmental risks. Hence, monitoring the dynamics of essential macronutrients regulating crop yield and quality attributes becomes imperative. Consequently, this study offers a novel approach by evaluating macronutrient dynamics in ordinary chernozem under different fertilizer regimes and assessing their subsequent impact on winter wheat yield and quality.

Aim. The aim of this study is to investigate the influence of mineral fertilizer rates on NPK dynamics in ordinary chernozem, as well as on the yield and grain quality of winter wheat.

Materials and methods. The study was arranged as a two-factor experiment: Factor A – fertilization rate (control without fertilizer; recommended (N215P65); calculated for a planned yield of 10.5 t/ha (N257P135K75); Factor B – winter wheat variety ('Shkola', 'Tsatsa'). Factor B comprised the winter wheat cultivars 'Shkola' and 'Tsatsa'. The field trials were carried out between 2023 and 2025 at the Kuban Experimental Breeding Farm, located in the Kochubeevsky District, Stavropol Territory. All analyses were performed using standardized methodologies.

Results. The results showed that fertilizer application significantly increased soil nutrient content, with (NO₃) reaching up to 13.4 mg/kg and (P₂O₅) up to 14.1 mg/kg. The calculated rate (N257P135K75) provided the greatest increment in K₂O concentration (+20 mg/kg). Mobile phosphorus and potassium levels decreased from germination to full maturity. The highest yield (9.87 t/ha) and grain quality (24.0 % gluten, 18.4 % protein) were recorded in the 'Tsatsa' variety fertilized with N257P135K75.

Conclusion. Soil monitoring is indispensable, as it enables an accurate assessment of the current plant nutritional status. The calculated fertilizer rate ensures maximum crop yields and superior grain quality. The 'Tsatsa' variety proved to be the most responsive to fertilizer application. Consequently, it is recommended for agricultural production in unstable moisture zones on leached chernozem against the background of the N257P135K75 fertilization rate.

Keywords: winter wheat, mineral fertilizer rates, variety, nitrate nitrogen, mobile phosphorus, potassium, yield, grain quality

Submitted 13.03.2026,

approved after reviewing 14.05.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Ozheredova A.Yu., Sitnikov V.N., Esaulko A.N., Borodin V.A., Azarova M.Yu. NPK in ordinary chernozem and the role of mineral fertilizers in enhancing winter wheat yield and grain quality. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 153–164. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-153-164

ВВЕДЕНИЕ

Продовольственная безопасность является одним из ключевых приоритетов государственной политики Российской Федерации, что находит отражение в Указе Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности»



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Российской Федерации». В данном документе подчеркивается необходимость устойчивого наращивания производства зерновых культур для обеспечения внутренних потребностей страны и укрепления позиций на мировом рынке [7, 9].

Озимая пшеница как одна из наиболее значимых зерновых культур играет центральную роль в достижении этих целей, обладая высоким потенциалом урожайности и качественных характеристик зерна [4].

Мировое производство пшеницы занимает значительную долю в общем объеме зерновых культур. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединенных Наций (ФАО) и Росстата, общая площадь посевов озимой пшеницы в мире составляет порядка 220–230 млн га, что эквивалентно примерно 15–17 % от всех пахотных земель. Средняя урожайность озимой пшеницы в мире варьируется в пределах 3,5–4,0 т/га, однако в ведущих странах-производителях этот показатель значительно выше. Так, в тройку лидеров по возделыванию озимой пшеницы входят Китай, Индия и Россия. В Китае средняя урожайность достигает 5,5–6,0 т/га, в Индии – 3,0–3,5 т/га, а в России – 3,5–4,0 т/га¹ [13].

Российская Федерация является одним из крупнейших мировых производителей озимой пшеницы. По данным Росстата, в 2025 году посевные площади озимой пшеницы в России составили около 16,4 млн га, это примерно 10 % от общей площади пахотных земель страны и около 8–9 % от мировых посевов озимой пшеницы².

Особое место в производстве озимой пшеницы в России занимает Ставропольский край. Этот регион благодаря благоприятным агроклиматическим условиям и плодородным почвам является одним из ведущих производителей зерна в стране [6].

По данным Росстата, в Ставропольском крае в 2025 году под озимую пшеницу было отведено около 1,8 млн га, что составляет примерно 11 % от всех посевов озимой пшеницы в России и около 1,0 % от мировых посевов. Средняя урожайность озимой пшеницы в Ставропольском крае традиционно превышает среднероссийские показатели, достигая 4,5–7,0 т/га и выше, что обусловлено высокой культурой земледелия и активным применением современных агротехнологий³.

Ключевым фактором, определяющим продуктивность агроценозов, является плодородие почв, в частности, содержание в них основных элементов питания растений – азота, фосфора и калия. Черноземы, занимающие значительные площади в мире, России и Ставропольском крае, по праву считаются одними из самых плодородных почв. В мировом масштабе черноземы распространены на площади около 725 млн га. В России черноземы занимают около 327 млн га, являясь основой для сельскохозяйственного производства. В Ставропольском крае черноземы представлены на площади около 3,5 млн га, что составляет примерно 50 % от общей площади края и около 1,1 % от всех черноземов России [1, 2, 11].

Однако, несмотря на высокое естественное плодородие черноземов, интенсивное земледелие, нерациональное использование почв и недостаток питательных веществ приводят к постепенному снижению их продуктивности. Для поддержания и повышения урожайности сельскохозяйственных культур, а также улучшения их качественных показателей необходимо комплексное применение агротехнических приемов, включая внесение минеральных удобрений [3, 5, 10, 12].

¹<https://svoefermerstvo.ru/analytics/top-6-samyh-populyarnyh-selhozkultur-v-rossii> (дата обращения: 01.03.2026 г.)

²https://www.technoexport.ru/products/selskoe-hozyaistvo/?utm_source (дата обращения: 01.03.2026 г.)

³<https://26.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/> (дата обращения: 01.03.2026 г.)

В связи с чем **цель** проводимых исследований заключалась в изучении влияния норм минеральных удобрений на динамику содержания макроэлементов в черноземе обыкновенном, урожайность и качество зерна сортов озимой пшеницы. В **задачи** исследований входило: изучить влияние агрохимикатов на динамику макроэлементов в черноземе обыкновенном; установить влияние норм минеральных удобрений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент проводился в 2023–2025 гг. в ООО СХП «Племзавод «Кубань» Кочубеевского муниципального округа Ставропольского края в зоне неустойчивого увлажнения (среднеогололетние осадки – 526 мм, среднегодовая температура – 9,4 °С). Погодные условия периода исследований отличались по количеству осадков, в 2023–2024 с.-х. году они были ниже на 131 мм, а в 2024–2025 с.-х. году, наоборот, выше на 12 мм. Температурный режим повышен в оба года закладки эксперимента на 1,8–3,3 °С. Оптимальным для развития озимой пшеницы оказался 2024–2025 с.-х. год.

Почва участка – чернозем обыкновенный (0–20 см) с рН – 7,8 ед. (слабощелочная), содержанием органического вещества – 4,77 % (среднее), нитратного азота – 15,4 мг/кг (среднее), подвижного фосфора – 23,3 мг/кг (среднее), подвижного калия – 287 мг/кг (повышенное).

Объект исследований – сорта озимой пшеницы Школа и Цаца. **Предмет исследований** – нормы минеральных удобрений. **Предшественник** – соя. Опыт двухфакторный: **фактор А** – норма минеральных удобрений, **фактор В** – сорта озимой пшеницы Школа, Цаца. Схема двухфакторного опыта заложена в производственных условиях, повторность опыта 3-кратная, площадь одной делянки: ширина – 25 м, длина – 30 м, общая S делянки – 750 м².

Контроль – без применения удобрений. Рекомендованная норма минеральных удобрений (N₂₁₅P₆₅) предложенная учеными СтГАУ для зоны неустойчивого увлажнения, предусматривает внесение под основную обработку почв аммофоса 80 кг/га (N₁₀P₄₃) и с посевом 45 кг/га аммофоса (N₅P₂₂), три подкормки: первая в фазу кущения 200 кг/га аммиачной селитры (N₆₉), вторая в фазу выхода в трубку 200 кг/га (N₆₉), третья в фазу колошения 195 кг/га КАС (N₆₂). Расчетная норма минеральных удобрений на планируемую урожайность 10,5 т/га (N₂₅₇P₁₃₅K₇₅) рассчитана по методике ученых кафедры агрохимии и физиологии растений [8], предусматривает внесение под основную обработку почвы калия хлористого 125 кг/га (K₇₅) + аммофоса 100 кг/га (N₁₂P₅₂), при посеве аммофоса кг/га 158 кг/га (N₁₉P₈₃), три подкормки: первая в фазу кущения 269 кг/га аммиачной селитры (N₉₃), вторая в фазу выхода в трубку 200 кг/га (N₆₉), третья в фазу колошения 200 кг/га КАС (N₆₄).

Сорта озимой пшеницы Школа и Цаца – это сорта мягкой озимой пшеницы селекции Национального центра зерна им. П. П. Лукьяненко (Краснодар), отличающиеся высокой урожайностью, хорошими хлебопекарными качествами и адаптацией к условиям Центрально-Черноземного и Северо-Кавказского регионов РФ.

Сорт Школа – полукарликовый (высота 75–89 см), среднеранний (вегетационный период 209–307 дней) с массой 1000 семян 37–48 г. Характеризуется высокой устойчивостью к полеганию и осыпанию, морозостойкостью (выше сортов Гром и Безостая 100), засухо- и жаростойкостью. Устойчив к бурой ржавчине и мучнистой росе, умеренно устойчив к септориозу и желтой ржавчине. Потенциал урожайности – до 120 ц/га (максимальная зафиксированная урожайность – 119,8 ц/га). Относится к «сильной» пшенице с отличными

мукомольно-хлебопекарными качествами. Рекомендован для Курской, Липецкой, Орловской, Ростовской областей, Карачаево-Черкесской Республики, Краснодарского края, Ставропольского края и Республики Калмыкия.

Сорт Цаца – короткостебельный (высота 80–100 см), среднеранний сорт с крупным пирамидальным колосом (длина 9–13 см) и крупным красным зерном яйцевидной формы. Отличается устойчивостью к полеганию и осыпанию зерна при перестое на корню, высокой засухоустойчивостью, устойчивостью к бурой и желтой ржавчине, мучнистой росе; среднеустойчив к септориозу, фузариозу колоса и вирусам. Морозостойкость средняя. Потенциал зерновой продуктивности – свыше 115 ц/га (максимальная урожайность – 115 ц/га в 2019 году). Соответствует требованиям к «ценной» пшенице, создан для возделывания по фузариозоопасному предшественнику. Норма высева – 3,5–4,0 млн всхожих семян на 1 га. Рекомендован для Центрально-Черноземного и Северо-Кавказского регионов. Оба сорта эффективно возделываются на высоком агрофоне.

Определение в черноземе обыкновенном нитратного азота осуществлялось ионометрическим методом (ГОСТ 26951-86), подвижных форм фосфора и калия – по методу Мачигина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91), урожайность определялась по методике Госсортоиспытания 2019 года, показатели качества устанавливались по ГОСТам 10846 – 91 (белок) и 13586.1 – 68 (массовая доля клейковины).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С применением норм минеральных удобрений количество в черноземе обыкновенном нитратного азота по сравнению с контролем достоверно возросло на 10,3–13,4 мг/кг. Существенных изменений в почве по его количеству на двух изучаемых сортах не отмечалось: так сорт Цаца потреблял на 0,7 мг/кг нитратного азота больше, чем Школа. Пик содержания элемента приходился на фазу кущения (29,4 мг/кг), далее к фазе полной спелости его уровень снижался на 8,2 мг/кг, что связано с потреблением элемента растениями и с погодными условиями (табл. 1).

Таблица 1. Влияние норм минеральных удобрений на динамику содержания нитратного азота в почве в посевах сортов озимой пшеницы, мг/кг (среднее за 2023–2025 гг.)

Table 1. Effect of mineral fertilizer rates on the dynamics of soil nitrate nitrogen content during winter wheat cultivation, mg/kg (2023–2025 average)

Норма удобрения, А	Сорт озимой пшеницы, В	Сроки отбора, С					А, НСР ₀₅ = 1,42	В, НСР ₀₅ = 1,20
		всходы	кущение	выход в трубку	колошение	полная спелость		
Контроль (без удобрений)	Школа	6,7	21,0	22,3	15,2	12,4	15,3	23,5
	Цаца	6,4	20,7	21,8	14,7	11,8		22,8
Рекомендованная (N ₂₁₅ P ₆₅)	Школа	15,8	32,6	30,4	25,5	24,6	25,6	
	Цаца	15,3	32,1	30,0	25,0	24,2		
Расчетная на планируемую урожайность 10,5 т/га (N ₂₅₇ P ₁₃₅ K ₇₅)	Школа	19,1	35,3	34,7	29,5	27,6	28,7	
	Цаца	18,6	34,6	33,2	28,1	26,7		
С, НСР ₀₅ = 1,88		13,7	29,4	28,7	23,0	21,2	НСР ₀₅ = 2,44	

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, можно уверенно утверждать, что расчетная норма удобрений ($N_{257}P_{135}K_{75}$) оказалась наиболее эффективной для поддержания более высокого уровня нитратного азота в почве в течение вегетации, а сорт Цаца проявил большую отзывчивость на внесение удобрений по сравнению с сортом Школа.

Табл. 2 свидетельствует, что на всех вариантах с внесением удобрений содержание подвижного фосфора достоверно превышало показатели контрольного варианта на 7,8–14,1 мг/кг. Наибольшие значения были зафиксированы с применением расчетной нормы удобрений: для сорта Школа – 27,5–46,7 мг/кг, для сорта Цаца – 27,1–46,2 мг/кг. Сорт Цаца демонстрировал большее потребление подвижного фосфора из почвы, нежели Школа, но разница была несущественной – 0,3 мг/кг.

Наблюдалась общая тенденция постепенного снижения содержания подвижного фосфора, начиная от фазы всходов к фазе полной спелости, при этом достоверным оно было в межфазные периоды кущение-выход в трубку – 5,8 мг/кг, выход в трубку-колошение – 3,6 мг/кг, колошение-полная спелость – 3,4 мг/кг, что обусловлено потреблением элемента растениями.

Таблица 2. Влияние норм минеральных удобрений на динамику содержания подвижного фосфора в почве в посевах сортов озимой пшеницы, мг/кг (среднее за 2023–2025 гг.)

Table 2. Effect of mineral fertilizer rates on the dynamics of soil mobile phosphorus content during winter wheat cultivation, mg/kg (2023–2025 average)

Норма удобрения, А	Сорт озимой пшеницы, В	Сроки отбора, С					А, НСР ₀₅ = 2,04	В, НСР ₀₅ = 1,02
		всходы	кущение	выход в трубку	колошение	полная спелость		
Контроль (без удобрений)	Школа	28,1	27,3	23,1	21,3	17,2	23,3	30,7
	Цаца	27,8	27,0	22,8	20,9	17,0		30,4
Рекомендованная ($N_{215}P_{65}$)	Школа	40,3	35,8	29,7	26,3	24,4	31,1	
	Цаца	39,9	35,4	29,2	26,0	23,9		
Расчетная на планируемую урожайность 10,5 т/га ($N_{257}P_{135}K_{75}$)	Школа	46,7	44,5	37,3	31,7	27,5	37,4	
	Цаца	46,2	44,1	37,0	31,4	27,1		
С, НСР ₀₅ = 2,86		38,2	35,7	29,9	26,3	22,9	НСР ₀₅ = 3,24	

Табл. 3 показывает, что использование минеральных удобрений оказывало не одностороннее воздействие на количество подвижного калия в 0–20 см слое почвы по сравнению с контролем: так, рекомендованная норма достоверно снижала его содержание на 5 мг/кг, расчетная существенно увеличивала на 20 мг/кг, что обусловлено либо присутствием, либо отсутствием калия в применяемой норме. Максимальные значения отмечены при использовании расчетной нормы ($N_{257}P_{135}K_{75}$) на сорте Школа – 271–347 мг/кг, сорте Цаца – 267–343 мг/кг. Разница в потреблении подвижного калия из почвы изучаемыми сортами недостоверна (на 4 мг/кг).

В фазу всходов зафиксированы наивысшие показатели содержания подвижного калия – 328 мг/кг, а далее его неуклонное снижение до 258 мг/кг. Сокращение элемента обусловлено его естественным выносом формирующимся урожаем.

Таблица 3. Влияние норм минеральных удобрений на динамику содержания подвижного калия в почве в посевах сортов озимой пшеницы, мг/кг (среднее за 2023–2025 гг.)**Table 3.** Effect of mineral fertilizer rates on the dynamics of soil available potassium content during winter wheat cultivation, mg/kg (2023–2025 average)

Норма удобрения, А	Сорт озимой пшеницы, В	Сроки отбора, С					А, НСР ₀₅ = 16,8	В, НСР ₀₅ = 10,2
		всходы	кущение	выход в трубку	колошение	полная спелость		
Контроль (без удобрений)	Школа	320	314	289	263	259	287	294
	Цаца	318	310	285	259	254		290
Рекомендованная (N ₂₁₅ P ₆₅)	Школа	322	313	274	260	251	282	
	Цаца	319	307	267	255	248		
Расчетная на планируемую урожайность 10,5 т/га (N ₂₅₇ P ₁₃₅ K ₇₅)	Школа	347	338	310	280	271	307	
	Цаца	343	332	304	275	267		
С, НСР ₀₅ = 18,4		328	319	288	265	258	НСР ₀₅ = 30,8	

Нормы минеральных удобрений демонстрировали с их повышением существенное увеличение по сравнению с контролем урожайности озимой пшеницы на 2,53 и 4,01 т/га. При сравнении сортов установлено, что значительное преимущество по показателю продуктивности имел сорт озимой пшеницы Цаца, его средняя урожайность составила 7,88 т/га, что оказалось достоверно выше по сравнению с сортом Школа. Самая высокая урожайность была получена на варианте с применением расчетной нормы минеральных удобрений на планируемую урожайность 10,5 т/га (N₂₅₇P₁₃₅K₇₅) – 9,87 т/га с недобором к целевому показателю на 0,72 т/га, на что воздействовали погодные условия в годы проведения исследований (табл. 4).

Таблица 4. Влияние норм минеральных удобрений на урожайность сортов озимой пшеницы (среднее за 2024–2025 гг.)**Table 4.** Effect of mineral fertilizer rates on the grain yield of winter wheat cultivars, t/ha (2024–2025 average)

Норма удобрения, А	Сорт озимой пшеницы, В		А, НСР ₀₅ = 0,48
	Школа	Цаца	
Контроль (без удобрений)	5,05	5,55	5,30
Рекомендованная (N ₂₁₅ P ₆₅)	7,43	8,23	7,83
Расчетная на планируемую урожайность 10,5 т/га (N ₂₅₇ P ₁₃₅ K ₇₅)	8,75	9,87	9,31
В, НСР ₀₅ = 0,36	7,08	7,88	НСР ₀₅ = 0,78

Эксперимент выявил достоверное положительное влияние минеральных удобрений на качество зерна озимой пшеницы – содержание клейковины и белка. Эффект зависел как от нормы внесения удобрений, так и от сортовых особенностей культуры. На варианте без

применения удобрений (контроле) показатели качества были наименьшими, содержание клейковины – 19,1 % у сорта Школа и 20,0 % у сорта Цаца, белка – 11,9 % и 12,2 % соответственно. Применение рекомендованной нормы удобрений ($N_{215}P_{65}$) существенно улучшило качество зерна. Содержание клейковины выросло до 22,7 % (Школа) и 23,3 % (Цаца), уровень белка увеличился до 17,3 % и 17,9 % соответственно. Наилучшие результаты получены при использовании расчетной нормы $N_{257}P_{135}K_{75}$, содержание клейковины – 23,2 % (Школа) и 24,0 % (Цаца), концентрация белка составила 17,8 % и 18,4 % соответственно. При сравнении сортов по показателям качества достоверных изменений не выявлено (табл. 5).

Таблица 5. Влияние норм минеральных удобрений на показатели качества зерна озимой пшеницы (среднее за 2024–2025 гг.)

Table 5. Effect of mineral fertilizer rates on winter wheat grain quality attributes (2024–2025 average)

Норма удобрения, А	Сорт озимой пшеницы, В	Клейковина, %	Белок, %
Контроль (без удобрений)	Школа	19,1	11,9
	Цаца	20,0	12,2
Рекомендованная ($N_{215}P_{65}$)	Школа	22,7	17,3
	Цаца	23,3	17,9
Расчетная на планируемую урожайность 10,5 т/га ($N_{257}P_{135}K_{75}$)	Школа	23,2	17,8
	Цаца	24,0	18,4
НСР ₀₅ фактор А		1,48	1,08
НСР ₀₅ фактор В		0,80	0,82
НСР ₀₅ взаимодействие АВ		2,26	1,88

ВЫВОДЫ

В ходе опыта было установлено, что применение минеральных удобрений достоверно повышало содержание нитратного азота в черноземе обыкновенном на 10,3–13,4 мг/кг относительно контроля. Пик концентрации этого элемента приходился на фазу кушения (29,4 мг/кг), а к фазе полной спелости уровень снижался на 8,2 мг/кг. Это связано с потреблением азота растениями и влиянием погодных условий. Внесение минеральных удобрений приводило к достоверному увеличению содержания подвижного фосфора в почве, показатели превышали контроль на 7,8–14,1 мг/кг. Максимальные значения зафиксированы при использовании расчетной нормы ($N_{257}P_{135}K_{75}$) для сорта Школа – 27,5–46,7 мг/кг, для сорта Цаца – 27,1–46,2 мг/кг. Наблюдалось постепенное снижение концентрации фосфора от всходов к полной спелости. Влияние минеральных удобрений на содержание подвижного калия в почве различалось в зависимости от применяемой нормы. Рекомендованная норма ($N_{215}P_{65}$) снижала его содержание на 5 мг/кг по сравнению с контролем, тогда как расчетная норма ($N_{257}P_{135}K_{75}$) существенно увеличивала на 20 мг/кг. Сортные особенности существенного влияния на потребление макроэлементов из почвы не оказывали.

Минеральные удобрения достоверно повышали урожайность озимой пшеницы на 47–76 % в зависимости от нормы внесения. Сорт Цаца проявил более высокую отзывчивость на внесение удобрений, что показало прибавку к контролю 4,32 т/га (78 %), тогда как у Школы – 3,70 т/га (73 %).

Изучаемые удобрения по сравнению с контрольным вариантом существенно улучшали качество зерна озимой пшеницы, повышали содержание клейковины (3,4–4,0 %)

и белка (5,5, 6,0%). Сорт Цаца стабильно превосходил Школу по качеству зерна, но не достоверно. Разница составляла 0,7 % по содержанию клейковины и 0,5 % по содержанию белка.

Обобщая вышеуказанные выводы, можно сформировать следующие краткие умозаключения: регулярный мониторинг агрохимических показателей необходим для оценки химического состава почвы, что позволит скорректировать систему питания культуры при необходимости; расчетная норма минеральных удобрений позволила добиться получения максимальной урожайности с оптимальным качеством зерна; оба изучаемых сорта показали положительную реакцию на внесение удобрений, однако сорт Цаца продемонстрировал большую отзывчивость, обеспечивая наибольший прирост урожайности и лучшее качество зерна. В связи с чем для зоны неустойчивого увлажнения на черноземе выщелоченном производстве можно порекомендовать к возделыванию сорт озимой пшеницы Цаца на фоне внесения нормы минеральных удобрений $N_{257}P_{135}K_{75}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ожередова А. Ю., Ситников В. Н., Есаулко А. Н. и др. Агрохимическое обследование почв. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2023. 508 с. ISBN: 978-5-9596-1915-2
2. Шеуджен А. Х., Нецадим Н. Н., Гайдукова Н. Г., Шабанова И. В. Влияние природных и антропогенных факторов на физико-химические свойства чернозема выщелоченного и его загрязнение тяжелыми металлами // Агрохимия. 2019. № 1. С. 19–28. DOI: 10.1134/S0002188119010095
3. Лукьянов В. А., Дудкина Т. А. Формирование биологического урожая озимой пшеницы при применении разных видов удобрений в Центрально-Черноземном регионе // Аграрная наука. 2025. № 8. С. 64–69. DOI: 10.32634/0869-8155-2025-397-08-64-69
4. Беляев А. И., Петров Н. Ю., Кузнецова Е. А. и др. Минеральное питание в вопросах роста урожайности озимой пшеницы на юге России // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2025. № 4(82). С. 13–20. DOI: 10.32786/2071-9485-2025-04-01
5. Нагайцев Д. В., Барнашова Е. К. Оценка качества зерна образцов коллекции озимой мягкой пшеницы в Московской сельскохозяйственной академии // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2025. № 2. С. 115–135. DOI: 10.26897/0021-342X-2025-2-115-135
6. Оганян Л. Р., Ерошенко Ф. В. Влияние агротехнических приемов на урожайность и качество зерна различных сортов озимой пшеницы // Сельскохозяйственный журнал. 2025. № 4(18). С. 57–67. DOI: 10.48612/FARC/2687-1254/006.4.18.2025
7. Ситников В. Н., Есаулко А. Н., Ожередова А. Ю. и др. Оптимизация минерального питания растений озимой пшеницы на основе комплексного применения макро- и микроудобрений на черноземе выщелоченном // Плодородие. 2023. № 4(133). С. 102–107. DOI 10.25680/S19948603.2023.133.25
8. Устименко Е. А., Есаулко А. Н., Голосной Е. В. и др. Программирование урожаев сельскохозяйственных культур. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2019. 180 с.
9. Ожередова А. Ю., Ситников В. Н., Есаулко А. Н. и др. Реализация потенциальной продуктивности озимой пшеницы за счет оптимизации минерального питания в динамических условиях внешней среды в почвенно-климатических зонах Центрального Предкавказья:

Рекомендации по практическому обоснованию применения норм минеральных удобрений под озимую пшеницу в трех почвенно-климатических зонах Центрального Предкавказья. Ставрополь: АГРУС, 2024. 56 с. EDN: MXAXHO

10. Цховребов В. С., Фаизова В. И., Цховребов С. В., Сенькова Л. А. Содержание элементов питания и урожайность озимой пшеницы на 12-й год последствий реминерализации чернозема выщелоченного // Земледелие. 2019. № 7. С. 12–14. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10702

11. Тавадов А. С., Ничипуренко Е. Н. Оценка влияния минеральных удобрений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы на фоне предшественника сахарной свеклы в Центрально-Черноземной зоне Кубани // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2025. № 42(205). С. 80–94. EDN: PCMLXH

12. Щукина В. А. Озимая пшеница в Краснодарском крае: агротехнические основы достижения высокой урожайности // Приднепровский научный вестник. 2025. Т. 9. № 1. С. 86–89.

REFERENCES

1. Ozheredova A.Yu., Sitnikov V.N., Esaulko A.N. et al. *Agrokhimicheskoye obsledovaniye pochv* [Agrochemical examination of soils]. Stavropol: Stavropol'skiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2023. 508 p. ISBN: 978-5-9596-1915-2. (In Russian)

2. Sheudzhen A.Kh., Neshchadim N.N., Gaidukova N.G., Shabanova I.V. Influence of natural and anthropogenic factors on physical and chemical properties of leached chernozem and its contamination with heavy metals. *Agrokhimia*. 2019. No. 1. Pp. 19–28. DOI: 10.1134/S0002188119010095. (In Russian)

3. Lukyanov V.A., Dudkina T.A. Formation of biological yield of winter wheat with the use of different types of fertilizers in the Central Black Earth Region. *Agrarian Science*. 2025. No. 8. Pp. 64–69. DOI: 10.32634/0869-8155-2025-397-08-64-69. (In Russian)

4. Belyaev A.I., Petrov N.Yu., Kuznetsova E.A. et al. The mineral nutrition in matters of the winter wheat yield in the south of Russia. *Proceeding of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2025. No. 4(82). Pp. 13–20. DOI: 10.32786/2071-9485-2025-04-01. (In Russian)

5. Nagaytsev D.V., Barnashova E.K. Grain quality assessment of winter soft wheat collection samples at Moscow Agricultural Academy. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 2. Pp. 115–135. DOI: 10.26897/0021-342X-2025-2-115-135. (In Russian)

6. Oganyan L.R., Eroshenko F.V. Influence of agricultural practices on the yield and grain quality of various winter wheat varieties. *Agricultural Journal*. 2025. No. 4(18). Pp. 57–67. DOI: 10.48612/FARC/2687-1254/006.4.18.2025. (In Russian)

7. Sitnikov V.N., Esaulko A.N., Ozheredova A.Yu. et al. Optimization of mineral nutrition of winter wheat plants based on the integrated application of macro- and micro-fertilizers on leached chernozem. *Plodorodie*. 2023. No. 4(133). Pp. 102–107. DOI: 10.25680/S19948603.2023.133.25. (In Russian)

8. Ustimenko E.A., Esaulko A.N., Golosnoy E.V. et al. *Programmirovaniye urozhayev sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Programming of Agricultural Crop Yields]. Stavropol: Stavropol'skiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2019. 180 p. (In Russian)

9. Ozheredova A.Yu., Sitnikov V.N., Esaulko A.N. et al. *Realizatsiya potentsial'noy produktivnosti ozimoy pshenitsy za schet optimizatsii mineral'nogo pitaniya v dinamicheskikh usloviyakh vneshney sredy v pochvenno-klimaticheskikh zonakh Tsentral'nogo Predkavkaz'ya: Rekomendatsii po prakticheskomu obosnovaniyu primeneniya norm mineral'nykh udobreniy pod*

ozimuyu pshenitsu v trekh pochvenno-klimaticheskikh zonakh Tsentral'nogo Predkavkaz'ya [Realization of potential productivity of winter wheat due to optimization of mineral nutrition under dynamic environmental conditions in the soil and climatic zones of the Central Ciscaucasia: Recommendations for the practical justification of the application of mineral fertilizer rates for winter wheat in three soil and climatic zones of the Central Ciscaucasia]. Stavropol: AGRUS, 2024. 56 p. EDN: MXAXHO. (In Russian)

10. Tskhovrebov V.S., Faizova V.I., Tskhovrebov S.V., Senkova L.A. The content of nutrients and yield of winter wheat in the twelfth year after remineralization of leached chernozem. *Zemledelie*. 2019. No. 7. Pp. 12–14. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10702. (In Russian)

11. Tavadov A.S., Nichipurenko E.N. Assessment of the influence of mineral fertilizers on the yield and grain quality of winter wheat against the background of sugar beet as a predecessor in the Central Black Earth zone of Kuban. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025. No. 42 (205). Pp. 80–94. EDN: PCMLXH. (In Russian)

12. Shchukina V.A. Winter wheat in Krasnodar Krai: agrotechnical foundations for achieving high yields. *Pridneprovskiy nauchnyy vestnik* [Pridneprovsky Scientific Bulletin]. 2025. Vol. 9. No. 1. Pp. 86–89. (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

Ожередова Алена Юрьевна, канд. с.-х. наук, доцент, заведующая кафедрой агрохимии и физиологии растений, Ставропольский государственный аграрный университет;

355017, Россия, г. Ставрополь, переулок Зоотехнический, 12;

alena.gurueva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6038-6409>, SPIN-код: 3968-8440

Ситников Владимир Николаевич, канд. с.-х. наук, доцент, ректор, Ставропольский государственный аграрный университет;

355017, Россия, г. Ставрополь, переулок Зоотехнический, 12;

rector@stgau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7557-555X>, SPIN-код: 6029-8733

Есаулко Александр Николаевич, д-р с.-х. наук, профессор кафедры агрохимии и физиологии растений, профессор РАН, директор Института агробиологии и природных ресурсов, Ставропольский государственный аграрный университет;

355017, Россия, г. Ставрополь, переулок Зоотехнический, 12;

aesaulko@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0441-9055>, SPIN-код: 5497-6339

Бородин Вадим Алексеевич, магистр Института агробиологии и природных ресурсов, Ставропольский государственный аграрный университет;

355017, Россия, г. Ставрополь, переулок Зоотехнический, 12;

borodinvadja126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6279-3711>

Азарова Маргарита Юрьевна, ст. преподаватель кафедры агрохимии и физиологии растений, Ставропольский государственный аграрный университет;

355017, Россия, г. Ставрополь, переулок Зоотехнический, 12;

azarova778@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7109-1227>, SPIN-код: 6737-8380

Information about the authors

Alena Yu. Ozheredova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Agrochemistry and Plant Physiology, Stavropol State Agrarian University;

12, Zootechnicheskiy lane, Stavropol, 355017, Russia;

alena.gurueva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6038-6409>, SPIN-code: 3968-8440

Vladimir N. Sitnikov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Stavropol State Agrarian University;

12, Zootechnicheskiy lane, Stavropol, 355017, Russia;

rector@stgau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7557-555X>, SPIN-code: 6029-8733

Aleksandr N. Esaulko, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Department of Agrochemistry and Plant Physiology, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute of Agrobiology and Natural Resources), Stavropol State Agrarian University;

12, Zootechnicheskiy lane, Stavropol, 355017, Russia;

aesaulko@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0441-9055>, SPIN-code: 5497-6339

Vadim A. Borodin, Master's Student, Institute of Agrobiology and Natural Resources, Stavropol State Agrarian University;

12, Zootechnicheskiy lane, Stavropol, 355017, Russia;

borodinvadja126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6279-3711>

Margarita Yu. Azarova, Senior Lecturer, Department of Agrochemistry and Plant Physiology, Stavropol State Agrarian University;

12, Zootechnicheskiy lane, Stavropol, 355017, Russia;

azarova778@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7109-1227>, SPIN-code: 6737-8380

Биометрическое обоснование эффективности роботизированной СВЧ-системы предпосевной обработки почвы: вегетационный опыт с кукурузой

Марат А. Шереужев^{✉ 1, 2}, Мадин А. Шереужев^{✉ 3}, А. Ю. Кишев¹

¹Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова
360030, Россия, Нальчик, проспект Ленина, 1в

²Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

³Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5

Аннотация. Статья посвящена повторному вегетационному опыту верификации агрономической пригодности СВЧ-воздействия на почву перед посевом кукурузы.

Цель исследований – верификация агрономической пригодности предпосевной СВЧ-обработки почвы перед посевом кукурузы. Необходимость повторного вегетационного опыта обусловлена методическими изъянами первоначального исследования (Шереужев и др., 2025), в котором доминировали качественные шкалы, а урожайные параметры оценивались на единичных початках без повторностей.

Материалы и методы исследования. Каждый из трех вариантов обработки почвы (механический контроль, паровой прогрев, микроволновое облучение) заложен в трехкратной повторности; для всех растений проведены биометрические замеры – сухая масса надземных органов, подсчет сформированных листьев, оценка ассимиляционной поверхности, а початки охарактеризованы средними по лотку (масса, длина, диаметр, число зерен). Дисперсионным анализом с попарными сравнениями проверена статистическая достоверность.

Результаты. Полученный результат на образце почвы после микроволновой обработки превзошел необработанный вариант по сухой биомассе, по листовой площади, по средней массе початка, по количеству зерен; засоренность сорняками существенно сократилась. Корреляция между плотностью сорного ценоза и биомассой культуры указывает на опосредованный механизм действия СВЧ-обработки через подавление конкурентов основной культуры.

Выводы. В рамках эксперимента получены числовые данные, которые представляют собой агрономическое техническое задание для конструирования роботизированного СВЧ-аппликатора для предпосевной обработки почвы. Применение роботизированного СВЧ-аппликатора может позволить существенно снизить использование гербицидов.

Ключевые слова: микроволновая обработка почвы, СВЧ-стерилизация, биометрический анализ, вегетационный опыт, кукуруза, засоренность сорняками, роботизированный аппликатор, надземная биомасса, площадь листьев, число зерен

Поступила 23.03.2026, одобрена после рецензирования 28.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Шереужев Марат А., Шереужев Мадин А., Кишев А. Ю. Биометрическое обоснование эффективности роботизированной СВЧ-системы предпосевной обработки почвы: вегетационный опыт с кукурузой // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 165–180. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-165-180

Biometric substantiation of the efficacy of pre-sowing microwave soil treatment: a pot experiment using maize

Marat A. Shereuzhev^{✉ 1, 2}, Madin A. Shereuzhev^{✉ 3}, A.Yu. Kishev¹

¹Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov
360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue

²Institute 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

³Bauman Moscow State Technical University
5, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia

Abstract. The article presents a repeated pot experiment aimed at verifying the agronomic feasibility of pre-sowing soil microwave treatment for maize cultivation.

Aim. This study aims to evaluate the technical and biological efficacy of utilizing microwave energy during early-stage soil preparation for maize. The necessity of a repeated pot experiment stems from methodological shortcomings in the initial study (Shereuzhev et al., 2025), which relied predominantly on qualitative scales and assessed yield parameters using individual ears without replication.

Materials and methods. Each of the three soil treatments (mechanical control, steam heating, and microwave irradiation) was performed in three replications. All plants underwent biometric measurements, including aboveground dry biomass, leaf count, and assimilation surface area. Ears were characterized by tray-average values for weight, length, diameter, and grain number per ear. Statistical significance was verified using analysis of variance with pairwise comparisons.

Results. Plants grown in the microwave-treated soil outperformed those in the untreated control in terms of aboveground dry biomass, leaf area, average ear weight, and grain count, while weed infestation was substantially reduced. The correlation between weed population density and crop biomass suggests an indirect mechanism of microwave action, where the suppression of competitors subsequently benefits the main crop.

Conclusions. The experiment yielded quantitative data that provide agronomic specifications for engineering a robotic microwave applicator for pre-sowing soil treatment. Implementing this robotic microwave applicator could significantly reduce herbicide dependency.

Keywords: microwave soil treatment, MW sterilization, biometric analysis, vegetation experiment, maize, weed infestation, robotic applicator, above-ground biomass, leaf area, kernel count

Submitted 23.03.2026,

approved after reviewing 28.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Shereuzhev Marat A., Shereuzhev Madin A., Kishev A.Yu. Biometric substantiation of the efficacy of pre-sowing microwave soil treatment: a pot experiment using maize. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 165–180. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-165-180

ВВЕДЕНИЕ

Засоренность посевов сорными растениями остается одной из главных причин потерь урожая: по данным ФАО, сорняки снижают сборы зерновых на 25–40 %, а в ряде регионов – до 70 % [1]. Традиционная химическая защита сопряжена с рисками загрязнения почвенно-грунтовых вод, накоплением резистентных биотипов и угрозой здоровью населения [2]. Как показано в концептуальном анализе Ю. Х. Хамукова и М. А. Каноковой [3],



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

многократная вспашка выступает антропогенным фактором деградации агроэкосистем, нарушая структуру почвенного биоценоза и стимулируя вторичное засорение. Это обосновывает необходимость перехода к физическим, нехимическим и минимально инвазивным методам предпосевной подготовки почвы.

Одним из наиболее перспективных физических методов является воздействие на почву микроволновым (СВЧ) излучением. При частоте 2,45 ГГц электромагнитная энергия поглощается молекулами воды почвы – происходит быстрый диэлектрический нагрев, приводящий к термической гибели семян сорняков, патогенных грибов и нематод без химических агентов [4–7]. Концепция устройства для предпосевной подготовки почвы СВЧ-излучением была сформулирована в работе [8], где обоснована принципиальная схема роботизированного аппликатора, позволяющего заменить гербицидную обработку направленным электромагнитным воздействием.

Авторами ранее проведен предварительный вегетационный эксперимент [9], в котором была показана эффективность СВЧ-обработки по сравнению с паровым и контрольным вариантами. Однако тот опыт имел ряд существенных методических ограничений, снижающих доказательную силу выводов и не позволяющих использовать полученные данные как надежное агрономическое техническое задание для проектирования роботизированной системы. Эти ограничения обсуждаются ниже и послужили основанием для планирования настоящего повторного эксперимента с полным комплексом биометрических измерений.

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОВТОРНОГО ОПЫТА

В работе [9] был выполнен вегетационный эксперимент с четырьмя вариантами обработки почвы (контроль, пар, пар + СВЧ, только СВЧ). Основные результаты продемонстрировали подавление сорной растительности в образцах с микроволновой обработкой и визуально более интенсивный рост кукурузы. Вместе с тем необходимо отметить следующие методические недостатки.

1. Преобладание качественных оценок. В таблице результатов первого опыта [9, табл. 2] большинство параметров представлены качественными категориями («много», «умеренно», «нет»; «низкая», «средняя», «высокая»), что не позволяет провести полноценный статистический анализ и затрудняет воспроизводимость выводов.

2. Отсутствие повторностей. Каждый вариант обработки был представлен единственным коробом, что исключает оценку внутривариантной вариабельности и расчет стандартных ошибок. Без повторностей невозможно проверить достоверность различий между вариантами [14].

3. Отсутствие биометрических измерений растений. Не проводились количественные измерения надземной биомассы, числа и площади листьев, которые являются стандартными показателями продуктивности сельскохозяйственных культур. Высота растений на 30-й день оценивалась только качественно.

4. Некорректное сравнение урожая. Сравнивались единичные початки, а не средние показатели по образцам. Отсутствовал протокол отбора – не было указано, каким образом выбирались початки для сравнения (лучшие, худшие, случайные). Без обоснованного метода отбора и усреднения выводы об урожайности не могут считаться статистически обоснованными.

5. Смещение факторов. Наличие четвертого варианта (пар + СВЧ) затруднило интерпретацию результатов, поскольку различия между образцами (в) и (г) были минимальными, а дополнительный фактор увеличил объем наблюдений без существенного прироста информативности.

Сопоставление методик первого и повторного экспериментов представлено на табл. 1.

Таблица 1. Сопоставление методик первого и повторного эксперимента: ключевые отличия и получаемые преимущества

Table 1. Methodological differences and operational advantages between the initial and repeated experiments

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Преимущество нового эксперимента
Повторности	1 (без повторностей)	3 повторности в 3 вариантах	Расчет SE, ANOVA
Варианты	4 варианта (избыточно)	3 варианта (упрощенно)	Факторный анализ
Оценки	Качественные	Количественные	Статистическая воспроизводимость
Биометрия	Отсутствует	Биомасса, число листьев, площадь листьев	Прирост в %
Початки	Единичный отбор	Все початки	Устранение ошибки отбора
Статистика	Нет	ANOVA+Тьюки ($p < 0,05$)	Достоверность различий

Выявленные недостатки определили требования к повторному эксперименту: трехкратная повторность каждого варианта; переход от четырех к трем вариантам обработки для упрощения факторного анализа; количественные биометрические измерения на всех этапах вегетации; обоснованный протокол отбора и усреднения данных по початкам; применение дисперсионного анализа (ANOVA) с критерием множественных сравнений Тьюки [14].

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИНЖЕНЕРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Физические принципы СВЧ-обработки почвы

Взаимодействие СВЧ-излучения с почвой описывается уравнением теплопереноса (1) с источником диэлектрических потерь (2) и экспоненциальным затуханием поля по глубине (3) – рис. 1. Для влажного суглинка (18–20 %) при частоте 2,45 ГГц глубина проникновения $\delta = 1/\alpha \approx 25$ мм; не менее 95 % энергии поглощается в слое 0–50 мм. Это соответствует зоне наибольшей концентрации семян сорняков (0–40 мм) и создает физическую основу для избирательного воздействия без повреждения культурных растений, высеванных глубже [3, 8].

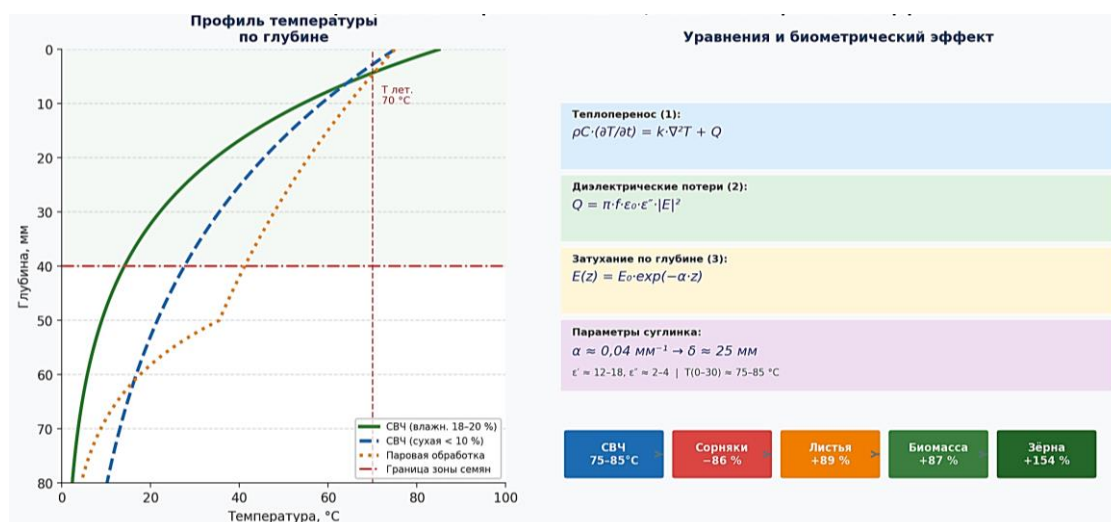


Рис. 1. Физические принципы СВЧ-обработки почвы: профиль температуры по глубине, уравнения процесса и цепочка биометрического эффекта

Fig. 1. Physical principles of microwave soil treatment: temperature profile vs. soil depth, process modeling, and the biometric response pathway

Концепция роботизированного аппликатора

Проектируемый мобильный комплекс (рис. 2) объединяет четыре функциональных блока: магнетронный генератор, волноводный излучатель типа «гребенка», автономное колесное шасси с GPS/RTK-навигацией и модуль экранирования, гарантирующий соблюдение предельно допустимых уровней плотности потока энергии по нормативам СанПиН [8, 13]. Ключевые проектные параметры системы сведены в таблице 2.

Таблица 2. Проектные параметры роботизированного СВЧ-аппликатора

Table 2. Design parameters of the robotic microwave applicator Technical specifications and design parameters of the robotic microwave applicator

Параметр	Лабораторный прототип	Полевой вариант
Мощность магнетрона	800 Вт	8–12 кВт
Частота излучения	2,45 ГГц	2,45 ГГц
Тип аппликатора	гребенка, одномодульный	гребенка / щелевой, многомодульный
Ширина захвата	0,2 м (одна позиция)	0,5 м
Время экспозиции на позицию	120 с/дм ²	2–4 с/дм ² (при движении)
Удельная доза	≈ 96 кДж/дм ²	90–100 кДж/дм ²
Рабочая скорость	стационарно	0,3–0,5 м/с
Глубина прогрева (0–30 мм)	75–85 °С	75–90 °С (целевая)

В лабораторном прототипе облучение проводилось стационарно: магнетрон мощностью 800 Вт экспонировал каждую позицию площадью 1 дм² на протяжении 120 секунд, обеспечивая суммарный энерговклад около 96 кДж/дм². В полевом варианте аналогичная доза достигается при непрерывном перемещении аппликатора со скоростью 0,3–0,5 м/с за счет многократного увеличения мощности генератора (до 8–12 кВт).



Рис. 2. Концептуальная схема роботизированного СВЧ-аппликатора для предпосевной обработки почвы [8]

Fig. 2. Conceptual design of the robotic microwave applicator for pre-sowing soil treatment [8]

Оценка энергозатрат

При удельной дозе 96 кДж/дм² (= 9,6 МДж/м²) и обработке одного гектара расход энергии составляет 96 000 МДж/га. Однако полевой режим предполагает обработку полос шириной 0,5 м с междурядьем 0,7 м, т. е. фактически облучаемая доля поверхности составляет

около 70 %. С учетом КПД магнетрона (~65 %) реальное потребление электроэнергии оценивается в 40–60 МДж/га, что соответствует 11–17 кВт·ч/га. При тарифе электроэнергии 6 руб./кВт·ч стоимость обработки составит 66–100 руб./га – величина, пренебрежимо малая в сравнении с дополнительной выручкой от прироста урожая в 3,6 т/га (по ценам кукурузы ~12 000 руб./т это около 43 200 руб./га). Таким образом, энергетическая рентабельность СВЧ-метода выглядит весьма привлекательной, хотя окончательная оценка возможна лишь по результатам полевых испытаний.

Задачей описываемого вегетационного эксперимента является получение количественных агрономических данных, которые лягут в основу технического задания на такой аппликатор.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема эксперимента

Вегетационный опыт проведен в деревянных лотках размером $1,2 \times 0,4 \times 0,25$ м по 3 повторности каждого варианта, итого 9 лотков. Гибрид – Краснодарский 385 МВ; норма посева – 6 семян на погонный метр, расстояние между растениями 20 см, глубина заделки 5–6 см. Почва – тяжелый суглинок (Апах 0–25 см, влажность 18–20 %), начальная засоренность – ~3 200 шт. семян/м² (*Portulaca oleracea*, *Chenopodium album*).

Применены три варианта обработки: (1) контроль – механическое рыхление на глубину 10–12 см; (2) паровая обработка – пар при температуре 100 °С в течение 30 мин., глубина воздействия 0–50 мм; (3) СВЧ – магнетрон 800 Вт / 2,45 ГГц, экспозиция – 120 с/дм², суммарная доза – ~96 кДж/дм², нагрев слоя 0–30 мм до 75–85 °С (верифицировано термопарами).

Протокол биометрических измерений

На 14-е, 28-е, 35-е и 45-е сутки после посева в каждом лотке проводились следующие измерения.

Всхожесть определялась как процент взошедших семян от общего числа высеванных в каждом лотке.

Высота растений (см): измерялась от поверхности почвы до верхушки самого высокого листа у 5 случайно выбранных растений в каждом лотке. Отбор проводился методом систематической случайной выборки: первое растение выбиралось случайно, последующие – через равные интервалы вдоль ряда.

Число листьев (шт./растение): подсчитывалось на тех же 5 растениях. Учитывались полностью развернувшиеся листья с видимым лигулем.

Площадь листовой поверхности (см²/растение): определялась на тех же 5 растениях методом линейных измерений по формуле Montgomery [10]:

$$S = L \times W \times 0,75,$$

где L – длина листа от лигулы до верхушки (см), W – максимальная ширина листа (см), 0,75 – поправочный коэффициент для кукурузы. Суммарная площадь рассчитывалась как сумма по всем листьям растения.

Надземная биомасса (г/растение): определялась на 45-е сутки путем срезания надземной части на уровне почвы с последующим высушиванием при 65 °С до постоянной массы и взвешиванием на лабораторных весах (точность 0,1 г). Измерение проведено для 3 растений из каждого лотка.

Засоренность (шт./м²): определялась подсчетом сорных растений в учетной рамке 0,1 м² в каждом лотке на 14-е, 28-е, 35-е и 45-е сутки.

Протокол оценки урожая

Уборка проведена на ~98-е сутки после посева. Для каждого лотка собраны все початки. Измеряемые показатели початков: длина (см) – от основания до верхушки по

линейке; диаметр (мм) – в средней трети початка штангенциркулем; масса (г) – на лабораторных весах (точность 0,1 г); число зерен – путем подсчета рядов и зерен в ряду с последующим умножением.

Метод отбора и обоснование. В отличие от предшествующего опыта [9], где сравнивались единичные, произвольно выбранные початки, в настоящем исследовании для каждого лотка рассчитывались средние значения по всем собранным початкам. Средние по лоткам затем усреднялись по повторностям варианта ($n = 3$). Такой подход устраняет систематическую ошибку отбора (selection bias) и позволяет оценить как межлотковую, так и внутрилотковую вариабельность. Расчетная урожайность (т/га) вычислялась по средней массе початка при густоте 50 000 растений/га.

Статистическая обработка. Все данные представлены как $M \pm SE$ (среднее $\pm$ стандартная ошибка, $n = 3$ повторности). Для оценки достоверности различий между вариантами обработки использован однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) с последующим апостериорным сравнением по критерию Тьюки при уровне значимости $p \leq 0,05$. Для оценки взаимосвязи засоренности и продуктивности рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. Обработка данных выполнена в среде R (версия 4.3.1) [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всхожесть и засоренность. Динамика полевой всхожести представлена в таблице 3 и на рисунке 3. На 14-е сутки в СВЧ-варианте взошло 78 ± 4 % семян против 64 ± 4 % в контроле ($p < 0,05$). К 45-м суткам всхожесть в СВЧ-варианте достигла 93 ± 2 %, достоверно превышая контроль (76 ± 3 %) и паровой вариант (84 ± 4 %).

Таблица 3. Полевая всхожесть кукурузы, %

Table 3. Field emergence of maize

Вариант	14-е сут.	28-е сут.	35-е сут.	45-е сут.
Контроль	64 ± 4	71 ± 3	74 ± 4	76 ± 3
Пар	71 ± 3	78 ± 4	82 ± 3	84 ± 4
СВЧ	$78 \pm 4^*$	$86 \pm 3^*$	$91 \pm 3^*$	$93 \pm 2^*$

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$; * – $p < 0,05$ к контролю (критерий Тьюки).

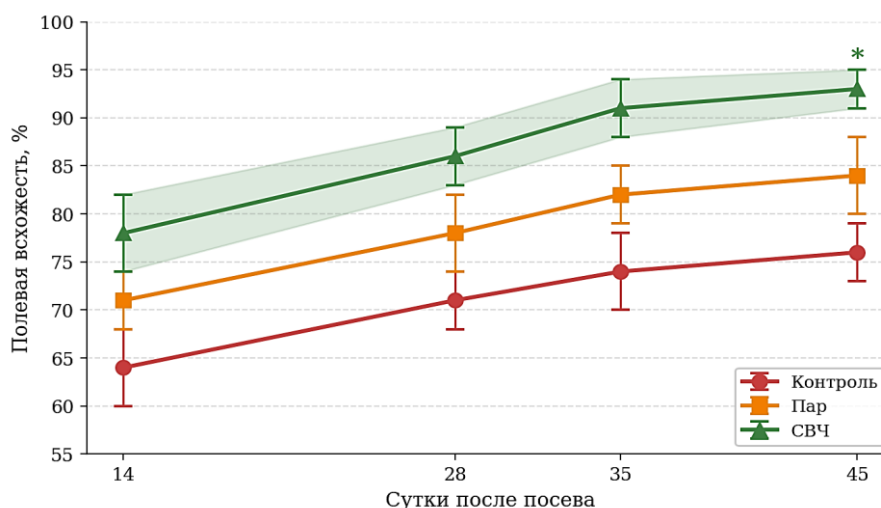


Рис. 3. Динамика полевой всхожести кукурузы при разных вариантах предпосевной обработки почвы ($M \pm SE$, $n = 3$)

Fig. 3. Dynamics of maize seedling emergence under different pre-sowing soil treatments ($M \pm SE$, $n = 3$)

Засоренность в контрольных лотках к 28-м суткам составила 312 ± 28 шт./м² (преимущественно *Portulaca oleracea* и *Chenopodium album*), к 45-м суткам – 487 ± 35 шт./м². В СВЧ-варианте засоренность составила 42 ± 9 и 67 ± 12 шт./м² соответственно, что означает снижение на 86 ± 4 % относительно контроля ($p < 0,05$). Паровая обработка обеспечила промежуточный результат – снижение на 58 ± 5 % (табл. 4, рис. 4).

Таблица 4. Засоренность сорными растениями, шт./м²

Table 4. Weed density, pcs/m²

Вариант	28-е сут.	45-е сут.	Снижение, %
Контроль	312 ± 28	487 ± 35	–
Пар	148 ± 17	203 ± 22	58 ± 5
СВЧ	$42 \pm 9^*$	$67 \pm 12^*$	$86 \pm 4^*$

*Примечание: снижение рассчитано относительно контроля; * – $p < 0,05$.

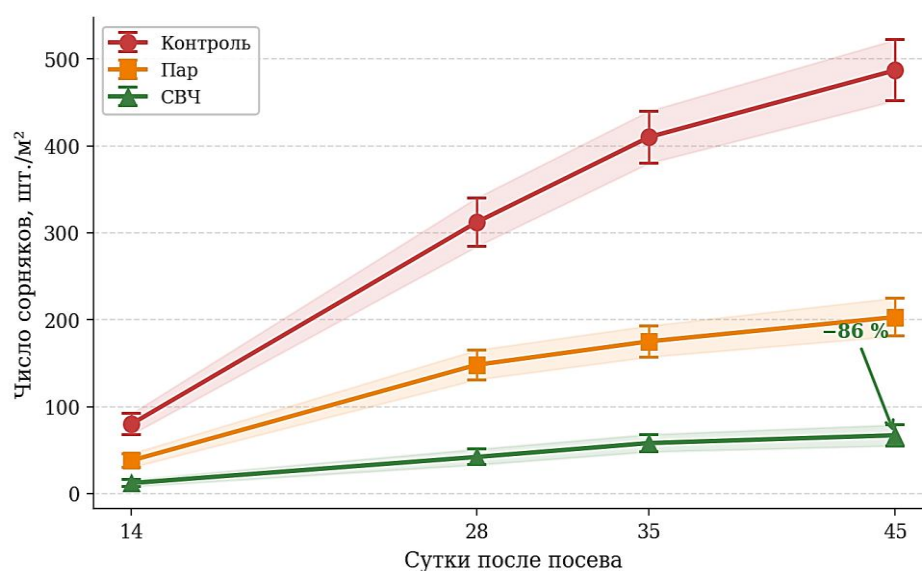


Рис. 4. Динамика засоренности посевов кукурузы при разных вариантах обработки ($M \pm SE$, $n = 3$)

Fig. 4. Dynamics of weed density in maize crops under different soil treatments ($M \pm SE$, $n = 3$)

Биометрические показатели вегетативного роста. Динамика высоты растений представлена на рис. 5 и в табл. 5. На всех сроках учета СВЧ-вариант достоверно превосходил контроль.

Таблица 5. Динамика высоты растений кукурузы, см

Table 5. Dynamics of maize plant height, cm

Вариант	14-е сут.	28-е сут.	35-е сут.	45-е сут.
Контроль	8 ± 1	18 ± 2	28 ± 3	38 ± 4
Пар	11 ± 1	26 ± 2	39 ± 2	52 ± 3
СВЧ	$14 \pm 1^*$	$33 \pm 3^*$	$52 \pm 3^*$	$68 \pm 4^*$

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$; * – $p < 0,05$ к контролю.

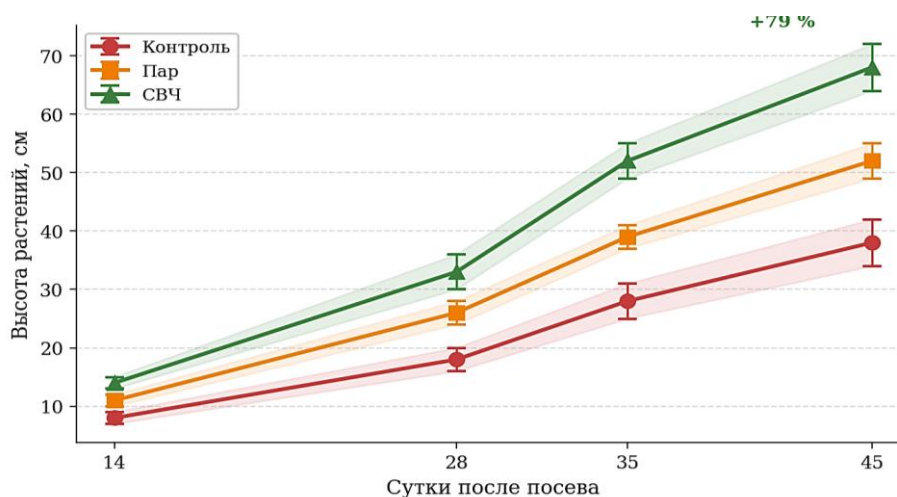


Рис. 5. Динамика высоты растений кукурузы по вариантам обработки ($M \pm SE$, $n = 3$)

Fig. 5. Dynamics of maize plant height under different soil treatments ($M \pm SE$, $n = 3$)

Комплексная оценка биометрических показателей вегетативного роста на 45-е сутки представлена в табл. 6 и на рис. 6. По всем показателям – высота, число листьев, площадь листовой поверхности и надземная биомасса – СВЧ-вариант достоверно превосходил контроль и паровой вариант.

Таблица 6. Биометрические показатели вегетативного роста кукурузы на 45-е сутки

Table 6. Biometric indicators of vegetative growth in maize on day 45

Показатель	Контроль	Пар	СВЧ	HCP_{05}
Высота, см	38±4	52±3	68±4*	8,2
Число листьев, шт.	5,2±0,4	6,5±0,3	7,8±0,3*	0,8
Площадь листьев, см ² /раст.	186±18	274±15	352±22*	38
Надзем. биомасса, г/раст.	76±8	112±9	142±11*	18

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$; * – $p < 0,05$ к контролю и паре; HCP_{05} – наименьшая существенная разница.

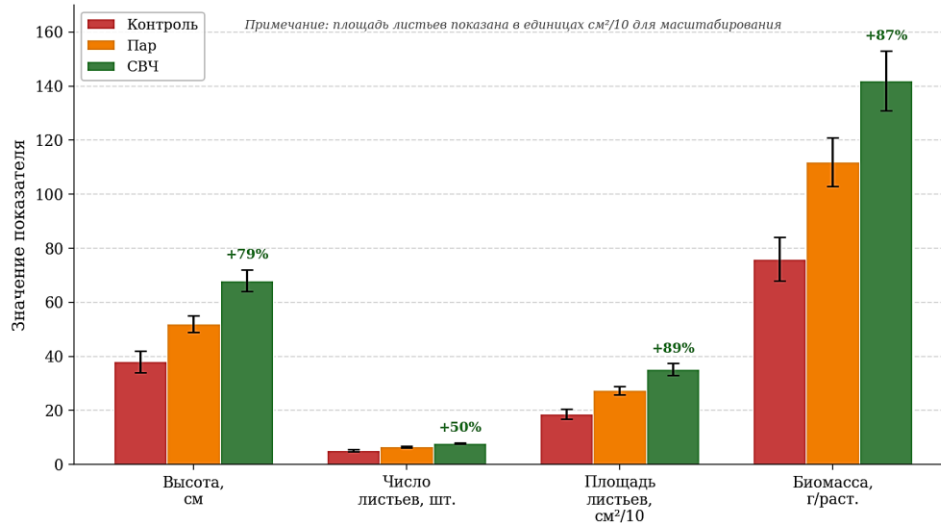


Рис. 6. Биометрические показатели вегетативного роста кукурузы на 45-е сутки по вариантам обработки. Площадь листьев показана в единицах см²/10 для масштабирования

Fig. 6. Biometric indicators of vegetative growth in maize on day 45 under various treatments. Leaf area is shown in cm²/10 units for scale adjustment.

Высота растений в СВЧ-варианте превысила контроль на 79 %, число листьев – на 50 %, площадь листовой поверхности – на 89 %, надземная биомасса – на 87 %. Все различия статистически достоверны ($p < 0,05$). Паровой вариант занял промежуточное положение, достоверно отличаясь от контроля по всем показателям, но уступая СВЧ-варианту.

Динамика площади листовой поверхности по срокам наблюдений представлена на рис. 7. Различия между вариантами нарастали от 14-х к 45-м суткам, что свидетельствует о кумулятивном эффекте устранения конкурентного давления сорняков.

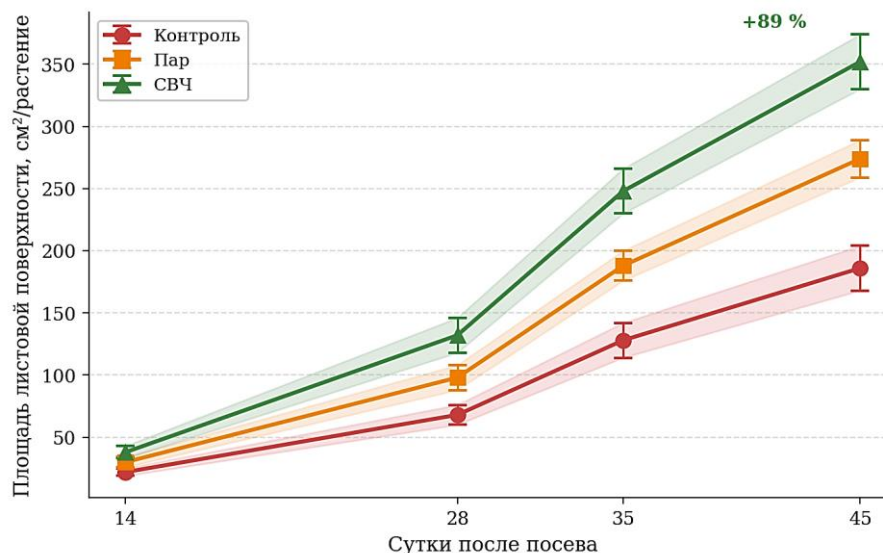


Рис. 7. Динамика площади листовой поверхности кукурузы по вариантам обработки ($M \pm SE$, $n = 3$).
Площадь листьев определена по формуле Montgomery ($S = L \times W \times 0,75$)

Fig. 7. Dynamics of leaf area in maize across various treatment options ($M \pm SE$, $n = 3$).
Leaf area was calculated via the Montgomery formula ($S = L \times W \times 0.75$)

Показатели початков и расчетная урожайность

Морфометрические и продукционные характеристики початков представлены в табл. 7 и на рис. 8. Средние рассчитаны по всем початкам каждого лотка с последующим усреднением по повторностям ($n = 3$).

Таблица 7. Морфометрические и продукционные показатели початков кукурузы

Table 7. Morphometric and yield parameters of maize ears

Вариант	Длина, см	Диаметр, мм	Масса, г	Число зерен, шт.	Урожайн., т/га
Контроль	8,4±0,7	39±3	68±8	196±24	3,8±0,4
Пар	17,6±0,8*	47±2*	128±10*	412±32*	6,2±0,5*
СВЧ	19,3±0,6*	51±2*	156±12*	498±28*	7,4±0,6*

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$ (среднее по лоткам); * – $p < 0,05$ относительно контроля

Средняя масса початка в СВЧ-варианте (156 ± 12 г) превысила контроль на 129 %, а паровой вариант – на 22 %. Число зерен в початке при СВЧ-обработке составило 498 ± 28 шт. против 196 ± 24 шт. в контроле (+154 %). Расчетная урожайность в СВЧ-варианте ($7,4 \pm 0,6$ т/га) превысила контроль на 95 %, паровой вариант ($6,2 \pm 0,5$ т/га) – на 19 %. Все различия достоверны ($p < 0,01$).

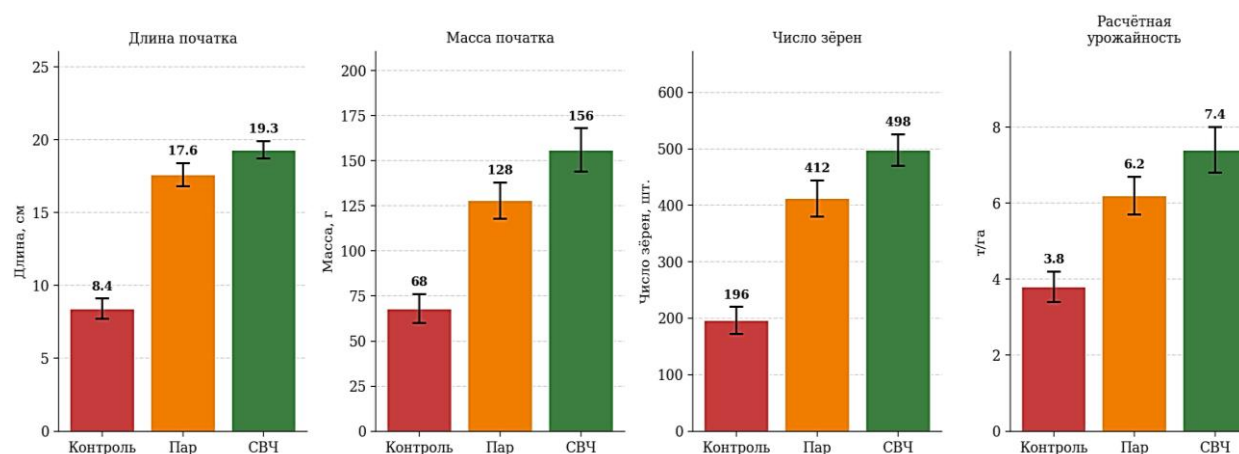


Рис. 8. Продукционные показатели початков кукурузы по вариантам обработки: длина, масса, число зерен и расчетная урожайность

Fig. 8. Performance parameters of maize ears across various treatments: length, weight, grain number, and estimated yield

Корреляционный анализ

Для оценки взаимосвязи между засоренностью и продуктивностью проведен корреляционный анализ по данным 9 лотков (рис. 9). Установлена сильная отрицательная корреляция между засоренностью на 45-е сутки и надземной биомассой растений ($r = -0,97$; $p < 0,001$). Это количественно подтверждает, что ключевым механизмом повышения продуктивности кукурузы при СВЧ-обработке является именно устранение конкурентного давления сорняков, а не прямое стимулирующее действие излучения.

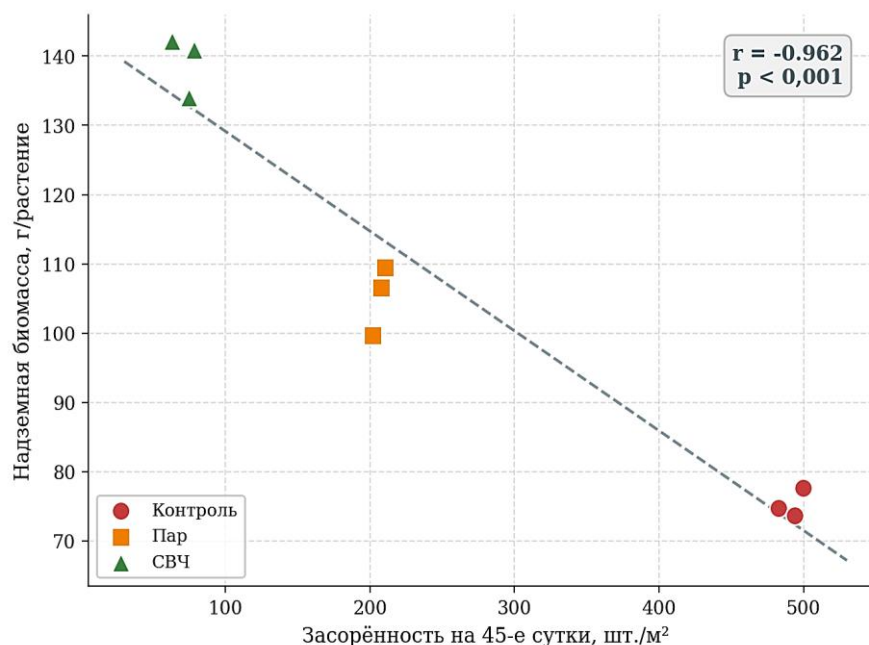


Рис. 9. Корреляция между засоренностью на 45-е сутки и надземной биомассой кукурузы. Каждая точка – один лоток ($n = 9$). Показана линия линейной регрессии с коэффициентом корреляции $r = -0,97$ ($p < 0,001$)

Fig. 9. Correlation between weed infestation on day 45 and aboveground maize biomass. Each point represents one tray ($n = 9$). The linear regression line is shown with a correlation coefficient of $r = -0.97$ ($p < 0.001$)

ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление с первым экспериментом. Качественные выводы настоящего опыта согласуются с результатами предшествующего эксперимента [9]: СВЧ-обработка наиболее эффективно подавляет сорную растительность, а микроволновые образцы демонстрируют наибольший рост и урожайность. Принципиальное отличие состоит в том, что ранее эти закономерности фиксировались исключительно на уровне качественных категорий и визуальных наблюдений, тогда как в настоящей работе они подтверждены количественными биометрическими данными с трехкратной повторностью и статистической обработкой.

Введение показателей надземной биомассы, площади листовой поверхности и число зерен позволяют перейти от констатации «высокий/низкий» к конкретным числовым значениям прироста: +87 % по биомассе, +89 % по площади листьев, +154 % по числу зерен, +95 % по расчетной урожайности. Это существенно повышает доказательную силу выводов и позволяет использовать данные как основу для технического задания на роботизированный аппликатор.

Механизм агрономического эффекта. Совокупность полученных данных – динамика всхожести (рис. 3), засоренности (рис. 4), высоты (рис. 5), биомассы (рис. 6), площади листьев (рис. 7) и установленная корреляция (рис. 9) – свидетельствует о том, что ключевым механизмом повышения урожайности кукурузы при СВЧ-обработке является устранение конкурентного давления сорняков и снижение почвенной инфекции, а не прямой стимулирующий эффект излучения на культурные растения.

Преимущество СВЧ-метода над паровым по вторичной засоренности (86 % против 58 %) объясняется более высокой избирательностью диэлектрического нагрева: семена сорняков с высоким содержанием воды нагреваются быстрее, чем окружающая почвенная матрица, что обеспечивает летальную температуру даже при кратковременном воздействии [5]. Паровой метод нагревает среду равномернее, а семена из нижних горизонтов, не достигшие критической температуры, прорастают повторно – к 45-м суткам в паровом варианте наблюдалась повторная вспышка сорняков.

Данные результаты согласуются с физическими принципами, описанными Ю. Х. Хамуковым и М. А. Каноковой [3, 8]: концентрация энергии в верхнем слое почвы (0–40 мм), где сосредоточено основное количество семян сорняков, позволяет достичь их термической гибели без нарушения структуры нижних горизонтов и микробиоценоза на глубине заделки семян культурных растений. Расчетный профиль температуры (рис. 10) подтверждает это теоретически: при $\alpha \approx 0,04 \text{ мм}^{-1}$ летальная температура ($\geq 70^\circ\text{C}$) достигается в целевом слое 0–40 мм, а на глубине заделки семян (50–60 мм) температура не превышает 35–40 °С.

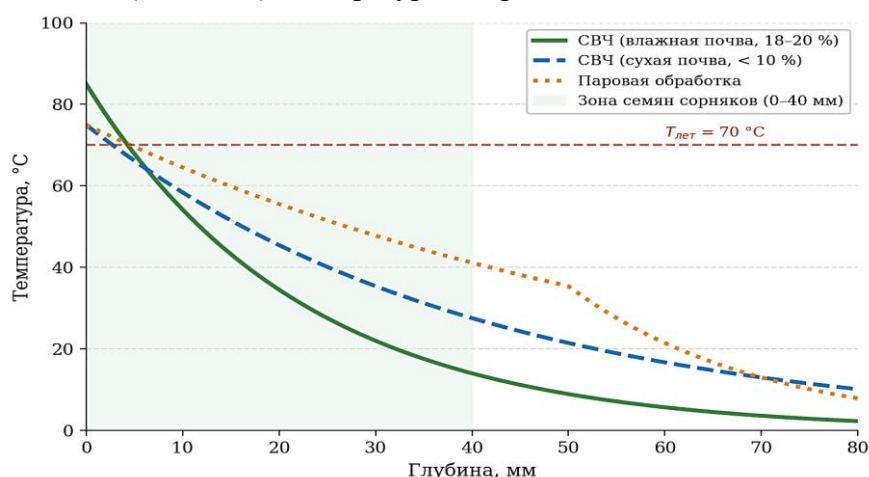


Рис. 10. Расчетный профиль температуры по глубине почвы при разных режимах обработки: СВЧ обеспечивает летальную температуру в слое 0–40 мм при сохранении нижних горизонтов

Fig. 10. Calculated temperature profile vs. soil depth under various treatment conditions: microwave treatment ensures a lethal temperature in the 0–40 mm layer while preserving the lower horizons

Биометрическое обоснование для проектирования робота-аппликатора. Полученный массив биометрических данных дает возможность сформулировать конкретные агрономические требования к полемому прототипу робота-аппликатора: минимальная глубина прогрева – 40–50 мм; целевой диапазон температур в горизонте 0–30 мм – от 75 до 90 °С; удельная энергоподача – 90–100 кДж/дм²; скорость перемещения при рабочем захвате 0,5 м – 0,3–0,5 м/с; предпочтительный тип излучателя – «гребенка» или целевой волновод [4–6, 8].

Зафиксированный прирост урожайности (с 3,8 до 7,4 т/га, т. е. дополнительно 3,6 т/га) многократно перекрывает расчетные энергозатраты на СВЧ-обработку: как показано выше (раздел «Физические основы и инженерная концепция»), удельное потребление электроэнергии составляет порядка 11–17 кВт·ч/га, а стоимость обработки не превышает 100 руб./га при дополнительной выручке около 43 тыс. руб./га. Биометрические показатели (биомасса +87 %, площадь листьев +89 %, урожайность +95 %) количественно обосновывают экономическую целесообразность внедрения роботизированной системы, поскольку прирост урожайности значительно превышает энергетические затраты на СВЧ-обработку (30–60 МДж/га по данным [4]).

Ограничения и направления дальнейших исследований. Эксперимент проводился в вегетационных лотках, что ограничивает экстраполяцию результатов на полевые условия. Следующий этап – полевые испытания на делянках 5–10 м² с подключенным прототипом аппликатора. Также планируется мониторинг микробиоценоза почвы (восстановление через 4–6 недель после СВЧ [11]), оптимизация режима (мощность – скорость) методом PSO [12] и оценка энергетической эффективности в реальных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В вегетационном эксперименте с трехкратной повторностью и количественным биометрическим анализом достоверно установлено: СВЧ-обработка почвы (800 Вт / 2,45 ГГц, 120 с/дм²) обеспечила всхожесть 93 ± 2 %, надземную биомассу 142 ± 11 г/растение (+87 % к контролю), площадь листьев 352 ± 22 см²/растение (+89 %), число зерен 498 ± 28 шт./початок (+154 %), снижение засоренности на 86 ± 4 %, среднюю массу початка 156 ± 12 г (+129 %) и расчетную урожайность $7,4 \pm 0,6$ т/га (+95 %). Все различия с контролем и паровым вариантом статистически достоверны ($p < 0,01$).

Применение количественных биометрических показателей (надземная биомасса, число и площадь листьев, масса и число зерен початка) и обоснованного протокола отбора с усреднением по лоткам устраняет методические ограничения предшествующего эксперимента [9] и обеспечивает статистическую валидность выводов.

Установлена сильная отрицательная корреляция между засоренностью и надземной биомассой ($r = -0,97$; $p < 0,001$), количественно подтверждающая, что механизм повышения продуктивности при СВЧ-обработке обусловлен устранением конкурентного давления сорняков.

Показано устойчивое подавление сорняков в СВЧ-варианте на протяжении всей вегетации, в то время как паровая обработка не предотвращает повторное прорастание семян из нижних горизонтов.

Сформулированы количественные агрономические требования к роботу-аппликатору: мощность 8–12 кВт, скорость 0,3–0,5 м/с, доза 90–100 кДж/дм², глубина воздей-

ствия ≥ 40 –50 мм, что создает основу для перехода к этапу полевых испытаний. По совокупности агрономических и технологических преимуществ СВЧ-обработка является перспективной альтернативой гербицидам, а создание соответствующего робота-аппликатора – обоснованной инженерной задачей, отвечающей принципам экологически безопасного земледелия [3, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. FAO. Crop losses to pests and their prevention. *Global Food Losses and Waste*. Rome: FAO, 2011.

2. Abdulridha J.J., Kanissery R.G., McAvoy C.E., Ampatzidis Y.G. Evaluation of steam application for weed management in citrus. *Applied Engineering in Agriculture*. 2019. Vol. 35(5). Pp. 805–814. DOI: 10.13031/aea.13494

3. Хамуков Ю. Х., Канокова М. А. Земледелие и вспашка. Часть 1. Вспашка как антропогенный фактор деградации экосистем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 225–235. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-225-235

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. Arable farming and plowing. Plowing as an anthropogenic factor in ecosystem degradation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 225–235. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-225-235. (In Russian)

4. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Microwave soil treatment and plant growth. *Microwave Heating: Techniques and Applications* / Ed. R. Radhakrishnan. London: IntechOpen, 2019. Pp. 201–223.

5. Brodie G., Torgovnikov G. Microwave soil heating with evanescent fields from slow-wave comb and ceramic applicators. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 3. DOI: 10.3390/en15031068

6. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Microwave weed and soil treatment in agricultural systems. *Global Journal of Agricultural Innovation, Research & Development*. 2018. Vol. 5. No. 2. Pp. 1–14.

7. Brodie G.I., McFarlane D.J., Khan M.J. et al. Microwave soil heating promotes strawberry runner production and progeny performance. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 10. DOI: 10.3390/en15103508

8. Хамуков Ю. Х., Канокова М. А. Земледелие и вспашка. Часть 2. Концепция устройства для предпосевной подготовки почвы СВЧ-излучением // Сборник трудов форума «Наука и инновации – современные концепции». 2023. С. 103–115. DOI: 10.34660/INF.2023.98.82.117

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. Agriculture and plowing. Part 2. Concept of a device for pre-sowing soil preparation using microwave radiation. *Sbornik trudov foruma «Nauka i innovatsii – sovremennyye kontseptsii»* [Collection of papers of the forum “Science and Innovation – Modern Concepts”]. 2023. Pp. 103–115. DOI: 10.34660/INF.2023.98.82.117. (In Russian)

9. Шереушев М. А., Шереушев М. А., Кишев А. Ю. Влияние микроволновой и паровой обработки почвы на подавление сорной растительности и повышение урожайности кукурузы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Том. 27. № 1. С. 20–30. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-20-30

Shereuzhev M.A., Shereuzhev M.A., Kishev A.Yu. Impact of microwave and steam soil treatment on weed suppression and corn yield improvement. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 1. Pp. 20–30. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-20-30. (In Russian)

10. Montgomery E.G. Correlation studies in corn. *Nebraska Agric. Exp. Sta. Annu. Rep.* 1911. Vol. 24. Pp. 108–159.

11. Lombardo S., Paratore M., Muratore G. et al. Microwave soil treatment effects on weed emergence and crop productivity. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. No. 1. Art. 172.

12. Wang S., Ge Y., Srinivasakannan C. et al. Modeling and simulation of a multi-source microwave heating of soil based on PSO-BPNN. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 257. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124148

13. Шереузов М. А., Шереузов М. А., Кишев А. Ю. Вопросы выбора системы технического зрения сельскохозяйственных робототехнических комплексов для контроля сорной растительности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 4(108). С. 84–95. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-4-108-84-95

Shereuzhev M.A., Shereuzhev M.A., Kishiev A.Yu. Questions of choosing a vision system of agricultural robotic systems for weed control. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 4(108). Pp. 84–95. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-4-108-84-95. (In Russian)

14. Мельников С. В., Аleshкин В. Р., Рошчин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

Melnikov S.V., Aleshkin V.R., Roshchin P.M. *Planirovaniye eksperimenta v issledovaniyakh sel'skokhozyaystvennykh protsessov* [Experimental planning in studies of agricultural processes]. L.: Kolos, 1980. 168 p. (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

Шереузов Марат Артурович, аспирант кафедры «Агрономия», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в;

мл. науч. сотр., Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

marat.shereuzhev07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7368-4691>

Шереузов Мадин Артурович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

Кишев Алим Юрьевич, канд. с.-х. наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Агрономия», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в;

a.kish@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2838-6876>

Information about the authors

Marat A. Shereuzhev, Postgraduate Student, Department of Agronomy, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov;

1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia;

Junior Researcher, 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;

marat.shereuzhev07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7368-4691>

Madin A. Shereuzhev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Robotic systems and mechatronics, Bauman Moscow State Technical University;

5, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

Alim Yu. Kishiev, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Agronomy, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov;

1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia;

a.kish@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2838-6876>

УДК 338.27

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-181-192>

 GBOAKO

Модели и методы прогнозирования объемов потребления энергоресурсов в экономике Российской Федерации до 2030 года

Н. Н. Володина[✉], М. В. Кротова

Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук
117418, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 47

Аннотация. В современных условиях развития мировой экономики энергоресурсы, такие как газ и электроэнергия, играют ключевую роль, оказывая значительное влияние на экономическую стабильность государств, деятельность промышленных предприятий и уровень жизни населения. Как показывает обзор ситуации на глобальном рынке энергоносителей первой половины XXI века, изменение доступности энергоресурсов способно не только создавать кризисы, перераспределение финансовых потоков и изменять конкурентоспособность компаний на глобальном рынке, но и изменять расстановку сил в мире. Поэтому задача прогнозирования физических объемов потребления энергоресурсов (нефти, газа, электроэнергии) как в натуральном выражении, так и в универсальном измерителе – тоннах условного топлива, – оказывается не менее важной, чем традиционный прогноз цен на энергоносители.

Цель исследования – анализ российского рынка энергоресурсов и прогнозирование объемов потребления энергоресурсов в различных отраслях экономики страны.

Методы исследования. Были использованы статистический и системный анализ, а также методы оценки влияния геоэкономических и геополитических факторов на развитие энергетического сектора, статистические методы анализа временных рядов, методы машинного обучения (ML) и методы, основанные на нейронных сетях.

Выводы. Будучи крупнейшей страной-производителем и экспортером нефти, газа и других энергоносителей, национальная экономика РФ не может ограничиваться традиционной для стран-экспортеров задачей догоняющего развития. Необходимо обеспечить и поддерживать в постоянном режиме технологический и энергетический суверенитет страны. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанных моделей для оценки, корректировки и оптимизации управленческих решений в топливно-энергетическом комплексе и в различных отраслях экономики.

Ключевые слова: энергоресурсы, потребление энергоносителей, прогнозирование цен, стратегическое планирование, отрасли экономики, энергосбережение, энергоэффективность

Поступила 13.04.2026, одобрена после рецензирования 13.05.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Володина Н. Н., Кротова М. В. Модели и методы прогнозирования объемов потребления энергоресурсов в экономике Российской Федерации до 2030 года // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 181–192. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-181-192



Models and methods for forecasting energy consumption in Russian economy until 2030

N.N. Volodina✉, M.V. Krotova

Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences
47, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117418, Russia

Abstract. In the modern global economy, energy resources such as gas and electricity play a critical role, profoundly impacting national economic stability, industrial performance, and public living standards. A review of the global energy market in the first half of the 21st century demonstrates that shifts in energy availability can trigger crises, redistribute financial flows, compromise corporate competitiveness, and reshape the global balance of power. Therefore, forecasting energy consumption (oil, gas, and electricity), both in natural units and in tons of oil equivalent (toe), is just as critical as conventional energy price forecasting.

The **aim** of this study is to analyze the Russian energy market and project energy consumption trends across key economic sectors.

Research methods. Statistical and systems analysis were used as the primary research methods, along with frameworks for assessing geopolitical and geoeconomic impacts on the energy sector, time-series analysis, machine learning (ML), and neural networks.

Conclusions. As one of the world's largest producers and exporters of oil, gas, and other energy resources, Russia cannot limit its national economy to the traditional trajectory of catch-up development typical of resource-exporting countries. Therefore, securing and continuously maintaining the nation's technological and energy sovereignty is of paramount importance. The practical significance of this study lies in the applicability of the developed models for evaluating, adjusting, and optimizing management decisions within the fuel and energy complex and other economic sectors.

Keywords: energy resources, energy consumption, price forecasting, strategic planning, economic sectors, energy conservation, energy efficiency

Submitted 13.04.2026,

approved after reviewing 13.05.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Volodina N.N., Krotova M.V. Models and methods for forecasting energy consumption in Russian economy until 2030. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 181–192. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-181-192

ВВЕДЕНИЕ

Историко-ресурсные аспекты доступности энергоносителей для стран, обладающих и не обладающих запасами нефти и газа. В современном мире энергоресурсы – нефть, природный газ, электроэнергия – играют роль ключевых факторов, определяющих динамику развития национальных и глобальных экономик. Геополитические события второй четверти XXI века, наиболее драматичным из которых стало нападение США на одну из крупнейших стран-производителей и экспортеров нефти Иран, можно расценивать еще и как свидетельство определенной смены приоритетов глобальной энергетической политики. Энергоносители, традиционно считавшиеся главным источником валютных поступлений и наполнения бюджета, инструментом внешнеэкономической политики для стран-экспортеров нефти и газа, в настоящее время превратились в важнейший источник выживания самой национальной государственности. Физический контроль за ресурсами углево-



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

дородного сырья и путями их транспортировки, равно как и за другими каналами энергоснабжения, становится важнее, чем возможность прогнозирования и поддержания приемлемых уровней соответствующих цен и тарифов.

В течение предшествующих 50–70 лет ключевым фактором влияния топливно-энергетического комплекса на экономику страны считались уровень и динамика цен на углеводороды, поскольку они задавали:

- доходность внутреннего и внешнего рынков как для стран-экспортеров, так и стран-импортеров;
- энергоемкость внутреннего валового продукта (ВВП) страны и отдельных отраслей национальной экономики;
- конкурентоспособность отдельных отраслей национальной экономики – добывающих, перерабатывающих, высоких технологических переделов и др.;
- уровни цен и тарифов на электроэнергию, нефтепродукты и альтернативные виды топлива;
- степень диверсификации национального энергетического баланса;
- инвестиционный потенциал крупнейших месторождений углеводородов и нефтегазовых компаний.

На уровень и динамику биржевых цен оказывают влияние как экономические (спрос и предложение, инфляция, валютные курсы), так и внешние факторы: политическая нестабильность, государственное регулирование, технологические инновации, изменения в законодательстве и международные соглашения. Среди других факторов отмечаются также погодные аномалии, природные и техногенные катастрофы. Именно на оценке вышеперечисленных факторов, условий и их конечного «выхода» (в виде прогнозных уровней и динамики цен на нефть и газ) разрабатывались разнообразные экономико-математические модели, анализ которых и их применение к современной экономике описываются авторами работ [1–3]. Собственные подходы к оценке динамики и уровня котировок существуют и у профессиональных биржевых игроков, хотя их обоснованность является для экономической науки недоказанной или спорной.

Большинство известных методов прогнозирования объединяет то, что они были разработаны западными экономистами в течение XX столетия и, по сути, отражают исключительно высокую чувствительность западной экономики к уровню цен на сырье. Для стран Западной и Центральной Европы, исторически испытывавших дефицит минеральных ресурсов, подобное восприятие доступа к энергоносителям является частью их культурного кода. Начиная с середины XX века динамика мировых цен на нефть, газ и электроэнергию многократно подвергалась резким изменениям, которые нередко определяли не просто экономическую политику как стран-производителей, так и стран-потребителей, но и само ощущение доступности первичных энергоресурсов для глобальной экономики.

Первым известным примером здесь является «нефтяной шок» 1973 года, когда страны ОПЕК резко сократили добычу и экспорт нефти. Это спровоцировало четырехкратный рост цен на нефть на мировом рынке и привело к инфляционным кризисам в ведущих экономиках Запады. Ситуация частично повторилась в 1979 году во время Иранской революции. Тем не менее вскоре после обретения Исламской республикой Иран суверенитета над собственными углеводородными запасами вновь последовало снижение мировых цен на нефть, которое началось в 1986 году. Произошло резкое падение цен на нефть из-за увеличения добычи и ослабления спроса. Открытие новых крупных месторождений нефти и газа наряду с переходом ведущих экономик стран Запады на энергосберегающие и более энергоэффективные технологии подействовало на международные биржевые рынки как сигнал к возрождению рыночного оптимизма. Геологические запасы не исчерпаны, а государственные

компаниям стран-экспортеров не могут установить монопольную цену. В 1998 году азиатский финансовый кризис спровоцировал очередной спад.

С 2000-х годов существенное влияние оказали технологические факторы. «Сланцевая революция» в США привела к росту внутренней добычи и изменению структуры мировых поставок, в том числе превратив крупнейшую экономику Запада США из импортера энергоносителей, имеющего собственную добычу, в нового экспортера, не связанного в своих политических интересах со странами ОПЕК. Природный газ благодаря созданию развитых систем магистральных газопроводов и электронных бирж превратился в биржевой товар наравне с нефтью сначала в США, затем в Европейском союзе, а также в ряде наиболее развитых азиатских стран. Биржевая торговля газом сделала цены на энергоносители более взаимозависимыми, а западный энергетический рынок – гибким и одновременно подверженным большому числу трудно просчитываемых, нередко случайных, факторов.

Значительным событием первой четверти XXI века стало падение цен на нефть в 2014–2016 годах, вызванное перепроизводством и изменением политики ОПЕК+. В этот период мировые цены на нефть марки Brent снизились более чем в два раза за относительно короткое время. Последний пример экстремальных колебаний – события 2020 года: пандемия COVID-19 спровоцировала драматическое снижение спроса, сбои в логистике, а также беспрецедентное краткосрочное снижение цен на нефть, когда стоимость некоторых фьючерсных контрактов стала отрицательной.

Рынок природного газа и электроэнергии не менее волатилен. Кризис 2021–2022 годов в Европе, связанный с резким ростом цен на газ, возник из-за сокращения поставок, холодной зимы, низких запасов и общей энергетической неопределенности. Электроэнергетика, особенно с внедрением возобновляемых источников энергии, характеризуется сезонными и погодными всплесками цен, что усложняет долгосрочное прогнозирование.

Ошибки в прогнозах цен и ожидаемых уровнях потребления энергоносителей могут привести к серьезным финансовым потерям, срывам поставок, нарушениям в ценообразовании и стратегическом планировании [4–6]. Задача прогнозирования цен на энергоресурсы всегда сохраняла свою актуальность и стратегическую важность с точки зрения национальной и мировой безопасности, развития промышленности, формирования бюджетов и реализации инвестиционных программ государства, крупных нефтегазовых и энергетических компаний [5–7].

События в начале первой четверти XXI века продемонстрировали, что зависимость глобальной экономики от углеводородных ресурсов становится более острой, а наличие физических объемов нефти и газа более значимо, чем финансовые издержки их разработки и покупки. Ярче всего это показало нападение США весной 2026 года на Исламскую республику Иран. В схожую геополитическую логику укладываются и создание атмосферы неопределенности вокруг ряда других нефтегазодобывающих стран: Катар, ОАЭ, Кувейт, Ирак, Венесуэла, отчасти Мексика и Сирия, а также интерес США к покупке Гренландии, обладающей прогнозными ресурсами углеводородов. Следует расценивать все это еще и как практическое подтверждение известной теории начала XX века [8] о том, что крупный западный капитал, сталкиваясь с ресурсными ограничениями, способен направить политическую и военную элиту соответствующих стран к военным действиям против государств, имеющих эти ресурсы.

Согласно данным сайта visualcapitalist.com, в 2024 году США занимали первое место в мире по потреблению нефти с объемом 19 млн баррелей в сутки, или 18,7 % от общемирового потребления. Таким образом, США сохраняют позиции крупнейшей страны-потребителя, но логика действий этого агрессивного потребителя существенно изменилась. Вместе

с возвращением на нефтяные биржи Запада контрактов, обеспеченных физическими поставками нефти, последние события можно рассматривать как аргумент в пользу того, что контроль за реальными запасами углеводородного сырья и путями его транспортировки оказывается для нефтегазовых компаний США и представляющей их интересы политической элиты важнее, чем его рыночные цены.

В настоящее время из-за сложностей прогнозирования геологических ресурсов и запасов невозможно прийти к однозначному заключению о вхождении мировой нефте- и газодобычи в эпоху естественного истощения углеводородов. Вновь открываемые месторождения нефти и газа в большинстве регионов мира, за исключением Ближнего Востока и Африки, относятся к технологически сложным для эксплуатации. Промышленность во всем мире, используя нефть и газ как энергоносители и химическое сырье, будет вынуждена адаптироваться к сокращающейся доступности их путем снижения как общего, так и удельного потребления энергоресурсов.

Для национальной экономики Российской Федерации характерны следующие тенденции и ограничения:

- стремительный рост спроса на нефть и газ как на товар из страны-экспортера, не затронутой глобальной нестабильностью;
- согласно Ежеквартальному прогнозу ИНП РАН от 28 февраля 2026 г., отечественная экономика входит в фазу охлаждения, это касается главным образом внутреннего рынка и обрабатывающей промышленности;
- причиной охлаждения экономики является наложение друг на друга ряда негативных факторов:
 - сохраняющееся санкционное давление со стороны ЕС и США;
 - высокий уровень ключевой ставки ЦБ РФ, не позволяющий считать коммерческое кредитование доступным и дешевым для промышленности;
 - циклические явления в экономике, когда сменяются периоды роста и спада спроса и потребительских ожиданий.

Прогнозирование уровней энергопотребления внутри национальной экономики РФ должно сыграть важную роль в выработке антициклической макроэкономической политики наряду с денежно-кредитной и фискальной политикой, мерами по обеспечению технологического суверенитета и повышению производительности труда. Учитывая обострившуюся в глобальном масштабе конкуренцию за физические запасы углеводородов, мониторинг потребления энергоресурсов в различных подсистемах экономики РФ крайне важен для стратегического планирования и управления рисками как для бизнеса, так и для государственных структур. Участникам рынка приходится регулярно пересматривать стратегии закупок, инвестиций, логистики и хеджирования.

Для компаний перерабатывающего звена в самом ТЭК (химия, нефтепереработка, энергетика) и крупных промышленных потребителей вопросы прогнозирования как цен, так и возможных объемов (фактически – лимитов) потребления энергоносителей приобретают решающее значение, поскольку напрямую влияют на финансовую устойчивость, конкурентоспособность и способность выполнять долгосрочные обязательства [9–13]. Все эти параметры требуют регулярного мониторинга и применения современных методов анализа для своевременного реагирования на рыночные изменения и должны быть подкреплены рекомендациями по энергосбережению и энергоэффективности.

Теоретические основы исследований в области прогнозирования потребления энергоресурсов, энергосбережения и энергоэффективности ТЭК заложили работы Н. И. Комкова, А. Н. Дмитриевского, А. А. Макарова, А. Э. Конторовича, А. М. Мастепанова, В. В. Бушуева,

С. Л. Гаврилова и других. В настоящее время исследователям доступен широкий спектр моделей и методов моделирования трендов и прогнозирования уровней потребления энергоносителей. Одним из примеров такого прогноза является нижеприведенный расчет.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦЕН НА ЭНЕРГОРЕСУРСЫ И ИХ ОБЪЕМОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ

В общем виде задача прогнозирования цен на энергоресурсы заключается в построении такой математической или алгоритмической модели, которая способна на основании исторических данных и внешних факторов предсказывать будущие значения цен с минимальной ошибкой. Прогнозирование может быть как краткосрочным (например, на несколько дней или недель), так и средне- и долгосрочным (месяцы, годы), в зависимости от потребностей бизнеса и особенностей конкретного энергорынка.

Формально задача прогнозирования временного ряда цен на энергоресурс может быть сформулирована следующим образом:

$$y_{t+1} = f(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-n}, X_t, \theta),$$

где

y_{t+1} – прогнозируемое значение цены в следующий момент времени;

$y_{t-1}, \dots, y_{t-n}$ – значения цен в предыдущие моменты времени;

X_t – вектор внешних факторов;

θ – параметры модели, подбираемые в процессе обучения.

Целью построения прогностической модели является минимизация ошибки прогноза по выбранной метрике (например, среднеквадратичной ошибке RMSE, среднему абсолютному отклонению MAE и др.), а также обеспечение устойчивости и интерпретируемости полученных результатов.

Современные методы прогнозирования цен на энергоресурсы делятся на три крупных класса: статистические методы анализа временных рядов, методы машинного обучения (ML) и методы, основанные на нейронных сетях. Каждый из этих подходов обладает своими преимуществами и ограничениями, что определяет их применимость к задачам энергетических рынков.

Классические статистические методы используются для анализа исторических данных, выявления закономерностей, трендов и сезонности, они просты в реализации, хорошо интерпретируемы, однако их точность может снижаться при наличии сложных нелинейных зависимостей и неожиданных рыночных шоков.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТРАСЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ

На рис. 1 представлена динамика потребления энергоресурсов в секторе сельского и лесного хозяйства Российской Федерации за 2005–2022 годы с прогнозом до 2030 года (млн т у. т.). Исторический ряд (синяя линия) демонстрирует выраженную долгосрочную нисходящую тенденцию – от ~21–22 млн т у. т. в 2005 году до ~14 млн т у. т. к 2022 году, прерываемую резким провалом в 2012 году ниже отметки 10 млн т у. т., вероятно, обусловленным аномальными климатическими условиями или структурным спадом в аграрном производстве, и последующей частичной стабилизацией в диапазоне 15–18 млн т у. т. в 2013–2020 годах. Прогнозная траектория (оранжевая линия) указывает на продолжение умеренного снижения – с ~14 млн т у. т. в 2023 году до ~13 млн т у. т. к 2030 году, что соответствует инерционному сценарию и отражает общие тенденции к повышению энергоэффективности и внедрению ресурсосберегающих технологий в отрасли.



Рис. 1. Прогноз потребления в сельском и лесном хозяйстве до 2030 г.

Fig. 1. Agriculture and forestry energy consumption forecast up to 2030

Источник: разработано авторами на основе данных Федеральной службы государственной статистики [<https://fedstat.ru>]

На рис. 2 представлена динамика потребления энергоресурсов в секторе добычи полезных ископаемых Российской Федерации за 2005–2022 годы с прогнозом до 2030 года (млн т у. т.). В отличие от сельского хозяйства исторический ряд (синяя линия) демонстрирует устойчивую восходящую тенденцию – от ~60 млн т у. т. в 2005 году до ~91 млн т у. т. к 2022 году, прерываемую лишь кратковременными спадами в кризисные периоды 2009 и 2017 годов, что свидетельствует о неуклонном наращивании энергоемкости добывающей отрасли на фоне освоения новых, технологически более сложных месторождений. Прогнозная траектория (оранжевая линия) предсказывает продолжение роста с ~90 млн т у. т. в 2023 году до ~102 млн т у. т. к 2030 году, что отражает инерционный сценарий дальнейшего расширения добычи углеводородов в условиях повышенного глобального спроса и стратегической ориентации России на укрепление своих позиций как крупнейшего экспортера энергоресурсов.



Рис. 2. Прогноз потребления в добыче полезных ископаемых до 2030 г.

Fig. 2. Mining sector energy consumption forecast up to 2030

На рис. 3 представлена динамика потребления энергоресурсов в секторе химического производства Российской Федерации за 2005–2022 годы с прогнозом до 2030 года (млн т у. т.). Наиболее примечательной чертой исторического ряда (синяя линия) является аномальный пик 2006 года – около 65 млн т у. т., резко выбивающийся из общей картины и, по всей видимости, обусловленный единовременными статистическими или методологическими особенностями учета, после чего показатель стремительно снизился до ~33–35 млн т у. т. в 2008–2009 годах и в дальнейшем стабилизировался в диапазоне 35–43 млн т у. т. с умеренным восходящим трендом вплоть до 2021 года. Прогнозная траектория (оранжевая линия) указывает на незначительное снижение и последующую стабилизацию потребления на уровне ~38–39 млн т у. т. к 2030 году, что свидетельствует об ожидаемом насыщении энергопотребления в отрасли на фоне постепенного повышения энергоэффективности химических производств и структурной адаптации сектора к условиям санкционного давления и импортозамещения.

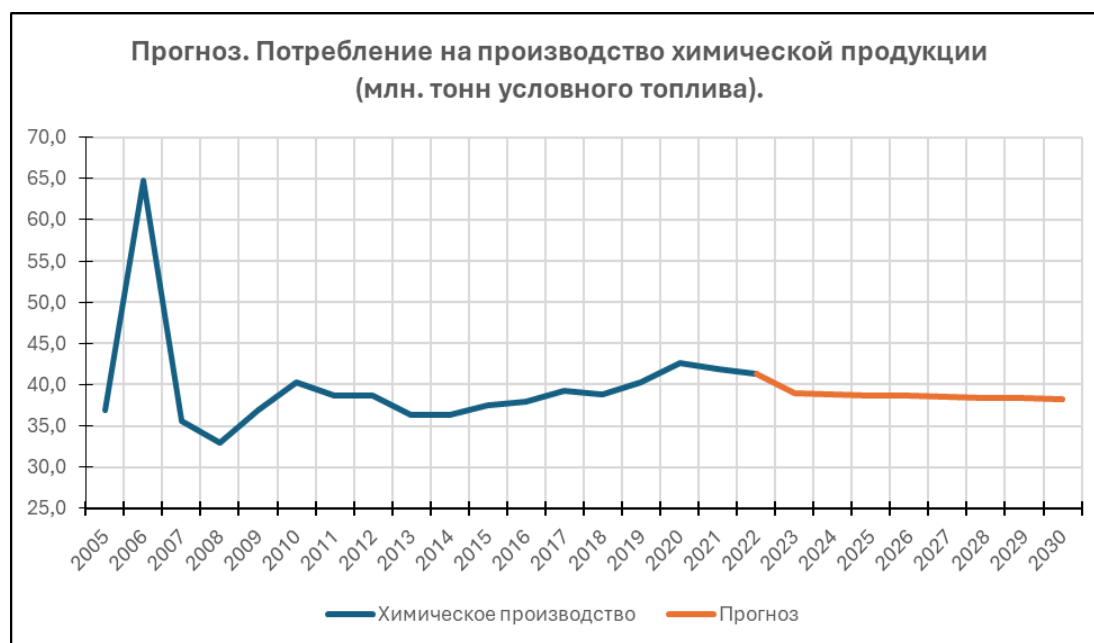


Рис. 3. Прогноз потребления химической продукции до 2030 г.

Fig. 3. Chemical industry energy consumption forecast up to 2030

Рис. 4 отражает динамику потребления энергоресурсов в металлургическом производстве России за 2005–2022 годы с прогнозом до 2030 года (млн т у. т.). После аномального пика 2006 года (~230 млн т у. т.) показатель резко сократился и на протяжении 2007–2021 годов удерживался на относительно стабильном уровне 115–130 млн т у. т. Прогнозная траектория предсказывает существенное снижение – до ~70 млн т у. т. к 2030 году, что, по всей видимости, отражает ожидаемое сокращение производственных мощностей отрасли под влиянием санкционного давления и переориентации экспортных потоков.



Рис. 4. Прогноз потребления на металлургическое производство до 2030 г.

Fig. 4. Metallurgical industry energy consumption forecast up to 2030

Рисунок 5 отражает динамику потребления энергоресурсов в секторе производства электроники России за 2005–2022 годы с прогнозом до 2030 года (млн т у. т.). Исторический ряд характеризуется общей нисходящей тенденцией – от ~5 млн т у. т. в 2005 году до ~3,3 млн т у. т. в 2022 году – с характерным пиком в 2006 году (~9,7 млн т у. т.) и резким провалом в 2019–2020 годах, вероятно, связанным с пандемийными сбоями в производственных цепочках. Прогноз предсказывает дальнейшее сокращение до ~1,7 млн т у. т. к 2030 году, что отражает структурную деградацию отечественного электронного производства на фоне технологических санкций и ограниченного доступа к компонентной базе.



Рис. 5. Прогноз потребления электроники до 2030 г.

Fig. 5. Electronics industry energy consumption forecast up to 2030

Рис. 6 отражает динамику потребления энергоресурсов в строительной отрасли России за 2005–2022 годы с прогнозом до 2030 года (млн т у. т.). Исторический ряд демонстрирует выраженный циклический характер: после умеренного роста в 2006–2014 годах

(~9–13 млн т у. т.) наблюдается резкий подъем до пика в 2017 году (~23 млн т у. т.), обусловленный, по всей видимости, активизацией крупных инфраструктурных и жилищных программ, после чего последовало столь же стремительное снижение до ~10–11 млн т у. т. к 2021–2022 годам. Прогнозная траектория предсказывает заметное восстановление и устойчивый рост до ~18–19 млн т у. т. к 2030 году, что отражает ожидаемое наращивание строительной активности в рамках государственных программ развития инфраструктуры и восстановления новых территорий.



Рис. 6. Прогноз потребления в строительстве до 2030 г.

Fig. 6. Construction sector energy consumption forecast up to 2030

Источник: разработано авторами на основе данных Федеральной службы государственной статистики [<https://fedstat.ru>]

Выводы

Проведенное исследование подтверждает, что в условиях нарастающей геополитической нестабильности и трансформации глобальных энергетических рынков задача прогнозирования физических объемов потребления энергоресурсов приобретает стратегическое значение, выходящее за рамки традиционного экономического анализа. Для Российской Федерации как крупнейшего производителя и экспортера углеводородов обеспечение энергетического суверенитета предполагает не только контроль над ресурсами, но и точную оценку динамики внутреннего энергопотребления в разрезе отдельных секторов экономики.

Применение методов машинного обучения к временным рядам энергопотребления с 2005-го по 2030 год позволяет выявить устойчивые отраслевые тенденции: постепенное снижение потребления в металлургии и химической промышленности на фоне умеренного роста в добывающем и строительном секторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агашин А. В. Прогнозирование цен на природный газ как инструмент снижения угроз экономической безопасности России // Современные технологии управления. 2022. № 4(100). С. 9. EDN: DACESS
2. Бочкарев К. Г. Прогнозирование спроса электроэнергии в энергетике: описание проблемы и ее решение // Энерджинет. 2023. № 1-2(1). С. 27. DOI: 10.57112/E231-048

3. Вертакова Ю. В. Обзор экономических подходов и моделей для прогнозирования ВВП // Экономика и управление. 2016. № 2(124). С. 22–29. EDN: VVJ AUX
4. Гальперова Е. В. Использование бенча моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 17–27. EDN: XCHS XV
5. Дробыш И. И. Статистические модели прогнозирования цен на оптовых рынках электроэнергии: российский и зарубежный опыт // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2017. Т. 11. № 3. С. 41–54.
6. Золотова И. Ю., Дворкин В. В. Краткосрочное прогнозирование цен на российском оптовом рынке электроэнергии на основе нейронных сетей // Проблемы прогнозирования. 2017. № 6. С. 47–57. EDN: YNJMGW
7. Каукин А. С., Павлов П. Н., Косарев В. С. Краткосрочное прогнозирование цен на электроэнергию с использованием генеративных нейронных сетей // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 3. С. 7–23. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.7.23
8. Ленин В. И. Империализм как высшая стадия капитализма. М.: Политиздат, 1977. 136 с.
9. Леонтьева Л. Н. Выбор моделей прогнозирования цен на электроэнергию // Машинное обучение и анализ данных. 2011. Т. 1. № 2. С. 127–137. EDN: OXWKUF
10. Сидорова Н. П., Демина Д. С. Методы прогнозирования на основе анализа временных рядов // Информационно-технологический вестник. 2017. № 3 (13). С. 118–126. EDN: ZIWDQP
11. Сулов С. А., Кондратьев М. А., Сергеев К. В. Агентное моделирование как средство анализа и прогноза спроса на энергоресурсы // Проблемы управления. 2010. № 2. С. 46–52. EDN: MQH UHR
12. Шихина А. В., Ягодкина Т. В. Повышение точности предсказания цены электроэнергии за счет применения комбинированных моделей прогноза // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 6. С. 119–128. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-119-128
13. Щетинин Е. Ю. Методы моделирования и прогнозирования спотовых цен на электроэнергию // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2008. № 11. С. 78–83. EDN: JUDVZL

REFERENCES

1. Agashin A.V. Forecasting natural gas prices as a tool for reducing threats to Russia's economic security. *Modern Management Technologies*. 2022. No. 4(100). P. 9. EDN: DACESS. (In Russian)
2. Bochkarev K.G. Forecasting electricity demand in the energy sector: problem description and solution. *EnergyNet*. 2023. No. 1-2(1). P. 27. DOI: 10.57112/E231-048. (In Russian)
3. Vertakova Yu.V. Review of economic approaches and models for GDP forecasting. *Economics and Management*. 2016. No. 2 (124). Pp. 22–29. EDN: VVJ AUX. (In Russian)
4. Galperova E.V. Using a model bench for long-term forecasting of market demand for energy resources. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2016. No. 4-2. Pp. 17–27. EDN: XCHS XV. (In Russian)
5. Drobysh I.I. Statistical models for forecasting prices in wholesale electricity markets: Russian and foreign experience. *Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and Management*. 2017. Vol. 11. No. 3. Pp. 41–54. (In Russian)
6. Zolotova I.Yu., Dvorkin V.V. Short-term price forecasting in the Russian wholesale electricity market based on neural networks. *Problems of Forecasting*. 2017. No. 6. Pp. 47–57. EDN: YNJMGW. (In Russian)
7. Kaukin A.S., Pavlov P.N., Kosarev V.S. Short-term forecasting of electricity prices using generative neural networks. *Business Informatics*. 2023. Vol. 17. No. 3. Pp. 7–23. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.7.23. (In Russian)

8. Lenin V.I. *Imperializm kak vysshaya stadiya kapitalizma* [Imperialism, the highest stage of capitalism]. Moscow: Politizdat, 1977. 136 p. (In Russian)
9. Leontyeva L.N. Selection of electricity price forecasting models. *Machine Learning and Data Analysis*. 2011. Vol. 1. No. 2. Pp. 127–137. EDN: OXWKUF. (In Russian)
10. Sidorova N.P., Demina D.S. Forecasting methods based on time series analysis. *Information Technology Bulletin*. 2017. No. 3(13). Pp. 118–126. EDN: ZIWDQP. (In Russian)
11. Suslov S.A., Kondratyev M.A., Sergeev K.V. Agent-based modeling as a tool for analyzing and forecasting energy demand. *Problemy Upravleniya*. 2010. No. 2. Pp. 46–52. EDN: MQHUHR. (In Russian)
12. Shikhina A.V., Yagodkina T.V. Improving accuracy of electricity price forecasting through the use of combined forecast models. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2020. No. 6. Pp. 119–128. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-119-128. (In Russian)
13. Shchetinin E.Yu. Methods for modeling and forecasting spot prices for electricity. *Financial Analytics: Problems and Solutions*. 2008. No. 11. Pp. 78–83. EDN: JUDVZL. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Володина Н. Н. – разработка концептуальных основ работы, поиск источников, сбор данных и доказательств, подготовка начального варианта текста, редактирование;

Кротова М. В. – проведение критического анализа материалов, развитие методологии, формирование выводов.

Contribution of the authors:

Volodina N.N. – Conceptualization, investigation, data curation, writing – original draft, writing – review and editing;

Krotova M.V. – Critical analysis, methodology, formal analysis, conclusions.

Информация об авторах

Володина Наталия Николаевна, науч. сотр., Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук;

117418, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 47;

nn_volod@mail.ru, SPIN-код: 7914-1158

Кротова Мария Владимировна, канд. экон. наук, стар. науч. сотр., Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук;

117418, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 47;

mw_krotowa@mail.ru, SPIN-код: 7914-1158

Information about the authors

Natalia N. Volodina, Researcher, Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences; 47, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117418, Russia;

nn_volod@mail.ru, SPIN-code: 7914-1158

Maria V. Krotova, Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher, Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences.

47, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117418, Russia;

mw_krotowa@mail.ru, SPIN-code: 7914-1158

УДК 314.7:61(470.64)

Научно-аналитическая статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-193-204>

 GBTEBP

Теоретические модели миграции врачей, устойчивое развитие региона и их проявление в контексте Кабардино-Балкарской Республики

А. Х. Думанова^{✉1}, М. М. Камбиев²

¹Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

²Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова
Министерства здравоохранения Российской Федерации (Пироговский университет)
117513, Россия, Москва, ул. Островитянова, 1, строение 6

Аннотация. Миграция высококвалифицированных медицинских кадров из периферийных регионов в федеральные центры представляет собой существенную проблему для устойчивого развития субъектов Российской Федерации. На примере Кабардино-Балкарской Республики (КБР) в статье систематизированы ключевые теоретические подходы к миграции («утечка мозгов», «циркуляция умов», теория человеческого капитала, push-pull факторы, сетевые теории, теории эндогенной миграции и региональной устойчивости). На основе анализа статистических данных Росстата за 2015–2023 гг. выявлены масштабы и динамика оттока лиц с высшим образованием и учеными степенями, а также его влияние на демографическую устойчивость региона. Показано, что сохранение текущих тенденций ведет к старению населения, росту смертности и в значительной степени – к снижению качества человеческого капитала в будущем. Обоснована необходимость перехода от парадигмы «утечки мозгов» к концепции управляемой «циркуляции умов».

Цель исследования – систематизация ключевых теоретических подходов к миграции высококвалифицированных специалистов, включая современные модели регионального развития, адаптация их к специфике регионального контекста КБР, а также на основе статистических данных оценка масштаба оттока высококвалифицированных кадров и его долгосрочные демографические последствия для республики.

Научная новизна. В работе впервые комплексно применены современные миграционные теории к анализу кадровой ситуации в здравоохранении конкретного Северо-Кавказского региона, дополненные количественным анализом долгосрочных миграционных трендов (2015–2023 гг.) и их влияния на устойчивость регионального развития. Выявлена специфика действия факторов «выталкивания-притяжения» в условиях полиэтничного и дотационного субъекта РФ, а также показана корреляция резких скачков миграционной убыли с макроэкономическими и геополитическими кризисами.

Результаты. Миграция выпускников-медиков КБР подчиняется общероссийской центростремительной тенденции, однако усиливается специфическими региональными дисбалансами: гиперцентрализацией ресурсов в Нальчике, отставанием материально-технической базы и ограниченностью карьерных траекторий. Статистический анализ подтверждает устойчивый отрицательный миграционный прирост лиц с высшим образованием (от –304 до –984 человек ежегодно) и максимальный за рассматриваемый период отток кандидатов наук в 2023 году (–12 человек). Резкие скачки убыли (2015, 2018, 2022 гг.) коррелируют с экономическими и геополитическими кризисами. Показана релевантность классических моделей (push-pull, человеческого капитала, сетевой теории) для объяснения оттока, однако обоснована необходимость перехода от парадигмы «утечки мозгов» к концепции управляемой «циркуляции умов» с опорой на сильные земляческие связи.

Выводы. Обосновано, что сохранение текущих тенденций приведет к демографическому старению населения, росту смертности и снижению качества человеческого капитала КБР, формируя «ловушку развития». Решение кадровой проблемы, по мнению авторов, заключается не в изоляции, а в повышении конкурентоспособности республики как профессиональной среды. Сформулированные выводы служат методологической основой для эмпирического изучения миграционных намерений выпускников-медиков и разработки региональной политики, направленной на трансформацию оттока в управляемую циркуляцию (создание ассоциаций выпускников, телемедицинских хабов, программ возвратных грантов).

Ключевые слова: миграция врачей, утечка мозгов, циркуляция умов, человеческий капитал, устойчивое развитие региона, демография, Кабардино-Балкарская Республика, медицинские кадры

Поступила 01.04.2026, одобрена после рецензирования 26.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Думанова А. Х., Камбиев М. М. Теоретические модели миграции врачей, устойчивое развитие региона и их проявление в контексте Кабардино-Балкарской Республики // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 193–204. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-193-204

Research and analytical article

Physician migration and regional sustainable development: a case study of the Kabardino-Balkarian Republic

A.Kh. Dumanova^{✉1}, M.M. Kambiev²

¹Institute 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

²N.I. Pirogov Russian National Research Medical University
of the Ministry of Health of the Russian Federation (Pirogov University)
1, Ostrovityanova street, building 6, Moscow, 117513, Russia

Abstract. The migration of highly qualified medical personnel from peripheral regions to federal centers poses a significant threat to the sustainable development of Russian regions. Focusing on the Kabardino-Balkarian Republic (KBR), the article examines key theoretical migration frameworks: “brain drain”, “brain circulation”, human capital theory, push-pull factors, network theories, as well as theories of endogenous migration and regional resilience. Based on the analysis of Rosstat statistical data for 2015–2023, the scale and dynamics of the outflow of persons with higher education and academic degrees, as well as its impact on the demographic sustainability of the region, are identified. Based on an analysis of Rosstat data for 2015–2023, this paper reveals the scale and dynamics of the brain drain of highly educated individuals and degree holders, showing its negative impact on regional demographic sustainability. The findings show that if current trends continue, they will lead to population aging, increased mortality, and a significant decline in the future quality of human capital. The study substantiates the necessity of shifting from the “brain drain” paradigm to the concept of managed “brain circulation”.

Aim. This paper aims to systematize key migration theories of highly qualified specialists within modern regional development models, adapting them to the KBR context; furthermore, it uses statistical data to evaluate the scale of this outflow and its long-term demographic impact on the republic.

Scientific novelty. For the first time, this study comprehensively applies modern migration theories to analyze the healthcare workforce in a specific North Caucasus region, supplementing it with a quantitative analysis of long-term migration trends (2015–2023) and their impact on regional sustainable development. The study identifies how “push-pull” factors operate specifically within a multi-ethnic, subsidized region of the Russian Federation, demonstrating a correlation between sharp spikes in migration loss and macroeconomic or geopolitical crises.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Results. Medical graduate migration from the KBR aligns with national centripetal trends, yet it is aggravated by regional imbalances, including the hyper-concentration of resources in Nalchik, underfunded material and technical infrastructure, and restricted career pathways. Statistical analysis confirms a steady negative net migration among individuals with higher education (ranging from –304 to –984 people annually) and a record outflow of Candidates of Sciences in 2023 (–12 people). Sharp spikes in migration loss (2015, 2018, and 2022) closely correlate with periods of economic and geopolitical crisis. The study demonstrates the relevance of classical models (such as push-pull, human capital, and network theories) in explaining this outflow; however, it also substantiates the necessity of shifting from the “brain drain” paradigm to the concept of managed “brain circulation” driven by strong kinship and community ties.

Conclusions. The paper demonstrates that the persistence of ongoing trends risks triggering a “development trap” in the KBR, characterized by population aging, rising mortality rates, and the degradation of regional human capital. The solution to the healthcare workforce shortage lies not in isolation but in enhancing the republic's competitiveness as a professional environment. The formulated conclusions serve as a methodological basis for empirical research into the migration intentions of medical graduates and for developing regional policies to transform this outflow into managed circulation through alumni associations, telemedicine hubs, and return grant programs.

Keywords: physician migration, brain drain, brain circulation, human capital, regional sustainable development, demography, Kabardino-Balkarian Republic, medical personnel

Submitted 01.04.2026,

approved after reviewing 26.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Dumanova A.Kh., Kambiev M.M. Physician migration and regional sustainable development: a case study of the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 193–204. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-193-204

ВВЕДЕНИЕ

Миграция высококвалифицированных кадров, и в особенности медицинских работников, представляет собой один из значимых вызовов современности. Данный феномен, с одной стороны, является индикатором глобализации рынков труда, а с другой – усугубляет неравенство между странами и регионами, выступая механизмом перераспределения человеческого капитала из периферии в центры активности. На уровне Российской Федерации проблема приобрела ярко выраженную центростремительную направленность. Столичные агломерации аккумулируют ресурсы, формируя мощные притягивающие поля для выпускников из всех субъектов РФ.

Кабардино-Балкарская Республика по объективным социально-экономическим показателям относится к регионам-донорам кадров. Медицинский факультет Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова является ключевым поставщиком кадров для системы здравоохранения республики. Отток выпускников-медиков представляет собой двойную потерю: некупаемость инвестиций в образование и снижение доступности медицинской помощи для населения [1].

В долгосрочной перспективе данный процесс оказывает негативное влияние не только на систему здравоохранения, но и на демографическую устойчивость региона в целом, поскольку врачи являются носителями критически важных компетенций, относятся к наиболее активной репродуктивной и образованной части населения, а также представляют профессию, стоящую у истоков формирования здоровой нации¹.

¹Постановление Правительства РФ от 26.12.2017 № 1642 (ред. от 17.12.2025) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие образования»» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2026) // Собрание законодательства РФ. 2018. № 2. Ст. 321.

Цель данной статьи – систематизировать ключевые теоретические подходы к миграции высококвалифицированных специалистов и адаптировать их к анализу миграционных процессов в КБР, ответив на вопросы: какие модели наиболее полно объясняют принятие миграционного решения выпускниками КБГУ и как общие факторы преломляются в социально-экономической и культурной среде республики? Кроме того, на основе статистических данных оценить масштаб оттока и его возможные последствия для демографической и социальной устойчивости республики.

В научной литературе выделенные нами ключевые теоретические подходы, разработанные зарубежными и российскими исследователями для анализа миграционных моделей, были классифицированы на две группы. К первой группе отнесены концепции, фокусирующиеся на внешних факторах центростремительного характера (Brain Drain, Brain Circulation, Global Talent Competition), в рамках которых принятие миграционного решения детерминировано направлением и динамикой популяционных потоков. Вторая группа объединяет подходы, объясняющие внутреннюю логику принятия решений самими мигрантами (Push-Pull, Human Capital, теории сетей и транснационализма).

Классическая теория «утечки мозгов» (Brain Drain), доминировавшая в 1960–1970-е годы, сформулированная в работах J. Bhagwati и его соавторов [2], рассматривала перемещение образованных кадров из развивающихся в развитые страны исключительно как негативное явление. Согласно этой парадигме бедные страны субсидируют богатые, теряя наиболее способную молодежь. Данный подход релевантен для КБР: республика, обладающая бюджетными ограничениями, финансирует обучение будущих врачей, но затем сталкивается с высоким риском, что эти инвестиции будут использованы в экономике Москвы или Краснодарского края. Теория задает этический ракурс, фокусируясь на несправедливости распределения выгод и подрыве потенциала развития периферийных регионов.

Глобализация привела к пересмотру пессимистичного взгляда через концепцию «циркуляции умов» (Brain Circulation). A. Saxenian [3] на примере IT-специалистов, и показала, что мигранты не разрывают связи с родиной, а создают транснациональные сети, через которые осуществляются двусторонние потоки знаний и технологий. Применительно к выпускникам КБГУ эта концепция открывает перспективу: уехавший специалист может консультировать коллег дистанционно, организовывать стажировки, а в перспективе – вернуться с накопленным опытом. Задача региональной политики смещается с пассивного удержания на активное управление циркуляцией.

Теория «глобальной охоты за талантами» (Global Talent Competition), разработанная D. Zweig [4], акцентирует целенаправленный характер политики развитых стран, которые селективно привлекают специалистов. Эта теория переносит фокус на институциональную конкуренцию между территориями. КБР де-факто вовлечена во внутреннюю конкуренцию, уступая Москве и Санкт-Петербургу с заведомо невыгодных позиций. Успех в этой конкуренции требует не только разовых выплат (как в программе «Земский доктор»), но и формирования комплексной экосистемы для жизни и работы.

Одной из теорий, раскрывающей логику принятия решений о миграции, является теория «выталкивающих-притягивающих факторов» (Push-Pull).

Фундаментальная модель E. Lee [5] постулирует, что миграция является результатом действия негативных (push) и позитивных (pull) факторов. Для выпускника-медика в КБР выталкивающими факторами выступают: относительно низкий уровень заработной платы, менее развитая материально-техническая база по сравнению с центральными регионами, высокая профессиональная нагрузка, ограниченные возможности для

карьерного и профессионального роста. Притягивающие факторы столичных центров представляют собой обратный набор: высокая зарплата, работа на современном оборудовании, доступ к передовым методикам, карьерные перспективы и развитая городская инфраструктура.

В теории человеческого капитала (Human Capital) G. S. Becker [6] предлагает рассматривать переезд как инвестиционное решение. Индивид оценивает ожидаемые выгоды (будущий доход) и сопоставляет их с издержками. Для выпускника КБГУ годы учебы воспринимаются как стартовый капитал. Если в Нальчике отдача оценивается как низкая, а в Москве – как высокая, рациональный выбор склоняется в сторону отъезда.

Теория сетей и транснационализма С. Вертовеца [7] подчеркивает, что решения редко принимаются в социальном вакууме. Уже существующие сети (земляки, однокурсники) выполняют функции поддержки, снижая риски и издержки переезда. Это создает феномен «цепной миграции». Для выпускников КБГУ эти сети особенно значимы. Сформированные в студенчестве связи, усиленные этнической и земляческой солидарностью, создают в Москве готовую систему поддержки, делая отъезд в ординатуру переходом в знакомую среду.

Однако изучение моделей миграции полезно не только для понимания происходящих миграционных процессов в республике, но и для выявления последствий их влияния на устойчивое региональное развитие Кабардино-Балкарской Республики.

Теория «утечки-притока умов» (Brain Drain-Gain) описывает экономические модели, исследующие взаимосвязь образования, безработицы и миграции и показывающие, что отток квалифицированных кадров из бедного региона в богатый может парадоксальным образом стимулировать рост инвестиций в человеческий капитал среди остающегося населения [8]. Это происходит потому, что перспектива миграции повышает ожидаемую отдачу от образования, побуждая больше людей получать навыки, даже если они в итоге останутся. Однако для КБР этот потенциальный выигрыш нивелируется масштабами оттока: согласно исследованиям российских регионов, 75–80 % вновь формируемого человеческого капитала в периферийных областях уходит на компенсацию потерь, вызванных миграцией [9].

Аналогичные закономерности прослеживаются и в Китае, где потоки высококвалифицированных кадров из внутренних провинций в прибрежные мегаполисы усиливают региональное неравенство и формируют «ловушки развития» для регионов-доноров [10].

Устойчивое развитие региона невозможно без положительной динамики накопления человеческого капитала. Исследования демографических процессов в регионах России показывают, что отток населения, особенно молодежи и квалифицированных кадров, ведет к замедлению темпов накопления человеческого капитала, а в перспективе – к его абсолютному сокращению [9]. Это формирует «ловушку развития»: регион теряет наиболее активных и образованных жителей, что снижает его инвестиционную привлекательность, ухудшает качество социальных услуг (включая здравоохранение) и провоцирует дальнейший отток.

На примере малых стран (с населением менее 2 млн человек) показано, что ограниченный размер популяции создает специфические уязвимости: невозможность подготовки узких специалистов внутри региона, ограниченность карьерных траекторий, высокая чувствительность к оттоку даже одного-двух ключевых специалистов [11]. Эти выводы напрямую применимы к КБР, где медицинский факультет является единственным центром воспроизводства кадров, а отток каждого кандидата или доктора наук наносит непропорционально большой урон научно-образовательному потенциалу республики.

Прямое применение общих моделей без учета специфики КБР ведет к упрощенному пониманию проблемы. Анализ системы здравоохранения и рынка труда республики² позволяет выявить уникальную конфигурацию факторов.

В Кабардино-Балкарской Республике формируется устойчивая модель внутрирегиональной миграции медицинских кадров, имеющая выраженный центростремительный вектор – из горных и отдаленных сельских районов в столицу республики, город Нальчик. Этот процесс обусловлен комплексом взаимосвязанных факторов, которые не только перераспределяют кадровые ресурсы внутри региона, но и создают угрозы для его долгосрочной демографической и социальной устойчивости.

Медицинская инфраструктура, высокотехнологичное оборудование и наиболее квалифицированные специалисты сконцентрированы в основном в Нальчике. Здесь расположены республиканская клиническая больница, специализированные диспансеры, перинатальный центр и основные диагностические отделения. Районные больницы, особенно в горной зоне (Черекский, Эльбрусский районы) и отдаленных населенных пунктах (Тырныауз, села Прохладненского района), функционируют в условиях хронического недофинансирования и кадрового дефицита.

Данная гиперцентрализация создает эффект «воронки»: молодые специалисты, начиная карьеру в районах, стремятся перебраться в Нальчик ради доступа к современному оборудованию, возможности профессионального роста и более высокой оплаты труда. В результате первичное звено здравоохранения в сельской местности оказывается в состоянии перманентного дефицита кадров, что непосредственно влияет на доступность и качество медицинской помощи для значительной части населения республики.

Притягивающие факторы мегаполисов усиливаются наличием мощных земляческих сетей. Выпускники КБГУ прошлых лет, добившиеся успеха в федеральных центрах, становятся «точками притяжения» для последователей, формируя устойчивые миграционные коридоры³. Это делает отток самоподдерживающимся процессом.

Проведем анализ миграции высококвалифицированных кадров в КБР (2015–2023 гг.).

Представленная таблица отражает динамику миграционных потоков среди населения 14 лет и старше, отдельно выделены лица с высшим образованием, а также имеющие ученую степень кандидата или доктора наук. Анализ охватывает девять лет, что позволяет проследить тенденции и выявить резкие изменения (скачки) показателей.

Общий миграционный прирост (все возрасты) на протяжении всего периода остается отрицательным, за исключением 2021 года, когда зафиксирован небольшой приток (+346 человек). Наибольшая убыль наблюдалась в 2015 году (–3069 человек), 2018 году (–2959 человек) и 2022 году (–3039 человек). Наименьшая убыль (почти нулевая) – в 2019 году (–202 человека).

Миграция лиц с высшим образованием также демонстрирует устойчивый отток (от –304 до –984 человек в год). При этом в 2015–2019 годах масштаб убыли был значительно выше (от –634 до –984 человек), а с 2020 года снизился до уровня 300–400 человек в год. Это может свидетельствовать об изменении структуры миграции: либо сократился выезд дипломированных специалистов, либо увеличился их приток. Прирост докторов наук до 2019 года был нулевым или отрицательным, однако с 2020 года наблюдается небольшой положительный приток (в 2020 г. +3 человека, в 2021 г. +1 человек, в 2022 г. +3 человека,

² Аналитический отчет Министерства здравоохранения КБР «О потребности в медицинских кадрах и их подготовке на 2023–2025 гг.» / Министерство здравоохранения Кабардино-Балкарской Республики. Нальчик, 2022. 45 с.

³ Там же.

в 2023 г. +1 человек). Числа малы, но тенденция к улучшению заметна. По кандидатам наук фиксируется почти ежегодная убыль, причем в 2023 году она достигла максимума (–12 человек) при общем небольшом числе мигрантов.

Таблица 1. Миграция высококвалифицированного труда в КБР, человек

Table 1. Migration of highly qualified human capital in the Kabardino-Balkarian Republic, people

Год	Поток	Всего мигрантов (14+)	Высшее образование	Доктора наук	Кандидаты наук
2015	Прибыло	10017	2610	4	5
	Выбыло	13086	3488	4	13
	Прирост	-3069	-878	0	-8
2016	Прибыло	10310	2762	3	13
	Выбыло	12363	3514	3	15
	Прирост	-2053	-752	0	-2
2017	Прибыло	10212	2898	2	7
	Выбыло	12163	3532	4	11
	Прирост	-1951	-634	-2	-4
2018	Прибыло	9939	2663	3	4
	Выбыло	12898	3586	6	11
	Прирост	-2959	-923	-3	-7
2019	Прибыло	10974	1965	4	2
	Выбыло	11176	2949	6	8
	Прирост	-202	-984	-2	-6
2020	Прибыло	9546	1462	7	12
	Выбыло	10472	1772	4	17
	Прирост	-926	-310	+3	-5
2021	Прибыло	8825	1259	4	7
	Выбыло	8479	1688	3	13
	Прирост	+346	-429	+1	-6
2022	Прибыло	9119	1567	3	12
	Выбыло	12158	1917	0	16
	Прирост	-3039	-350	+3	-4
2023	Прибыло	8686	1537	3	11
	Выбыло	9835	1841	2	23
	Прирост	-1149	-304	+1	-12

Составлено авторами по данным Росстата

Наиболее высокая убыль мигрантов, наблюдавшаяся в 2015 году (–3069 человек), связана с общероссийским экономическим кризисом после 2014 года (падение цен на нефть, санкции, девальвация рубля), снижением реальных доходов населения и ростом безработицы в регионах. Поскольку КБР традиционно является донором рабочей силы, в условиях общероссийского кризиса усилился отток населения в более благополучные регионы. Отток специалистов с высшим образованием (–878 человек) также максимален в эти годы.

Особенностью 2019 года является минимальный общий отток (–202 человека) при максимальном оттоке лиц с высшим образованием (–984 человека). Данное расхождение может объясняться сочетанием локальных социально-экономических сдвигов с общероссийскими особенностями. Экономика республики начала создавать рабочие места, однако преимущественно в отраслях дорожного и жилищного строительства, сельском хозяйстве и туризме. Появилась возможность трудоустройства для работников рабочих специальностей и сферы услуг, что способствовало снижению общей убыли. В то же время созданные

рабочие места характеризовались низкой оплатой и не требовали высокой квалификации, поэтому ситуация для лиц с высшим образованием существенно не изменилась.

На фоне оттока местной молодежи в республику продолжается приток мигрантов (в основном из стран СНГ, а также турок-месхетинцев⁴), которые занимают ниши в торговле, сельском хозяйстве и строительстве, часто соглашаясь на условия, неприемлемые для местных специалистов с образованием [12]. Это создает эффект замещения, при котором количественные потери населения компенсируются, но качество человеческого капитала снижается.

Вторым фактором аномально низкой убыли населения в 2019 году является изменение правил статистического учета. С 1 января 2019 года МВД начало передавать более полные данные по новой форме статистического наблюдения, тогда как в 2018 году наблюдался существенный недоучет мигрантов [13]. Таким образом, «аномально низкая» убыль (–202 человека) в КБР отчасти может быть следствием того, что в статистику 2019 года попало больше людей (в том числе временно зарегистрированных), чем в 2018-м, что создало заметный контраст.

Резкое сокращение убыли по всем категориям (общая –926 человек, высшее –310 человек) наблюдается в 2020 году. Это связано с началом пандемии COVID-19, введением ограничений на передвижение, закрытием границ и переходом на удаленную работу. Миграционная активность значительно снизилась (число прибывших и выбывших сократилось). Отток уменьшился, но сохранился. При этом среди докторов наук впервые появился положительный прирост (+3 человека) – вероятно, часть ученых вернулась в регион из-за рубежа или из других городов. В глобальном масштабе подобные возвратные движения фиксировались и в европейских странах, что подтверждается данными ВОЗ: пандемия временно изменила траектории циркуляции медицинских кадров, однако долгосрочный тренд зависимости периферийных систем от импорта специалистов сохраняется⁵. Кандидаты наук все еще убывают (–5 человек), но в меньшем количестве, чем в предыдущие годы.

Единственный год с общим положительным приростом (+346 человек) – 2021-й. Второй год пандемии, постепенное снятие ограничений, возобновление миграции. По данным Росстата, в 2021 году в целом по России наблюдался миграционный прирост за счет международной миграции (возврат соотечественников, трудовых мигрантов). Для КБР, вероятно, сыграло роль возвращение жителей, ранее уехавших в другие регионы или страны, в связи с ухудшением условий там (например, локдауны в крупных городах). Несмотря на общий прирост, убыль среди дипломированных специалистов продолжается (–429 человек). То есть приехало больше людей без высшего образования.

После временной стабилизации в 2022 году произошло увеличение оттока (–3039 человек), данный период ознаменован началом специальной военной операции на Украине, частичной мобилизацией, массовым выездом граждан за рубеж и внутренней миграцией, обусловленной геополитической нестабильностью. Из КБР выбыло 12 158 человек, прибыло 9 119 – разрыв существенен. Вероятно, многие уехали в другие регионы РФ или за границу, опасаясь призыва или экономических трудностей. Доктора наук тем не менее показали прирост (+3 человек) – возможно, вследствие возвращения или приезда из других регионов, однако кандидаты наук продолжали убывать (–4 человека). Максимальный отток кандидатов наук за весь период зафиксирован в 2023 году (–12 человек). Возможно, это связано с отсутствием перспектив для молодых ученых, низкими зарплатами в научной и образовательной сферах, переездом в другие регионы или за границу.

⁴ Аналитический отчет УФМС России по Кабардино-Балкарской Республике за 2025 год / Управление Федеральной миграционной службы России по КБР. Нальчик, 2026. 85 с.

⁵ Доклад Всемирной организации здравоохранения: Европа зависит от иностранных медицинских кадров, что вызывает трансграничные цепные реакции = WHO report: Europe's reliance on foreign-trained health workers triggers cross-border ripple effects / Всемирная организация здравоохранения. Женева, 2025. 228 с. (Health Workforce Series).

Таким образом, Кабардино-Балкария на протяжении 2015–2023 годов остается регионом миграционного оттока, особенно среди лиц с высшим образованием. Колебания общей убыли связаны с макроэкономическими и геополитическими событиями (кризис 2015 года, пенсионная реформа 2018 года, пандемия 2020–2021 годов, военная операция 2022 года). Наибольший отток высококвалифицированных кадров (с высшим образованием) фиксировался в 2015–2019 годах. После пандемии его масштаб снизился, но полностью не прекратился. Среди кандидатов наук наблюдается устойчивая убыль, причем в 2023 году она стала максимальной, что может сигнализировать о проблемах закрепления молодых ученых в регионе. Доктора наук, напротив, с 2020 года демонстрируют небольшой положительный прирост – возможно, это следствие программ поддержки научных кадров или возвратного движения.

Отток высококвалифицированных медицинских кадров оказывает многомерное негативное влияние на демографическую ситуацию в регионе.

Хронический дефицит врачей, особенно узких специалистов, ведет к росту заболеваемости и смертности. Как показывают исследования в других регионах, отставание в обеспеченности врачами (в КБР этот показатель составляет 35–40 человек на 10 тыс. населения против 45–50 человек в среднем по РФ) коррелирует с более высокими показателями младенческой смертности и меньшей продолжительностью жизни. Снижение обеспеченности врачами в сельской местности, оказывающими первичную медико-санитарную помощь в амбулаторных условиях, ведет к запущенным случаям заболеваний и предотвратимой смертности [14].

Мигранты – преимущественно молодые люди наиболее активного репродуктивного возраста. Их отток снижает долю населения в трудоспособном возрасте, уменьшает рождаемость, (поскольку уезжают потенциальные родители), увеличивает долю пожилого населения, требующего больше медицинской помощи, которую некому оказывать из-за оттока врачей⁶.

Как показывают расчеты для регионов Азиатской России, при сохранении текущих тенденций к 2030 году накопление человеческого капитала начнет замедляться и может перейти в фазу абсолютного сокращения [12]. Для КБР, где отток лиц с высшим образованием составляет сотни человек ежегодно, этот риск не менее актуален.

Регион попадает в циклическую зависимость: отток квалифицированных кадров снижает качество социальных услуг (прежде всего здравоохранения и образования), что делает регион менее привлекательным для жизни и работы, провоцируя новый виток оттока [6, 8]. Особенно остро это проявляется в сельских и отдаленных горных районах КБР, где отсутствие врачей и современного оборудования ведет к запустению территорий.

Исследователи отмечают ограниченный эффект федеральных программ, таких как «Земский доктор», которые часто воспринимаются как временная мера, после которой специалист стремится уехать [15]. Для КБР необходимы более комплексные меры, учитывающие не только экономические, но и социальные, а также инфраструктурные факторы. Российские исследования жизненных стратегий талантливой молодежи подчеркивают, что решающими становятся не только денежные стимулы, но и наличие «точек притяжения» – современной научной среды, каналов вертикальной мобильности и чувства сопричастности к развитию региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенный анализ демонстрирует, что феномен миграции выпускников-медиков КБГУ подчиняется как универсальным экономическим закономерностям, так и общероссийской тенденции центростремительного перераспределения человеческого капитала.

⁶Численность и миграция населения Российской Федерации в 2016–2024 гг.: статистический бюллетень / Росстат. Москва, 2025. 98 с.

Теория «утечки мозгов» точно описывает экономический ущерб республике. Модель push-pull факторов позволяет проанализировать причины оттока, а теория человеческого капитала – объяснить рациональность выбора молодых специалистов.

Теории региональной устойчивости показывают, что отток квалифицированных кадров создает долгосрочную угрозу демографическому развитию КБР, ведя к старению населения, росту смертности и снижению качества человеческого капитала.

Данные Росстата за 2015–2023 гг. подтверждают устойчивый характер оттока лиц с высшим образованием и критическую убыль кандидатов наук (максимальное значение –12 в 2023 г.). Резкие скачки миграционной убыли коррелируют с макроэкономическими и геополитическими кризисами (2015, 2018, 2022 гг.).

Для кавказского социума с сильными родовыми и земляческими связями теории сетей и транснационализма являются ключевыми для понимания самоподдерживающегося характера миграции.

Наиболее перспективной для КБР является концепция «циркуляции умов». Задача региональной власти – создать институты (ассоциации выпускников, телемедицинские хабы, программы возвратных грантов), которые позволят превратить диаспору в активный ресурс развития.

Таким образом, решение кадровой проблемы лежит не в изоляции, а в повышении конкурентоспособности республики как профессиональной среды, что требует комплексной стратегии, сочетающей экономические стимулы, модернизацию инфраструктуры и использование культурного капитала. Без этого КБР рискует оказаться в «ловушке развития», выход из которой потребует значительных федеральных вложений и длительного периода восстановления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шейман И. М. Кадровый дефицит в здравоохранении: причины и пути преодоления // Вопросы государственного и муниципального управления. 2025. № 4. С. 110–138. DOI: 10.17323/1999-5431-2025-0-4-110-138

Sheiman I.M. Personnel shortage in healthcare: causes and ways to overcome it. *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipal'nogo upravleniya* [Public Administration Issues]. 2025. No. 4. Pp. 110–138. DOI: 10.17323/1999-5431-2025-0-4-110-138. (In Russian)

2. Bhagwati J. and Hamada K. The brain drain, international integration of markets for professionals and unemployment: a theoretical analysis. *Journal of Development Economics*. 1974. No. 1. Pp. 19–42. DOI: 10.1016/0304-3878(74)90020-0

3. Saxenian A. The new argonauts: regional advantage in a global economy. Cambridge: Harvard University Press, 2005. 424 p.

4. Zweig D. Competing for talent: China's strategies to reverse the brain drain. *International Migration Review*. 2006. Vol. 40. No. 3. Pp. 654–684. DOI: 10.1111/j.1564-913X.2006.tb00010.x

5. Lee E.S. A theory of migration. *Demography*. 1966. Vol. 3. No. 1. Pp. 47–57. DOI: 10.2307/2060063

6. Becker G.S. Human capital: a theoretical and empirical analysis, with special reference to education. New York: National Bureau of Economic Research, 1964. 187 p.

7. Вертовец С. В. Транснационализм и миграционные процессы в современном мире. М.: ИСПИ РАН, 2009. 215 с.

Vertovets S.V. *Transnatsionalizm i migratsionnyye protsessy v sovremennom mire* [Transnationalism and migration processes in the modern world]. Moscow: ISPI RAS, 2009. 215 p. (In Russian)

8. Brücker H. Education, unemployment and migration. *Journal of Public Economics*. 2010. Vol. 94. No. 5–6. Pp. 353–366. DOI: 10.1016/j.jpubeco.2010.01.005

9. Слепенкова Ю. М. Тенденции и особенности динамики человеческого капитала в Азиатской России // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. 2023. Т. 16. № 10. С. 1768–1774. DOI: 10.17516/1997-1370-2023-16-10-1768-1774

Slepenkova Yu.M. Dynamics and peculiarities of human capital formation in Asian Russia. *Journal of the Siberian Federal University. Humanities*. 2023. Vol. 16. No. 10. Pp. 1768–1774. DOI: 10.17516/1997-1370-2023-16-10-1768-1774. (In Russian)

10. Zhang Y. High-level talent flow and its influence on regional unbalanced development in China. *Journal of Geographical Sciences*. 2022. Vol. 32. No. 8. Pp. 1523–1543. DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-11-149-168

11. Richardson E. Small countries face specific challenges in health workforce sustainability. *Health Policy*. 2025. Vol. 165. Article 105545. DOI: 10.1016/j.healthpol.2025.105545

12. Куухабиев А. В. Миграционные проблемы в общественно-политической жизни Кабардино-Балкарии в конце XX – начале XXI века // Электронный журнал «Кавказология». 2019. № 2. С. 105–126. DOI: 10.31143/2542-212X-2019-2-105-126

Kushkhabiev A.V. Migration problems in the socio-political life of Kabardino-Balkaria at the end of the 20th – beginning of the 21st century. *Kavkazologiya*. 2019. No. 2. Pp. 105–126. DOI: 10.31143/2542-212X-2019-2-105-126. (In Russian)

13. Чудиновских О. С., Степанова А. В. О качестве федерального статистического наблюдения за миграционными процессами // Демографическое обозрение. 2020. Т. 7. № 1. С. 54–82. DOI: 10.17323/demreview.v7i1.10820

Chudinovskikh O.S., Stepanova A.V. On the quality of the federal statistical observation of migration processes. *Demographic Review*. 2020. Vol. 7. No. 1. Pp. 54–82. DOI: 10.17323/demreview.v7i1.10820. (In Russian)

14. Ходакова О. В., Сенотрусова Ю. Е. Анализ обеспеченности врачебными кадрами медицинских организаций, оказывающих первичную медико-санитарную помощь в сельской местности // Здравоохранение Российской Федерации. 2024. Т. 68. № 6. С. 464–471. DOI: 10.47470/0044-197X-2024-68-6-464-471

Khodakova O.V., Senotrusova Yu.E. Analysis of the provision of medical personnel in medical organizations providing primary health care in rural areas. *Zdravookhraneniye Rossiyskoy Federatsii* [Healthcare of the Russian Federation]. 2024. Vol. 68. No. 6. Pp. 464–471. DOI: 10.47470/0044-197X-2024-68-6-464-471. (In Russian)

15. Армасhevская О. В. Итоги десятилетия: программа «Земский доктор». Аналитический обзор // Социальные аспекты здоровья населения. 2025. Т. 71. № 3S. С. 10. DOI: 10.21045/2071-5021-2025-71-3S-10

Armashevskaya O.V. Results of the decade: the Zemsky doctor program. Analytical review. *Sotsial'nyye aspekty zdorov'ya naseleniya* [Social Aspects of Population Health]. 2025. Vol. 71. No. 3S. P. 10. DOI: 10.21045/2071-5021-2025-71-3S-10. (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

Думанова Аминат Хасеновна, канд. экон. наук, ст. науч. сотр. отдела «Моделирование социально-экономических процессов», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

dumanovanata@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7365-9824>, SPIN-код: 5464-8893

Камбиев Мухтар Муссаевич, студент 6-го курса 1.6.44 группы Института клинической медицины, Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Пироговский университет);

117513, Россия, Москва, ул. Островитянова, 1, строение 6;

kambiev007mm@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9288-1363>

Information about the authors

Aminat Kh. Dumanova, Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher, Department of Modeling of Socio-Economic Processes, 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;

dumanovanata@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7365-9824>, SPIN-code: 5464-8893

Mukhtar M. Kambiev, 6th year Student, (Group 1.6.44), Institute of Clinical Medicine, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Pirogov University);

1, Ostrovityanova street, building 6, Moscow, 117513, Russia;

kambiev007mm@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9288-1363>

УДК 504.062

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-205-216>

 GDxDHT

Перспективы развития биоэкономики в Российской Федерации

Н. И. Комков[✉], Н. Н. Лантер

Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук
117418, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 47

Аннотация. Происходящие в мировом сообществе тренды показывают, что глобальной проблемой для человечества становится постепенное истощение различных ресурсов, что приводит к снижению уровня жизни населения, нехватке продовольствия, увеличению антропогенных нагрузок, следствием которого становится рост природных катаклизмов. Подобные проблемы касаются также нашей страны. Важным условием решения этих вопросов является создание экономики замкнутого цикла на основе использования возобновляемых биологических ресурсов.

Цель исследования – анализ условий внешней среды и факторов развития научных знаний, необходимых для перехода РФ от модели неограниченного потребления ископаемых природных ресурсов к модели использования потенциалов, заложенных в биоэкономике.

Материалы и методы исследования. В работе использованы общеэкономические методы исследования: анализ, синтез, обобщение, системный подход. Материалом для исследования послужили данные из зарубежных и отечественных источников по изучаемой тематике. Использовались правовые механизмы и целевые показатели, предлагаемые в рамках национального проекта «Биоэкономика».

Результаты. Сложившиеся научные заделы и условия для развития биоэкономики позволяют прогнозировать высокую синергетическую эффективность биотехнологических проектов, обеспечат продовольственную и лекарственную безопасность через развитие высокотехнологичных производств. Обосновано, что в стране сложились необходимые условия, позволяющие перейти на новую модель устойчивого развития экономики на основе достижений биотехнологий, что позволит повысить уровень природосбережения.

Выводы. Проведенное исследование выявило естественный рациональный переход развитых стран от модели неограниченного потребления ископаемых природных ресурсов к модели экономики замкнутого цикла на базе биоэкономики. В РФ биоэкономика может стать эффективным решением и лучшим выбором моделей развития на основе природо- и ресурсосбережения. Для ускорения данного процесса необходимо расширение числа вовлеченных в биотехнологические исследования НИИ, вузов и бизнеса, опережающая подготовка кадров для нужд биоэкономики и комплексная государственная поддержка в формате льгот и правовых преференций

Ключевые слова: биотехнологии, биоэкономика, биоаналоги, природосбережение, интеграция знаний, подготовка кадров

Поступила 22.04.2026, одобрена после рецензирования 22.05.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Комков Н. И., Лантер Н. Н. Перспективы развития биоэкономики в Российской Федерации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 205–216. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-205-216

© Комков Н. И., Лантер Н. Н., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Perspectives on bioeconomy development in the Russian Federation

N.I. Komkov[✉], N.N. Lanter

Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences
47, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117418, Russia

Abstract. Trends in the global community indicate that the gradual depletion of resources has become a worldwide problem, leading to a decline in living standards, food shortages, and increased anthropogenic pressure that triggers more frequent natural disasters. The Russian Federation faces similar critical challenges. A key prerequisite for addressing these challenges is the transition to a circular bioeconomy based on the use of renewable biological resources.

Aim. The study aims to analyze the environmental conditions and factors driving the development of scientific knowledge required for the widespread implementation of research across various sectors of the circular economy, identifying new approaches for the Russian Federation's transition from a model of unlimited consumption of fossil resources to one that utilizes the full potential of the bioeconomy.

Materials and methods. This study utilizes general economic research methods, including analysis, synthesis, generalization, and a systems approach. The research materials include data from both domestic and foreign sources related to the topic under study. The research also utilizes the legal mechanisms and target indicators proposed within the framework of the "Bioeconomy" National Project.

Results. The existing scientific foundation and current conditions for bioeconomy development indicate a high synergistic potential for biotechnology projects across targeted industries, allowing the resulting eco-friendly materials to mitigate environmental impacts, while high-tech industrial advancements will ensure national food and drug security. The findings demonstrate that the Russian Federation possesses the foundational capacity to transition toward a bioeconomy-driven sustainable development model, ultimately enhancing ecological preservation.

Conclusions. The research highlights a logical and rational transition in developed countries away from unlimited fossil fuel consumption toward a circular bioeconomy that prioritizes ecological preservation. In the Russian Federation, the bioeconomy can become an effective solution and the optimal choice for a development model centered on environmental conservation. To accelerate this process, it is necessary to expand the network of research institutes, universities, and businesses involved in biotechnology research, proactively train personnel for the bioeconomy, and provide comprehensive government support through incentives and legal preferences.

Keywords: biotechnology, bioeconomics, biosimilars, environmental protection, knowledge integration, personnel training

Submitted 22.04.2026,

approved after reviewing 22.05.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Komkov N.I., Lanter N.N. Perspectives on bioeconomy development in the Russian Federation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 205–216. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-205-216

ВВЕДЕНИЕ

Одной из глобальных проблем человечества остается снижение уровня жизни из-за нехватки продовольствия, воды и роста заболеваемости. В условиях увеличения издержек в производстве питания и лекарств для обеспечения растущего населения планеты в условиях антропогенных и природных катаклизмов из-за изменения климата встал вопрос о поиске эффективных решений для мировой экономики.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Целью настоящего исследования является анализ условий внешней среды и факторов развития научного знания, необходимых для массового внедрения в РФ научных разработок в области биоэкономики. Сопоставление достижений российских ученых с лучшим мировым опытом в этой области позволило доказать актуальность и высокую перспективность выбранных секторов экономики, благоприятный рыночный спрос, прогнозируемую коммерциализацию инноваций с учетом потенциала импортозамещения и экспорта.

Расширение числа вовлеченных в биотехнологические исследования НИИ, вузов и бизнеса, системная опережающая подготовка кадров [1] для нужд биоэкономики позволят обеспечить комплексную государственную поддержку в формате льгот и правовых преференций, предусмотренных в новом национальном проекте «Биоэкономика».

В целом сложившиеся научные заделы и условия для развития биоэкономики в РФ позволяют прогнозировать высокую синергетическую эффективность биотехнологических проектов в отдельных отраслях, что может обеспечить устойчивое развитие и достойное место РФ в мировой экономике.

ПОТРЕБНОСТЬ В БИОЭКОНОМИКЕ В МИРЕ И РФ

Первым экономистом, осознавшим разрушительные последствия человеческой деятельности для всей планеты, стал основоположник биоэкономики Николас Георгеску-Роген (1906–1994). В 1971 году в своем труде «Закон энтропии и экономический прогресс» [1] он применил закон энтропии ко всей экономической деятельности, доказав ее необратимость и неизбежность истощения ресурсов планеты, невозможность бесконечного экономического роста. Любое производство увеличивает беспорядок (энтропию) в окружающей среде. Полезное вещество превращается в рассеянное загрязнение, для нейтрализации которого нужны технологии и энергия. Николас Георгеску-Роген критиковал слепую веру в технологический прогресс и игнорирование физических законов. Он доказал ограниченность экономического прогресса. Действительно, человек изменяет природу намного быстрее, чем постигает ее и осознает катастрофические последствия своей деятельности. Реальные последствия естественного изменения климата в сочетании с антропогенным влиянием на планету трудно оценить даже при моделировании искусственным интеллектом (ИИ).

Так, последние исследования и модели изменения климата показали реальные угрозы смещения течения Гольфстрим на 219 км на север. Тающий лед приводит к опреснению вод океана и снижению плотности вокруг полюсов. Исчезновение Северо-Атлантического субтропического хребта может изменить течение Гольфстрим и погрузить Европу в новый ледниковый период.

Учитывая прогнозы ученых, Европейское агентство по окружающей среде оценивает экономические потери ЕС от глобального потепления в 2021–2024 гг. в \$245 млрд, что в 24 раза больше, чем в 1980-х гг. Нехватка воды и пожаробезопасность – это лишь немногие физические факторы риска для многих секторов экономики, включая финансовый сектор, центры обработки и хранения информации (ЦОД), страховой сектор. Стихийные бедствия, ежегодно превышающие историческую норму, повышают затраты компаний, вынуждая их перейти на углеродно нейтральные и природоподобные технологии, биоэкономику.

Исследование выявило, что практически в каждой отрасли экономики есть значительный потенциал перехода на биотехнологии [3]. Если взять сферу строительства, то только один компонент – бетон – генерирует 8 % углекислого газа, а вся строительная сфера в

ответе за треть выбросов CO₂. Эксперты прогнозируют совокупные выбросы строительного сектора до 440 гигатонн CO₂. Уже сегодня многие страны отказываются от углеродоемких ресурсов в пользу экологичных, переработанных и биоматериалов. Огромные инвестиции направляются в НИОКР. Так, в Вустерском политехническом институте США изобрели новые углеродно нейтральные строительные блоки с отрицательным углеродным следом из ферментативного материала высокой прочности и долговечности, способные превращать CO₂ в твердые частицы. Производство 1 куб м ферментативного бетона поглощает 6 куб м CO₂, в то время как изготовление 1 куб м обычного бетона дает 330 кг выбросов CO₂.

Другим активно развивающимся сектором является гелиоэнергетика, на которую в 2024 году пришлось 7 % мировой генерации энергии. В июне 2025 года солнечная генерация в ЕС впервые превысила атомную, достигнув 22,1 %. Крупнейшая в мире солнечная электростанция концентрированного типа Уарзат в Марокко на площади 3000 га успешно демонстрирует новые подходы к «зеленой» энергетике. РФ обладает огромным потенциалом в области фотоэлектрической генерации, геотермальной энергетики, биологической и традиционной гелиоэнергетики. Государственная программа строительства возобновляемых источников энергии (ВИЭ) стартовала в 2013 году. Сегодня энергия солнца позволяет генерировать 1 % от общего объема энергии РФ (Оренбургская, Уфимская и другие СЭС).

На фоне отмены в начале 2026 года в США норм климатического регулирования и снижения ориентации промышленности на климатосбережение важнейшие чувствительные отрасли – химическая промышленность, микробная очистка воды и почв, производство биотоплива – часто отказываются от инвестиций в создание и комплексное внедрение «зеленых» технологий.

При этом в РФ активно создается экономика замкнутого цикла и углеродно нейтральная инфраструктура на основе новых подходов – биоэкономики. Биоэкономика – это модель хозяйственной деятельности на основе использования возобновляемых биологических ресурсов вместо ископаемого сырья. В итоге создаваемые экологичные материалы снижают вред природе и обеспечивают продовольственную и лекарственную безопасность через развитие высокотехнологичных производств (ферменты, биотопливо, биопластик). Сегодня в мире работают более 9100 биотехнологических компаний, охватывающих 540 видов деятельности, из которых 2500 – в США (по данным справочника Biotech-Carees).

Мировые лидеры биоэкономики (AMGEN, BIOMARINE PHARMACEUTICAL, NOVARTIS, PFIZER, GILEAD SCIENCES, SANOFI и другие) играют важную роль в таких направлениях, как:

1. Биофармацевтика (синтез инсулина, интерферонов, вакцин от рака).
2. Генная инженерия (редактирование генома).
3. Сельское хозяйство (ГМО, аквакультура, ветеринария).
4. «Зеленые» технологии в экологии (использование микроорганизмов в очистке воды и почвы – биоремедиация, биопластик).
5. Пищевое производство (ферменты, биотопливо).
6. Новые материалы (биостроительство, бионика).

Вышеприведенные примеры демонстрируют активность мировых корпораций в области разработки и коммерциализации биотехнологий, быстрый рост этого сектора (в 2023 году оборот \$1,38 трлн с прогнозом до \$4,25 трлн к 2033–2034 гг.). Темпы роста оцениваются около 10–14 % в год. Что касается российского рынка биотехнологий, то он оценивается в 440–450 млрд руб. В настоящее время отрасль включает 230 российских компаний, 60 % которых заняты в области медицины.

Отметим, что в мире используют условную классификацию биотехнологий по 10 цветам в соответствии с объектами деятельности. Первую типологию из трех цветов в 2003 году предложила директор Национального американского фонда Рита Колвел (красный – биомедицина, зеленый – сельскохозяйственная биотехнология и белый – промышленная биотехнология).

Таблица 1. Условная классификация биотехнологий по цвету [2]¹

Table 1. Conditional classification of biotechnologies by color

№	Цветовая категория	Области знаний
1.	Красная биотехнология	Медицинская биотехнология, биофармацевтика
2.	Белая биотехнология	Промышленная биотехнология, биоинженерия, молекулярная и клеточная биотехнология
3.	Зеленая биотехнология	Сельскохозяйственная биотехнология, агробиотехнология, экологическая биотехнология, биоэнергетика
4.	Желтая биотехнология	Пищевая биотехнология
5.	Серая биотехнология	Техническая, промышленная биотехнология
6.	Золотая биотехнология	Биоинформатика, нанобиотехнология
7.	Синяя биотехнология	Аквабиотехнология
8.	Коричневая биотехнология	Биотехнология пустынь и засушливых зон
9.	Фиолетовая биотехнология	Патенты, публикации, открытия, права на интеллектуальную собственность
10.	Черная биотехнология	Биотерроризм, биологическое оружие, биопреступления, противоурожайные действия

Анализ показал, что основными драйверами роста выступают медицина (Red Biotech), промышленность (White Biotech) и сельское хозяйство (Green Biotech). Лидеры – США (AMGEN, GILEAD SCIENCES), Китай, Южная Корея (Samsung Biologics), Австралия (CSL Limited), Индия и страны Европы (PFIZER, NOVARTIS). Самой дорогой компанией в биотехнологической и фармацевтической отрасли является Eli Lilly (США).

Азиатско-Тихоокеанский регион считается самым быстрорастущим рынком в плане инвестиционной активности в НИОКР. В РФ в области биомедицины наиболее известные центры: Институт цитологии и генетики РАН, НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи РАМН, ЗАО «Алтайвитамины», ЗАО Генериум», «Р-Фарм», «Артген Биотех», Центр высоких технологий «ХимРар», ЗАО «Биокад», группа компаний «Биопроцесс», ООО «Фармапарк», ЗАО «Эвалар», «Фармасинтез».

Проведенный анализ деятельности биотехнологических компаний в РФ, наряду с формированием потребителей биотехнологического рынка, показал рост рисков при инвестировании в «зеленые» проекты, включая:

1. Высокую технологическую неопределенность.
1. Частые регуляторные изменения (изменение законов и квот).
2. Финансовую и политическую нестабильность.
3. Высокую конкуренцию на рынках.

¹Источник: <https://habr.com>

Исследование также показало высокий риск инвестирования в компании, лишь имитирующие заботу об экологии («зеленый камуфляж»), что несет репутационные и финансовые потери. Во избежание таких ситуаций необходимо проведение тщательного аудита технологий, бизнес-модели и соответствия проекта заявленным экологическим и моральным стандартам. Риски «зеленых инвестиций» состоят в преувеличении или искажении экологических преимуществ проектов, когда инициативы представляются как экологически чистые, а по факту имеют минимальное положительное или даже отрицательное воздействие.

В целом отметим, что в мире биоэкономика стала эффективным решением и лучшим выбором моделей развития на основе природосбережения [4]. Итак, проведенное исследование выявило естественный рациональный переход развитых стран от модели неограниченного потребления ископаемых природных ресурсов без учета экологических последствий к модели экономики замкнутого цикла на базе биоэкономики с учетом экологосбережения. Созданные научные заделы в области биотехнологий удовлетворяют потребность всего мира в сохранении планеты и качества жизни населения. Практически все сектора мировой экономики имеют потенциал для перехода на ресурсосбережение без потери темпов экономического роста.

ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАПУСКА ПРОЕКТОВ ПО БИОЭКОНОМИКЕ В РФ

Указом Президента Российской Федерации № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» предполагается решение стратегической задачи – обеспечение технологической независимости и формирование новых рынков по направлению «биоэкономика». Проект «Биоэкономика» призван заложить фундамент для таких направлений, как химия, пищевая индустрия, экология, медицина, энергетика, сельское хозяйство. Именно в них созрели условия для глубокого внедрения биопроцессов и использования современных форматов на индустриальном уровне. Разрабатываются инструменты правового регулирования и целевые показатели биоэкономики, функционирующей на трех уровнях:

1. Микроуровень (продукция биотехнологических компаний и ее потребители).
2. Мезоуровень (эко-индустриальные парки и площадки).
3. Макроуровень (город, регион, страна).

В РФ создана сильная основа советского опыта биотехнологического производства, которая в рамках нового национального проекта поддержит существующие научные школы для подготовки специалистов и совместных проектов с дружественными странами. Проект «Биоэкономика» будет управляться на основе единого подхода без разделения полномочий между министерствами. Также запланировано создание инженерных центров при вузах, выделение грантов научным коллективам, подготовка кадров, введение экспериментальных правовых режимов, обеспечение безопасности каждого создаваемого продукта. Прогнозируется, что первые результаты появятся в 2026 году (работает крупный ускоритель «СКИФ» под Новосибирском), через 3–5 лет появятся первые разработки, а масштабное влияние на национальную экономику и здоровье населения будет видно через 10 лет, поскольку проект сложный, комплексный, реформаторский и рассчитан до 2050 года. В дальнейшем предполагается активный экспорт российских биотехнологий.

Отметим, что этот проект доказал несостоятельность линейной модели экономики (природный капитал используется линейно для экономического роста), что заставило ученых

искать новые экономические модели, одной из перспективных стала концепция устойчивого развития через потенциал биоэкономики.

Отметим основные цели и задачи биоэкономики как науки на стыке экологии, биологии и экономики, определяющей социально-экономические условия использования биологических систем и их регенерации:

1. Устойчивое развитие и сохранение экологии благодаря сокращению углеродного следа при переработке отходов и создании биоразлагаемых материалов.
2. Технологический суверенитет и импортозамещение. В РФ необходимо снизить зависимость от импорта критически важных компонентов (закваски, ферментов и лекарств) не менее чем в два раза к 2030 году.
3. Повышение эффективности сельского хозяйства через генетическое улучшение животных и растений, создание новой пищевой продукции (альтернативные белки, еда без поля). Важно учитывать этические и культурные нормы в этой чувствительной сфере.
4. Повышение энергоэффективности экономики через развитие биоэнергетики.
5. Создание замкнутых производственных циклов (циркулярная экономика).

В этой связи важно провести оценку всей доступной в РФ биомассы для создания новых технологий, ревизию научных заделов и патентных баз, поощрять бизнес и потребителей к внедрению принципов циклической экономики с целью повышения качества жизни. Среди ключевых систем биоэкономики отметим: устойчивое сельское хозяйство, рыболовство, лесное хозяйство и аквакультуру, производство биоэнергии, продуктов питания и кормов, биоразлагаемого пластика и одежды.

В РФ национальные проекты «Экологическое благополучие», «Эффективная и конкурентная экономика», «Новые технологии сбережения здоровья», «Новые материалы и химия», «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности», Федеральный проект «Экономика замкнутого цикла» заложили основу для реализации нового проекта «Технологическое обеспечение биоэкономики» (утвержден 16.04.2025 г.). Инструментом реализации этих проектов на местах стали отраслевые и региональные программы по переходу к экономике замкнутого цикла. Эти мероприятия обеспечат достижение национальной цели – «Экологическое благополучие», определенной Указом Президента РФ В. В. Путина № 309 от 07.05.2024 г.

Запущенный в РФ нацпроект «Биоэкономика» для обеспечения технологического лидерства к 2030–2036 гг. объединит растущие экологические требования и стандарты с экономическим ростом на основе научных достижений для рационального природопользования.

В итоге прогнозируется, что рынок промышленной биотехнологии значительно вырастет благодаря прорывам в отраслях, включая новые методики создания и потребления продукции. Микрофлюидика и биопринтинг, биокаталические процессы и биопроцессинг, цифровизация и искусственный интеллект (ИИ) – лишь часть инструментария в создании инновационных биотехнологий.

Проведенный анализ направлений НИОКР показал активно развивающийся сектор долголетия и качества жизни в РФ. Биотехнологические компании РФ демонстрируют успехи как на основе собственных научных заделов, так в формате стратегических альянсов с целью коммерциализации перспективных разработок. Такой методологический маркетинговый подход российского биотеха учитывает лучший мировой опыт, например, опыт BioMartin Pharmaceutical и Senoro в создании препарата от фенилкетонурии, CapitalBio (Китай) и Affymetrix (США) – мирового лидера в создании ДНК-чипов – в создании систем молекулярной диагностики и реагентов.

Таблица 2. Инновационные биотехнологические разработки в РФ [3]²**Table 2.** Innovative biotechnological research and development in the Russian Federation

	Название биотехнологии	Название компании
БИОТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ МЕДИЦИНЫ		
1.	Выращивание клеток головного мозга	НИУ БелГУ, Колледж биологических и поведенческих наук Лондонского университета Королевы Марии
2.	Маркеры рака	МФТИ
3.	Биопечать фрагментов органов	Институт регенеративной медицины Научно-технологического парка биомедицины Первого МГМН имени И. М. Сеченова
4.	Лекарства против ВИЧ	ФИЦ «Биотехнологии» РАН
5.	Нанопочта для лекарств	Сеченовский университет Минздрава РФ
6.	Нанокапсулы для ферментов	Институт фармации химии и биологии, НИУ БелГУ
7.	БАД из моллюсков	Севастопольский госуниверситет, Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН
8.	Ферментативные противогрибковые средства	МГУ
9.	Получение коллагена из медуз для лечения ран и ожогов	НОЦ Промышленные биотехнологии БФУ имени И. Канта и университет Сабаха (Малайзия)
10.	Магнитоактивные композиционные проводники	МГУ, Томский политехнический университет
БИОТЕХНОЛОГИИ В ПИЩЕВОЙ ИНДУСТРИИ		
1.	Лечебное питание	ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
2.	Кисломолочные микробные сообщества	ТГУ, МГУ, ФИЦ «Биотехнологии» РАН
3.	БАВ и микрокапсулирование молочно-кислых микроорганизмов	СКФУ
4.	Провитамин А из микроводорослей	СПбПУ
5.	Безопасное вино	ФИЦ «Биотехнологии» РАН
6.	БАД для аллергиков	ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
БИОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ		
1.	Молочная кислота высокой оптической чистоты	РХТУ им. Д.И. Менделеева
2.	Антимикробные покрытия	Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, РТУ МИРЭА, Институт по изысканию новых антибиотиков имени Г. Ф. Гаузе
3.	Защита стройматериалов от микробов	ПНИПУ, МГУ имени Н. П. Огарева, ННГУ имени Лобачевского
4.	Переработка глицерина	Томский ГУ
5.	Нефтедобывающие технологии	ФИЦ «Биотехнологии» РАН
6.	Химический катализатор на основе бактерий	ТулГУ, Институт органической химии имени Н. Д. Зелинского РАН
БИОТЕХНОЛОГИИ В ЭКОЛОГИИ		
1.	Ферменты для переработки отходов	НИЦ «Курчатовский институт»
2.	Бактериальная деполяризация ксантана	Курчатовский геномный центр, НИЦ «Курчатовский институт»
3.	Очистка почвы от гербицидов	ПНИПУ
4.	Биоразлагаемые полимеры из рыбьего жира	СФУ Красноярский научный центр СО РАН
5.	Биосенсор для анализа воды на основе дрожжей	ТулГУ
6.	Переработка многослойной упаковки	Университет РОСБИОТЕХ
БИОТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ		
1.	Препараты для ремедиации почвы	НИУ БелГУ
2.	Биопрепараты для защиты растений	ТГУ
3.	Защита продукции от фузариотоксинов	ФГБУН ВНИИФ

²Источник: <https://mendeleev.vc/>

Полагаем, что такие стратегические альянсы позволяют компаниям сократить до 15 % текущих расходов, затраты на разработку пересекающихся продуктов, исключить дублирование, расширить доступ к кредитным линиям, повысить доверие инвесторов, снизить затраты на маркетинг. Отметим, что, с одной стороны, основная экономическая причина альянсов – в недостаточности инновационной базы для поддержания промышленного освоения в отраслевом сегменте. С другой стороны, консолидация усилий альянсов также определяет тренд на снижение уверенности разработчиков биотехнологий в прибыльности традиционной модели фармпроизводства [5]. Также компании боятся не успеть окупить затраты до момента утраты патентной защиты и замещения их инноваций биоаналогами. Отметим, что многие правовые и этические вопросы (добавление муки из насекомых в пищу) находятся еще в стадии разработки, включая права на созданные инновации. Также остро стоит вопрос опережающей подготовки кадров.

ПРАВОВЫЕ И КАДРОВЫЕ ОСНОВЫ В ОБЛАСТИ БИОЭКОНОМИКИ

В структуре национального проекта «Биоэкономика» предусмотрено формирование трех федеральных проектов: «Организация производства и стимулирование сбыта продукции биоэкономики», «Научно-технологическая поддержка развития биоэкономики» и «Аналитическое методическое и кадровое обеспечение биоэкономики».

Для реализации этих проектов требуются пересмотр и разработка правовых механизмов, включая льготы и экспериментальные правовые режимы. Проведенный анализ показал, что законы в области биотехнологий в РФ представляют собой систему правовых норм, регулирующих использование живых клеток и организмов для производства ценных продуктов. Ключевые нормы включают ФЗ №180-ФЗ «О биомедицинских клеточных продуктах», нормативные акты по ГМО, патентное право (пурпурная биотехнология) и международные конвенции по биологической безопасности. В РФ принят Национальный стандарт «биотехнологии» (Классификация биотехнологической продукции) – ГОСТ-Р 57079-2016 (действует с 05.01.2016 г.).

Основными правовыми документами в области биоэкономики в РФ являются:

1. Стратегия социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р).
2. Указ Президента РФ № 145 «О стратегии научно-технологического развития РФ» от 28.02.2024 г.
3. ФЗ от 30.12.2023 г. № 492-ФЗ «О биологической безопасности в Российской Федерации».
4. Указ Президента РФ от 08.02.2021 г. № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития РФ и климатических изменений».
5. Распоряжение Правительства РФ от 31.12.2020 № 3684-р (ред. От 21.04.2022) «Об утверждении Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021–2030 гг.).»
6. Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 г. №1587 (ред. От 11.03.2023 г.) «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в РФ и требований к системе верификации инструментов финансирования устойчивого развития в РФ».
7. Указ Президента РФ № 818 «О развитии природоподобных технологий в РФ» от 02.11.2023 г. и др.

Отметим, что в РФ создается эффективная система предоставления льгот и субсидий за счет средств бюджета на проведение НИОКР по современным технологиям в рамках проектов технологического суверенитета. С 1 июля 2026 года в РФ вступает в силу новый межгосударственный стандарт для «зеленых» многоквартирных домов, содержащий

58 критериев, 35 из которых являются обязательными. Таким образом, законодательство РФ активно учитывает потребности общества и направлено на достижение баланса между развитием биотехнологий и защитой здоровья населения и окружающей среды.

Для реализации таких комплексных задач требуются система опережающей подготовки и переподготовки кадров, высокая концентрация кадровых компетенций в области междисциплинарной подготовки специалистов для разных отраслей промышленности. Прогнозируется, что дефицит биоинженеров к 2035 году в РФ может достичь 300 тыс. специалистов.

Подготовка кадров в области биоэкономики и природоохранных технологий осуществляется в РФ на базе МГУ, РЭУ им. Г.В. Плеханова, РОСБИОТЕХ, РУДН, СПбГЭУ и других вузов. Так, приоритетом станет формирование комплекса междисциплинарных компетенций на стыке инженерного и экономического образования. Положительным примером стала реализация с 2025 года в РЭУ им. Г.В. Плеханова в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» стратегического проекта «Новые материалы и технологии для устойчивого развития»³. Цель проекта – развитие науки и образования в коллаборации с индустриальными и академическими партнерами по таким направлениям, как технологии новых материалов, рециклинг, экологически чистая и ресурсосберегающая энергетика, пищевые биотехнологии, агробиотехнологии.

Выводы

1. В РФ сложились необходимые условия, позволяющие перейти на новую модель устойчивого развития экономики на основе достижений биотехнологий, что позволит усилить импортозамещение и повысить экспортную выручку.

2. Научные коллаборации НИИ, вузов и бизнеса становятся эффективными и надежными участниками национальных проектов, включая НП «Биоэкономика».

3. Национальные цели устойчивого ресурсосберегающего развития, рыночный спрос и научный потенциал определяют выбор секторов, в которых ожидаемо создание прорывных технологий и переход к новому технологическому укладу.

4. Опережающая система подготовки кадров ведущими вузами РФ призвана закрыть потребности в многопрофильных специалистах.

5. Выявлена необходимость в разработке стимулирующего законодательства и государственных мер поддержки новаторов в области биоэкономики.

Подводя итоги, отметим, что проведенное исследование показало, что успешная реализация национальных проектов и федеральных программ позволит ускорить становление национальной биоэкономики [6]. Следует отметить, что в РФ активно развивается биотехнологический рынок, который, несмотря на санкции, интегрирован в сегменты мирового рынка, включая потенциал стран – партнеров по БРИКС, ЕАЭС, СНГ, ШОС. Мировой рынок биотехнологий четко структурирован, имеет растущие риски на каждом этапе полного жизненного цикла создания инновации, ее коммерциализации и промышленного освоения [7]. Маркетинг биотехнологий имеет свою специфику, направлен на сохранение здоровья населения, повышение качества жизни и требует подготовки новых кадров. Российские биотехнологические компании и научные альянсы показали приверженность национальным целям обеспечения технологического суверенитета на основе государственной поддержки. Авторы исследования уверены в том, что сложившийся научно-технологический потенциал обеспечит поэтапный структурный переход РФ на экономику замкнутого цикла на основе ресурсосбережения [8] и вхождение РФ в число мировых биотехнологических лидеров.

³Источник: <https://www.rea.ru>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титова Е. С. Развитие биоэкономики и подготовка квалифицированных трудовых ресурсов в российских регионах // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2024. Т. 21. № 3. С. 105–117. DOI: 10.21686/2413-2829-2024-3-105-117
2. Wade N., Georgescu-Roegen N. Entropy, the measure of economic man, science, 31 October 1975, in *New Horizons in Economic Thought*, edited by W.J. Samuels (Edward Elgar, 1992).
3. Aguilar A., Bocheureau L., Matthiessen L. Biotechnology as the engine for the knowledge-based bio-economy // *Biotechnology & Genetic Engineering Reviews*. 2010. Vol. 26. Pp. 371–388.
4. Aguilar A., Twardowski T., Wohlgemuth R. Bioeconomy for sustainable development // *Biotechnology Journal*. 2019. Vol. 14(8). DOI: 10.1002/biot.201800638
5. Герцик Ю. Г. Основные тенденции развития биомедицинских и биофармацевтических технологий в биоэкономике // Ремедиум. 2022. № 1. С. 50–57. DOI: 10.32687/1561-5936-2022-26-1-50-57
6. Лантер Н. Н. Проблемы и перспективы реализации национальных проектов в РФ в 2025–2030 гг.: в сб. материалов XV Международной научно-практической конференции «Россия и мир: развитие цивилизаций», 2–3 апреля 2025 г.
7. Кирюшин П. А., Яковлева Е. Ю., Астапкович М., Солодова М. А. Биоэкономика: опыт Евросоюза и возможности для России // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2019. № 4. С. 60–77. EDN: TJLRMN
8. Формирование потенциала и управление процессами развития активных социально-экономических систем: коллективная монография / под ред. Комкова Н. И. М.: Научный консультант, 2023. 454 с.

REFERENCES

1. Titova E.S. The development of bio-economy and training highly-qualified HR in Russian regions. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2024. No. 3. Pp. 105–117. DOI: 10.21686/2413-2829-2024-3-105-117. (In Russian)
2. Wade N., Georgescu-Roegen N. Entropy, the measure of economic man. *Science*, October 31, 1975, in: *New Horizons in Economic Thought*, edited by Warren Samuels (Edward Elgar Publishing, 1992)
3. Aguilar A., Bocheureau L., Matthiessen L. Biotechnology as the engine for the knowledge-based bio-economy. *Biotechnology & Genetic Engineering Reviews*. 2009. Vol. 26. Pp. 371–388.
4. Aguilar A., Twardowski T., Wohlgemuth R. Bioeconomy for sustainable development. *Biotechnology Journal*. 2019. Vol. 14(8). DOI: 10.1002/biot.201800638
5. Gertsik Yu.G. Main trends in the development of biomedical and biopharmaceutical technologies in the bioeconomy. *Remedium*. 2022. Vol.26, No. 1 1. Pp. 50–57. DOI: 10.32687/1561-5936-2022-26-1-50-57. (In Russian)
6. Lanter N.N. Problems and prospects for the implementation of national projects in the Russian Federation in 2025–2030. *Collection of works of young scientists and students. XV International Scientific and Practical Conference "Russia and the World: Development of Civilizations," April 2–3, 2025*. (In Russian)
7. Kiryushin P.A., Yakovleva E.Yu., Astapovich M., Solodova M.A. Bioeconomics: the EU experience and opportunities for Russia. *Moscow University Bulletin. Series 6. Economics*. 2019. No. 4. Pp. 60–77. EDN: TJLRMN. (In Russian)
8. *Formirovaniye potentsiala i upravleniye protsessami razvitiya aktivnykh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem* [Formation of potential and management of development processes of active socioeconomic systems]. Collective monograph. Komkov N.I. (Ed.) Moscow: Nauchnyy konsul'tant, 2023. 454 p. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Комков Н. И. – научное руководство исследованием, проведение критического анализа материалов, формулирование ключевых выводов и научной новизны работы, редактирование текста статьи;

Лантер Н. Н. – разработка концептуальной структуры исследования, подготовка обзора научной литературы, статистический анализ и интерпретация полученных данных.

Contribution of the authors:

Komkov N.I. – Conceptualization, scientific supervision, formal analysis, writing – review and editing;

Lanter N.N. – Conceptualization, writing – original draft, formal analysis.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Комков Николай Иванович, д-р экон. наук, профессор, зав. лабораторией организационно-экономических проблем управления научно-техническим развитием, Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук;

117418, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 47;

komkov_ni@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4109-9433>, SPIN-код: 9905-8839

Лантер Наталья Николаевна, науч. сотр., Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук;

117418, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 47;

bonna2005@mail.ru, SPIN-код: 5798-2118

Information about the authors

Nikolay I. Komkov, Doctor of Economic Sciences, Head of Laboratory, Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences;

47, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117418, Russia;

komkov_ni@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4109-9433>, SPIN-code: 9905-8839

Natalia N. Lanter, Scientific Researcher, Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences;

47, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117418, Russia;

bonna2005@mail.ru, SPIN-code: 5798-2118

УДК 339.13

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-217-238>

 JGFQOY

Анализ потребительского поведения в Санкт-Петербурге на рынке услуг частных байеров: выгоды, доверие и риски

Г. Ю. Митяшин[✉], К. П. Корнилова, А. В. Филатова

Высшая школа сервиса и торговли
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена трансформацией глобальных цепочек поставок и ограничением доступа российских потребителей к ряду зарубежных брендов, что привело к стихийному росту рынка услуг частных посредников (байеров). Несмотря на широкое распространение подобных неформальных практик, механизмы формирования доверия и принятия потребителями повышенных транзакционных рисков в цифровой среде остаются недостаточно изученными. Выявление этих факторов необходимо для понимания адаптационных стратегий населения и определения вектора институционализации данного сегмента экономики.

Цель исследования – анализ причин, по которым потребители обращаются к услугам байеров, а также выявление факторов, определяющих их готовность принимать дополнительные риски ради получения экономической выгоды или доступа к редким товарам.

Материалы и методы исследования. Эмпирическую базу исследования составили данные количественного опроса 127 респондентов, разделенных на группы с опытом и без опыта взаимодействия с байерами.

Результаты. В статье представлены результаты эмпирического исследования потребительского поведения на рынке услуг частных байеров в условиях трансформации цепей поставок и ограниченной доступности отдельных товарных категорий на российском рынке. В работе проанализированы ключевые мотивы обращения к неформальным посредникам, факторы формирования доверия, воспринимаемые транзакционные риски и поведенческие стратегии потребителей. Установлено, что основным драйвером спроса выступает доступ к уникальным и официально недоступным товарам, тогда как экономическая выгода играет вспомогательную роль. Выявлен феномен «рискованного доверия», при котором потребители, осознавая высокий уровень финансовых и правовых рисков, принимают решение о покупке, опираясь на репутационные механизмы, личные рекомендации и социальные связи. Показано, что главным барьером для вовлечения потенциальных покупателей является отсутствие формализованных гарантий и инструментов защиты.

Выводы. Сделан вывод о формировании запроса на гибридизацию неформальных практик с технологическими механизмами безопасности, включая сервисы «безопасной сделки» и верификацию продавцов, как условие устойчивого развития данного рынка.

Ключевые слова: поведение потребителей, байеры, частные посредники, доверие, риски, неформальная экономика, цифровые платформы

Поступила 19.01.2026, одобрена после рецензирования 17.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Митяшин Г. Ю., Корнилова К. П., Филатова А. В. Анализ потребительского поведения в Санкт-Петербурге на рынке услуг частных байеров: выгоды, доверие и риски // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 217–238. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-217-238

© Митяшин Г. Ю., Корнилова К. П., Филатова А. В., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Consumer behavior analysis in the market of private buying agents' services in Saint Petersburg: benefits, trust, and risks

G.Yu. Mityashin[✉], K.P. Kornilova, A.V. Filatova

Graduate School of Service and Trade
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
50, Novorossiyskaya street, Saint Petersburg, 195251, Russia

Abstract. The relevance of this study stems from the transformation of global supply chains and the restricted access of Russian consumers to foreign brands, which has driven the rapid growth of the private intermediary market (buying agents). Despite the widespread popularity of these informal practices, the mechanisms by which consumers build trust and accept heightened transaction risks in the digital environment remain under-researched. Identifying these factors is essential for understanding consumer adaptation strategies and determining the vector for institutionalization within this economic segment.

Aim. The study aims to analyze the reasons why consumers turn to buying agents, as well as to identify the factors determining their willingness to accept additional risks in exchange for economic benefits or access to scarce goods.

Materials and methods. The empirical basis of the study comprises data from a quantitative survey of 127 respondents, which were divided into two groups based on whether they had experience interacting with customers.

Results. This article presents an empirical study of consumer behavior in the retail market amid supply chain transformation and limited product availability in Russia. We analyze key motivations for using informal intermediaries, trust-building factors, perceived transaction risks, and consumer behavioral strategies. In particular, our findings indicate that access to unique and officially unavailable products is the primary driver of demand, whereas economic benefits play a supporting role. The study identifies a "risky trust" phenomenon, where consumers accept high financial and legal risks to make purchase decisions based on reputation, personal recommendations, and social ties. At the same time, the lack of formal guarantees and consumer protection tools is revealed as the main barrier to attracting potential customers.

Conclusions. A demand is emerging to hybridize informal practices with technological security tools, such as "secure transaction" services and seller verification, as a prerequisite for sustainable market development.

Keywords: consumer behavior, buyers, private intermediaries, trust, risks, informal economy, digital platforms

Submitted 19.01.2026,

approved after reviewing 17.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Mityashin G.Yu., Kornilova K.P., Filatova A.V. Consumer behavior analysis in the market of private buying agents' services in Saint Petersburg: benefits, trust, and risks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 217–238. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-217-238

ВВЕДЕНИЕ

В условиях трансформации глобального ритейла и изменения глобальных цепей поставок российский потребительский рынок столкнулся с новыми вызовами и одновременно с появлением альтернативных форм удовлетворения спроса. В результате сокращения или прекращения деятельности официальных каналов поставок ряда международных брендов получили распространение альтернативные модели приобретения товаров [3, 5], среди которых заметное место заняли услуги частных продавцов или байеров.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

В рамках настоящего исследования под байером понимается частный посредник, осуществляющий на профессиональной или полупрофессиональной основе поиск, закупку и доставку товаров из-за рубежа по индивидуальному запросу клиента. Возникновение данного феномена связано с эволюцией неформальных практик, при которых физические лица оказывали содействие знакомым в приобретении дефицитных товаров во время зарубежных поездок. Впоследствии указанные практики приобрели более массовый характер, а круг социальных связей расширился за пределы семейного и дружеского окружения, что стало возможным благодаря развитию социальных сетей и некоммерческих цифровых платформ, обеспечивающих инфраструктуру для самоорганизации потребителей. Данные процессы рассматриваются в научной литературе как одно из направлений трансформации потребительской активности [1–3].

В настоящее время деятельность байеров преимущественно сосредоточена в товарных сегментах, ограниченно представленных или недоступных на внутреннем рынке. К ним относятся одежда и обувь лимитированных серий, продукция брендов, временно отсутствующих в официальной рознице, косметические средства, аксессуары, электроника и коллекционные товары.

Типовая модель взаимодействия между потребителем и байером включает несколько последовательных этапов: формирование потребности в конкретном товаре; поиск посредника через цифровые платформы, включая социальные сети, мессенджеры и тематические сообщества [4], либо по личным рекомендациям; оценка надежности байера на основе публичной репутации и отзывов предыдущих клиентов; согласование условий сделки в формате персонализированной коммуникации; осуществление оплаты и получение товара. Данная модель характеризуется высокой степенью персонификации отношений и опорой на репутационные механизмы, функционирующие внутри цифровых сообществ.

Следует отметить, что частное посредничество в сфере покупок не является принципиально новым явлением. Исторически подобные практики существовали в форме неформальных услуг «попутчиков» или знакомых, осуществлявших приобретение товаров за рубежом. Однако в течение последнего десятилетия данный институт претерпел качественную трансформацию, превратившись в цифровой, массовый и относительно структурированный феномен. Этому способствовал ряд факторов.

Во-первых, развитие глобальной электронной коммерции и цифровых платформ привело к расширению доступности информации о зарубежном ассортименте при сохранении географических и институциональных барьеров для российских потребителей. Во-вторых, в социальных сетях и мессенджерах (Instagram* (**принадлежит организации Meta, деятельность которой запрещена в Российской Федерации*), Telegram, «ВКонтакте» и др.) сформировались нишевые потребительские сообщества, ориентированные на конкретные товарные категории, внутри которых возник устойчивый спрос на специализированных посредников, обладающих экспертными знаниями и доступом к зарубежным рынкам [6, 7]. В-третьих, экономические и логистические изменения, произошедшие в России после 2022 г., включая уход ряда международных брендов, ограничения в сфере трансграничных платежей и официальных поставок, существенно усилили спрос на альтернативные каналы приобретения товаров [3, 5].

В результате современный байер выступает не просто частным лицом, а микропредпринимателем, совмещающим функции поискового агента, логиста, посредника при таможенном оформлении и сервиса клиентской поддержки, обеспечивая доступ к товарам, физически отсутствующим на внутреннем рынке.

Процесс приобретения товаров через байеров представляет ценность для различных групп потребителей, однако мотивация клиентов неоднородна и сопряжена с повышенным уровнем неопределенности по сравнению с покупками в официальных торговых каналах. Несмотря на более высокий уровень рисков и ограниченную прозрачность подобных сделок, устойчивый рост предложения и масштаб распространения услуг частных посредников свидетельствуют о сохранении значительного спроса на неформальные каналы потребления.

Целью настоящего исследования является анализ причин, по которым потребители обращаются к услугам байеров, а также выявление факторов, определяющих их готовность принимать дополнительные риски ради получения экономической выгоды или доступа к редким товарам. В статье исследуется отношение различных групп потребителей к покупкам через частных посредников, анализируются мотивационные установки, структура взаимоотношений «покупатель – байер», а также психологические и экономические аспекты данного феномена, отражающего адаптацию потребительского поведения к изменяющимся рыночным условиям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эмпирическую базу настоящего исследования составляют данные, полученные в ходе количественного социологического опроса. В качестве инструмента сбора информации использовалась структурированная анкета, включающая 15 вопросов, сгруппированных в тематические блоки: социально-демографические характеристики респондентов; опыт взаимодействия с байерами; мотивы обращения к услугам частных посредников и каналы их поиска; критерии выбора байера; оценка рисков и факторов доверия; поведенческие стратегии в случае успешного или неудачного опыта взаимодействия; общее отношение к практике покупок через байеров.

В анкете преимущественно применялись закрытые вопросы с фиксированными вариантами ответов, что обеспечило возможность количественной обработки и сопоставительного анализа полученных данных. Целью опроса являлось определение распространенности практики покупок через байеров, а также выявление ключевых мотивов потребителей, используемых каналов поиска, критериев выбора посредника, уровня воспринимаемых рисков и факторов формирования доверия среди широкой аудитории.

Сбор данных осуществлялся с использованием электронной анкеты, размещенной в открытом доступе в социальных сетях и на специализированных цифровых платформах. В исследовании применялась неслучайная целевая выборка, при которой привлечение респондентов осуществлялось преимущественно через личные контакты. В опросе приняли участие 127 респондентов.

Введение вопроса-фильтра («Совершали ли вы когда-либо покупки через байеров?») позволило разделить совокупность респондентов на две аналитические группы для проведения сравнительного анализа:

- группа 1 (опытные потребители) – 40 респондентов, имеющих практический опыт покупок через байеров;
- группа 2 (потенциальные потребители) – 87 респондентов, не имеющих такого опыта.

Социально-демографическая структура выборки характеризуется преобладанием молодых респондентов: около 80 % участников в обеих группах относятся к возрастной категории от 18 до 25 лет. Гендерный состав выборки смещен в сторону женщин, доля которых составила 57,5 % в группе опытных потребителей и 65,5 % в группе потенциальных потребителей.

Первичная обработка данных количественного опроса осуществлялась с использованием сервиса Google Forms, что позволило сформировать сводные таблицы и провести начальный анализ распределений ответов

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ поведения потребителей, имеющих опыт покупки у байеров

В первой части исследования анализируется отношение потребителей, имеющих практический опыт взаимодействия с байерами. Полученные результаты показывают, что ключевыми причинами обращения к услугам частных посредников являются более низкая цена по сравнению с официальными каналами продаж (65 %, 26 человек) и невозможность приобретения интересующего товара в официальных магазинах Российской Федерации (55 %, 22 человека). Указанные факторы свидетельствуют о том, что байеры выполняют функцию механизма адаптации потребительского спроса к действующим экономическим и логистическим ограничениям, обеспечивая доступ к ассортименту, недоступному либо экономически нецелесообразному для приобретения через формальные торговые каналы. Кроме того, значимая доля респондентов (52,5 %, 21 человек) отмечает ценность уникальности и редкости приобретаемых товаров, что позволяет рассматривать байера как посредника, обеспечивающего доступ к эксклюзивным и винтажным товарным категориям. Более детальная информация о факторах, формирующих мотивацию потребителей к покупкам через байеров, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Факторы мотивации к совершению покупки у байера (кол-во человек)

Fig. 1. Factors motivating customers to make a purchase (number of respondents)

Результаты опроса показывают, что основным каналом поиска байеров выступает платформа «Авито»: 72,5 % респондентов (29 человек) использовали ее при поиске частного посредника. Полученные данные позволяют предположить, что предпочтение данной

платформе обусловлено ее восприятием потребителями как универсального пространства для совершения подобных транзакций, характеризующегося широким охватом аудитории и сформированным уровнем доверия к бренду.

Второе место по распространенности занимают социальные сети и мессенджеры. Так, Telegram и Instagram (**принадлежит организации Meta, деятельность которой признана экстремистской и запрещена в Российской Федерации*) суммарно получили 70 % упоминаний, при этом доля Telegram составила 50 % (20 человек), а Instagram – 20 % (8 человек). Структура используемых каналов поиска байеров в разрезе цифровых платформ представлена на рис. 2.



Рис. 2. Каналы поиска байера (кол-во человек)

Fig. 2. Customer search channels (number of respondents)

При оценке конкретного объявления или продавца респонденты в наибольшей степени ориентируются на визуальный контент и цену, которые были отмечены как значимые факторы 85 % опрошенных. Существенным элементом формирования доверия также выступает наличие отзывов от других покупателей, на что указали 65 % респондентов. При этом значимость отзывов заметно превышает роль формального рейтинга товара, который был отмечен лишь 5 % участников опроса.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на рынке услуг байеров приоритетное значение для потребителей имеет надежность самого посредника, а не характеристики приобретаемого товара. Это связано с тем, что редкая или брендовая продукция, как правило, заранее воспринимается как обладающая приемлемым уровнем качества, тогда как процесс покупки через байера сопряжен с дополнительными неопределенностями, включая риски, связанные с добросовестностью посредника, сроками доставки и используемыми способами оплаты. В связи с этим потребители уделяют повышенное внимание проверке репутации байера, а не оценке потребительских свойств товара.

Следует отметить, что, несмотря на высокий уровень осознания рисков, возможность личного осмотра товара до покупки оказалась значимой лишь для 32,5 % респондентов. Данный факт свидетельствует о формировании у потребителей устойчивой практики дистанционных сделок и адаптации к онлайн-форматам взаимодействия. Результаты анализа значимости отдельных факторов выбора представлены на рис. 3.

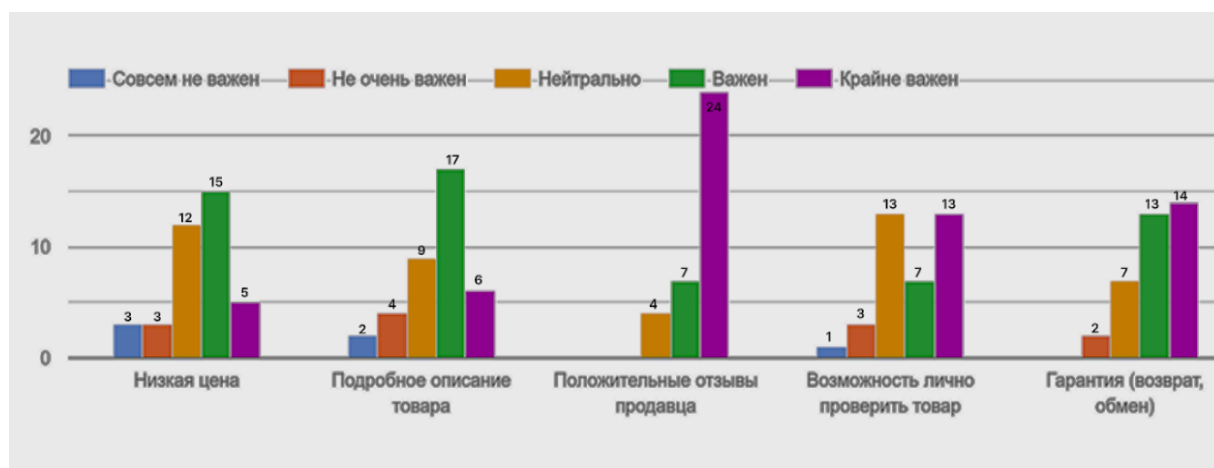


Рис. 3. Восприятие значимости отдельных условий сделки по приобретению товаров у байера (кол-во человек)

Fig. 3. Perceived importance of specific transaction terms for customers (number of respondents)

Результаты исследования выявляют выраженный парадокс в потребительском поведении при взаимодействии с байерами. С одной стороны, для респондентов характерен высокий уровень воспринимаемых рисков. Наиболее значимыми источниками опасений являются отсутствие гарантий исполнения сделки и риск мошенничества, связанный с возможностью перечисления денежных средств без последующего получения товара, на что указали 80 % опрошенных (32 человека). Существенное место также занимают опасения получения бракованного товара (72,5 %, 29 человек), товара, не соответствующего заявленному описанию, а также продукции без гарантийных обязательств (45 %, 18 человек).

Для части респондентов, ориентированных прежде всего на приобретение брендовой продукции, значимыми являются риски, связанные с возможностью получения поддельного товара, что отметили 42,5 % участников опроса (17 человек). Указанные результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на осознание высокого уровня неопределенности и потенциальных потерь, потребители продолжают обращаться к неформальным каналам приобретения товаров, что подчеркивает противоречивость мотивационной структуры данного типа потребительского поведения. Структура основных опасений респондентов представлена на рис. 4.

Вознаграждение байера за оказанные посреднические услуги может осуществляться несколькими способами. На практике используются следующие модели расчетов: предоплата со стороны клиента, которая может носить как полный, так и частичный характер; оплата после получения товара покупателем, осуществляемая наличными средствами либо путем безналичного перевода; а также использование механизма «безопасной сделки», доступного на отдельных цифровых платформах. Под «безопасной сделкой» по-

нимается форма институционально поддерживаемого взаимодействия, при которой платформа временно аккумулирует денежные средства покупателя до момента получения и подтверждения соответствия товара заявленным условиям, выступая, по сути, в роли гаранта исполнения обязательств сторон.



Рис. 4. Восприятие факторов риска совершения сделки по покупке товара у байера (кол-во человек)

Fig. 4. Perceived transaction risk factors for customers (number of respondents)

Результаты опроса свидетельствуют о том, что для клиентов наиболее предпочтительным способом расчетов является использование механизма «безопасной сделки», поскольку он позволяет снизить уровень воспринимаемых рисков. Вместе с тем данный формат взаимодействия применяется далеко не всеми байерами, что подтверждается анализом профилей посредников, осуществляющих деятельность на платформе «Авито». Для самих байеров, напротив, наиболее удобной формой расчетов является работа по предоплате. Это обусловлено рядом факторов, включая стремление оперативно получить денежные средства, избегание комиссионных издержек платформ при использовании «безопасных сделок», а также необходимость предварительного финансирования расходов, связанных с доставкой и уплатой таможенных пошлин.

Выявленное расхождение в приоритетах сторон отражает противоположные стратегии управления рисками: покупатели ориентированы на минимизацию вероятности мошенничества, тогда как байеры стремятся сократить финансовые и операционные издержки. При этом по мере расширения рынка услуг частных посредников и повышения доступности информации о конкретных байерах потребители вынуждены адаптироваться к тем финансовым моделям взаимодействия, которые предлагает посредник, даже в случае их частичного несоответствия собственным предпочтениям. Более подробные данные о предпочтительных для клиентов способах оплаты представлены на рис. 5.



Рис. 5. Приоритетные для клиентов способы оплаты (кол-во человек)

Fig. 5. Priority payment methods for customers (number of respondents)

Результаты опроса показывают, что после успешного завершения сделки 67,5 % респондентов сохраняют контакты байера, формируя устойчивые клиентские связи. Данный факт указывает на важную роль повторных взаимодействий в механизмах репутационного накопления и долгосрочного функционирования рынка услуг частных посредников.

Несмотря на высокий уровень воспринимаемых рисков, общий уровень удовлетворенности покупками через байеров остается сравнительно высоким. Так, 62,5 % респондентов (25 человек) положительно оценили последнюю совершенную сделку, а 47,5 % участников опроса (14 человек) охарактеризовали соотношение риска и получаемой выгоды как сбалансированное либо смещенное в пользу выгоды. Указанные результаты свидетельствуют о том, что для значительной части потребителей потенциальные выгоды от взаимодействия с байерами компенсируют сопутствующие риски. Оценка общей удовлетворенности покупками через байеров представлена на рис. 6.



Рис. 6. Общие впечатления от покупки у байеров (кол-во человек)

Fig. 6. Overall impressions of purchasing from informal sellers (number of respondents)

Положительные эмоции после покупки (радость от выгоды и уникальности) преобладают над отрицательными (45%, 18 чел. против 32,5%, 13 чел.) (рис. 7).



Рис. 7. Эмоции после покупки товаров у байеров (кол-во человек)

Fig. 7. Post-purchase emotions regarding goods from informal sellers (number of respondents)

Полученные данные свидетельствуют о том, что для повышения уровня доверия потребителей к покупкам через байеров одних лишь репутационных механизмов, включая отзывы и публичную историю продавца, оказывается недостаточно (рис. 8). Респонденты ожидают внедрения более надежных и прозрачных правил взаимодействия, предполагающих наличие формализованных инструментов защиты интересов сторон, таких как встроенные сервисы «безопасной сделки» или обязательные процедуры проверки продавцов на цифровых платформах.



Рис. 8. Факторы повышения доверия к частным продавцам (кол-во человек)

Fig. 8. Factors increasing trust in private sellers (number of respondents)

Наиболее значимым фактором, способствующим росту доверия, была названа возможность использования механизма «безопасной сделки» через проверенные сервисы, что отметили 77,5 % респондентов (31 человек). Существенное значение также придается наличию системы верификации продавцов на платформе, на что указали 62,5 % участников

опроса (25 человек). Полученные результаты указывают на стремление потребителей к институционализации данного сегмента рынка и формированию гибридной модели доверия, в рамках которой неформальные репутационные связи дополняются формальными механизмами защиты и контроля.

Результаты исследования показывают, что основными пользователями услуг частных байеров являются преимущественно молодые потребители, активно интегрированные в цифровую среду. Их поведение характеризуется ориентацией на экономию финансовых ресурсов и стремлением получить доступ к товарам, отсутствующим в официальных каналах розничной торговли на внутреннем рынке. В данном контексте обращение к услугам байеров может рассматриваться как адаптивная стратегия потребления, сформировавшаяся в ответ на трансформацию рыночной и логистической среды.

Сформировавшийся рынок услуг частных посредников базируется на специфическом механизме доверия, который в рамках настоящего исследования целесообразно охарактеризовать как феномен «рискованного доверия». Потребители осознают наличие значительных рисков, связанных с приобретением товаров через байеров, включая неопределенность в отношении оригинальности продукции, надежности платежей, возможности мошенничества и соблюдения сроков поставки. Вместе с тем выявленные мотивационные факторы, прежде всего стремление к получению финансовой выгоды при покупке брендовой продукции и доступу к уникальным товарам, недоступным на российском рынке, оказываются для значительной части потребителей более значимыми, чем потенциальные издержки.

В этих условиях рынок байеров функционирует как самоорганизующаяся система, устойчивость которой обеспечивается преимущественно за счет доверительных отношений между участниками. Репутация байера выступает ключевым нематериальным активом, формируемым на основе повторных сделок, отзывов и личных рекомендаций внутри цифровых сообществ. Особую роль в данном механизме играют неформальные каналы передачи информации, включая мессенджеры и социальные сети, в которых реализуется эффект «сарафанного радио».

Одновременно результаты исследования указывают на наличие запроса со стороны потребителей на институциональное усиление механизмов доверия. Покупатели выражают стремление дополнить персонализированное и репутационное доверие формальными и технологически обеспеченными инструментами защиты, такими как сервисы «безопасной сделки», верификация продавцов и стандартизация правил взаимодействия на цифровых платформах.

Таким образом, отношение потребителей к покупкам через байеров носит двойственный характер. С одной стороны, сохраняется готовность принимать повышенные риски ради получения экономической выгоды и доступа к дефицитному ассортименту. С другой стороны, усиливается ожидание трансформации данного сегмента из преимущественно неформального и риск-ориентированного рынка в более упорядоченную и прозрачную систему, сочетающую элементы неформального доверия с институциональными механизмами защиты интересов участников.

Анализ восприятия услуг частных байеров аудиторией без опыта покупок

Вторая часть исследования была посвящена анализу установок аудитории, не имеющей практического опыта покупок через частных байеров ($n = 87$). Данная группа представляет особый исследовательский интерес, поскольку отражает потенциальный спрос на услуги

частных посредников, а также барьеры, сдерживающие вовлечение потребителей в данный сегмент рынка. Социально-демографическая структура выборки характеризуется преобладанием молодежи: 64,4 % респондентов относятся к возрастной группе 18–25 лет, еще 27,6 % – к категории до 17 лет. Гендерный состав выборки смещен в сторону женщин, доля которых составила 65,5 %.

Результаты опроса выявили неоднозначность отношения данной аудитории к практике покупок через байеров. С одной стороны, у респондентов зафиксирован выраженный мотивационный потенциал обращения к услугам частных посредников. В качестве ключевых факторов, которые могли бы побудить их к такому взаимодействию, были названы поиск редких, винтажных или эксклюзивных товаров (66,7 %, 58 человек), приобретение конкретной модели или бренда, отсутствующих на российском рынке (60,9 %, 53 человека), а также возможность экономии при ограниченном бюджете (47,1 %, 41 человек). Структура мотивационных факторов потенциального спроса представлена на рис. 9.



Рис. 9. Причины покупки товаров у байеров (кол-во человек)

Fig. 9. Reasons for purchasing goods from private sellers (number of respondents)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ценностное предложение байеров, связанное с доступом к уникальному и дефицитному ассортименту, для данной группы потенциальных потребителей оказывается более значимым фактором, чем возможность прямой экономии. Это позволяет рассматривать редкость и эксклюзивность товаров как ключевой элемент привлекательности услуг частных посредников для аудитории, не имеющей практического опыта взаимодействия с ними.

Вместе с тем основным сдерживающим фактором для данной группы выступает неприемлемо высокий уровень воспринимаемых рисков. Абсолютное большинство респондентов (78,2 %, 68 человек) одновременно опасаются двух базовых угроз: полного мошенничества, при котором оплаченный товар не будет получен, и получения товара, не соответствующего заявленному описанию. Дополнительно 59,8 % опрошенных (52 человека) указывают на критически значимую проблему полного отсутствия гарантий со стороны продавца.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что для потенциальных клиентов ключевыми барьерами входа на рынок услуг байеров являются конкретные и обоснованные риски, связанные как с возможными прямыми финансовыми потерями, так и с неопределенностью качества приобретаемого товара. При этом объединяющим элементом всех выявленных опасений выступает отсутствие формализованной системы защиты интересов покупателя, что фактически означает его полную уязвимость в случае неудачного исхода сделки. Данный результат указывает на то, что для привлечения новой аудитории недостаточно предложения редкого или эксклюзивного ассортимента; необходимым условием расширения рынка является формирование понятных и надежных механизмов, способных перераспределить часть рисков и обеспечить минимальные гарантии для потребителей. Структура факторов беспокойства потенциальных покупателей представлена на рис. 10.

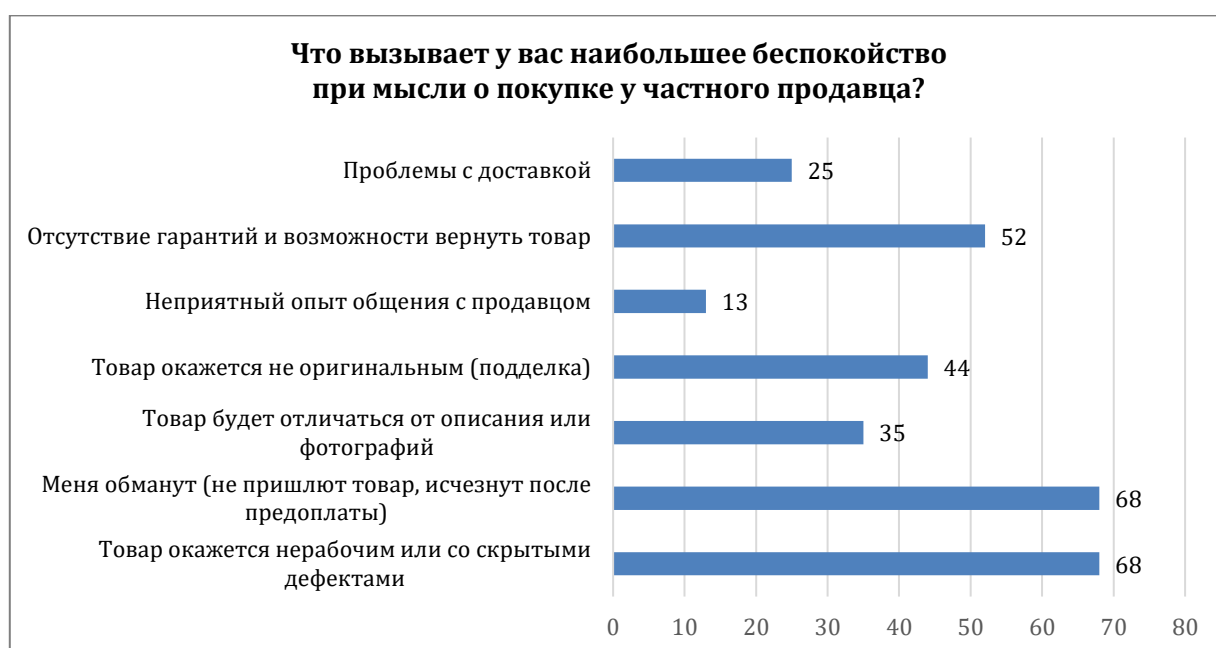


Рис. 10. Факторы беспокойства о покупке у частного продавца (кол-во человек)

Fig. 10. Customer concerns regarding purchases from private sellers (number of respondents)

В случае принятия решения о совершении покупки потенциальные потребители преимущественно ориентировались бы на поиск байеров через крупные онлайн-маркетплейсы. Наибольшую популярность среди респондентов получили платформы «Авито» (65,5 %, 57 человек), Ozon (41,4 %, 36 человек) и Wildberries (43,7 %, 38 человек), которые выступают абсолютными лидерами по частоте упоминаний. Данные результаты указывают на восприятие указанных площадок как наиболее понятных и привычных каналов для поиска посредников и совершения транзакций.

Вторым по значимости источником информации о байерах являются рекомендации друзей и знакомых, на что указали 58,6 % респондентов (51 человек). Данный результат воспроизводит модель поведения аудитории, уже имеющей опыт взаимодействия с байерами, и подтверждает ключевую роль социального капитала и межличностных рекомендаций как базового механизма формирования доверия.

Менее значимыми каналами поиска выступают социальные сети и мессенджеры, в частности Telegram (47,1 %, 41 человек) и Instagram (**принадлежит организации Meta, деятельность которой признана экстремистской и запрещена в Российской Федерации*) (25,3 %, 22 человека), что свидетельствует о сравнительно более низкой готовности потенциальных потребителей использовать данные платформы для первичного поиска байеров.

При этом полученные данные позволяют сделать вывод, что используемая цифровая платформа не является для потенциальных клиентов самоценным фактором выбора. Определяющее значение имеет наличие рекомендации и подтвержденной надежности посредника, в связи с чем респонденты выражают готовность воспользоваться практически любой платформой при условии сотрудничества с условно надежным, рекомендованным продавцом. Структура предпочтительных каналов поиска байеров представлена на рис. 11.

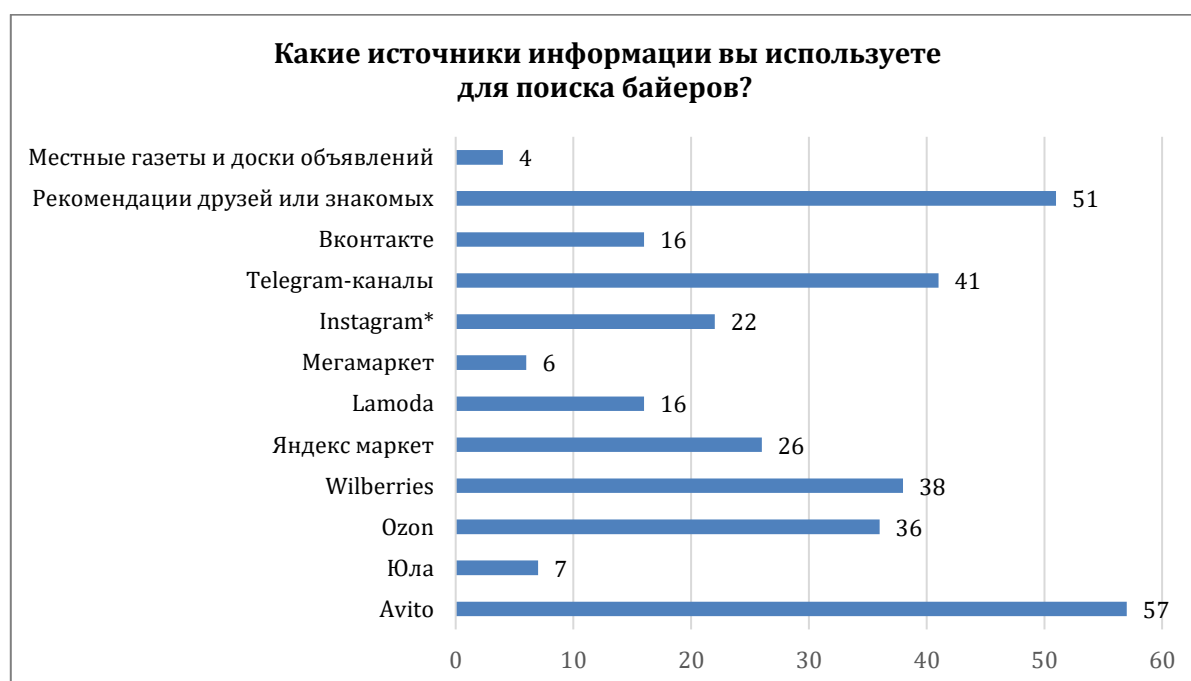


Рис. 11. Источники поиска частных продавцов (кол-во человек)

Fig. 11. Search sources for private sellers (number of respondents)

При оценке конкретного объявления ключевым фактором для подавляющего большинства потенциальных покупателей выступают отзывы о продавце, на что указали 83,9 % респондентов (73 человека). Существенное значение также придается визуальным характеристикам товара, представленным в виде фотографий (73,6 %, 64 человека), а также цене (79,3 %, 69 человек). В то же время наличие формальных гарантий было отмечено лишь одним респондентом (1,1 %), что указывает на крайне низкую значимость данного критерия для рассматриваемой аудитории.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для потенциальных покупателей услуг байеров приоритетным является не столько процесс совершения сделки, сколько характеристики самого товара и репутация посредника. Вероятно, это связано с восприятием рынка байеров как пространства, в котором наличие официальных гарантий изначально рассматривается как маловероятное либо практически недостижимое. В этих условиях по-

требители концентрируются на тех параметрах, которые могут быть оценены самостоятельно, прежде всего на репутации продавца, формируемой через отзывы [8], визуальном соответствии товара ожиданиям и его конечной стоимости.

Оценка соотношения риска и выгоды также демонстрирует преобладание прагматичного подхода. Лишь 8 % респондентов (7 человек) считают, что выгода значительно перевешивает риск, тогда как 6,9 % (6 человек) полагают, что риск обычно превышает выгоду, а 4,6 % считают, что риск значительно превосходит потенциальную выгоду. Вместе с тем половина опрошенных (50,6 %, 44 человека) оценивают соотношение риска и выгоды как сбалансированное, а 29,9 % респондентов (26 человек) считают, что выгода, как правило, перевешивает риск. Указанные результаты свидетельствуют о том, что для большинства потенциальных покупателей ожидаемая ценность получения желаемого товара оказывается более значимой, чем вероятность неблагоприятного исхода сделки. Распределение оценок соотношения риска и выгоды представлено на рис. 12.



Рис. 12. Соотношение риска и выгоды при покупке товаров у частных продавцов (кол-во человек)

Fig. 12. Risk-reward ratio when purchasing from private sellers (number of respondents)

Анализ предпочтений потенциальных покупателей в части способов оплаты товаров показывает выраженную ориентацию на минимизацию рисков. Вариант наличного расчета при личной встрече и осмотре товара оказался наименее привлекательным для респондентов: его выбрали лишь 6,9 % опрошенных (6 человек). Напротив, наибольшую поддержку получила модель «безопасной сделки» с гарантийным сопровождением со стороны цифровой платформы, которую предпочли 50,6 % респондентов (44 человека).

При этом полная предоплата, несмотря на ее распространенность в практике взаимодействия с байерами, воспринимается данной группой как неприемлемая форма расчетов, что свидетельствует о низкой готовности потенциальных клиентов принимать на себя весь объем финансовых рисков. Полученные результаты подтверждают значимость институциональных и платформенных механизмов защиты как ключевого условия вовлечения новой аудитории в рынок услуг частных посредников. Распределение предпочтений по способам оплаты представлено на рис. 13.

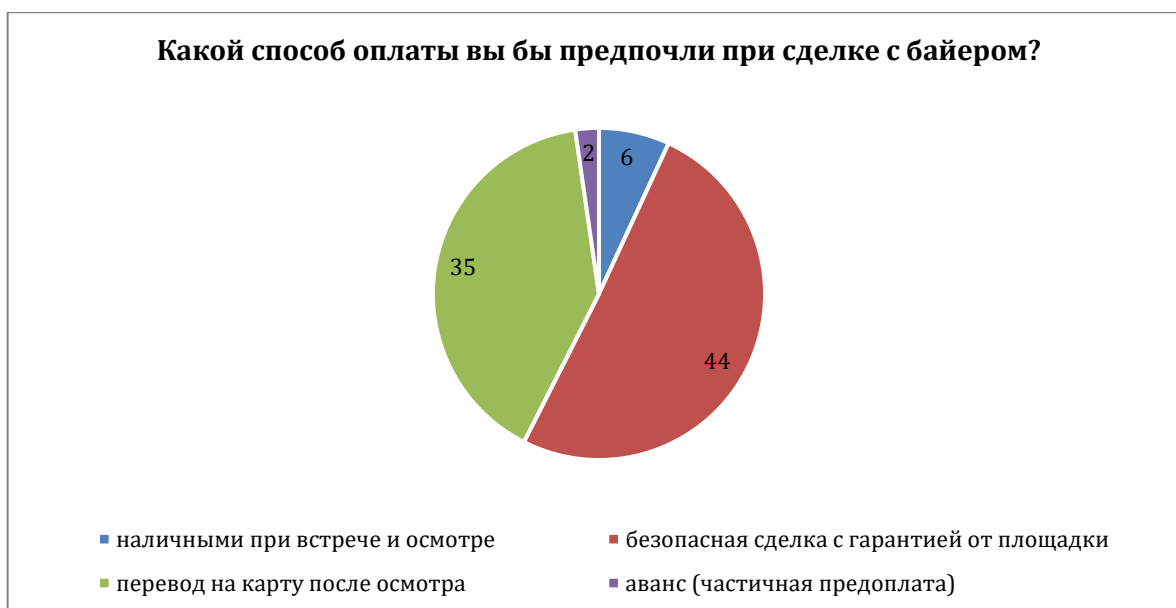


Рис. 13. Предпочтительные способы оплаты при сделке с байером (кол-во человек)

Fig. 13. Preferred payment methods for transactions with private sellers (number of respondents)

В случае возникновения неудачного исхода сделки подавляющее большинство потенциальных покупателей, не имеющих опыта приобретения товаров через байеров, демонстрируют готовность к активной поведенческой реакции. Так, 92 % респондентов (80 человек) заявили о намерении предпринимать попытки урегулирования проблемы непосредственно с продавцом. Одновременно значимая доля опрошенных – 41,4 % (36 человек) – указала на готовность информировать друзей и знакомых о недобросовестном посреднике.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени вовлеченности респондентов в репутационные механизмы регулирования данного рынка. Потенциальные потребители выражают готовность воздействовать на функционирование рынка услуг байеров посредством распространения как негативной, так и позитивной информации, а также через стремление к разрешению конфликтных ситуаций, связанных с качеством или получением товара. Распределение поведенческих стратегий в случае неудачного опыта представлено на рис. 14.



Рис. 14. Действия респондентов после неудачной покупки (кол-во человек)

Fig. 14. Respondents' actions after an unsuccessful purchase (number respondents)

В целом отношение респондентов, не имеющих практического опыта покупок через байеров, к данной форме потребления носит преимущественно нейтрально-положительный характер. Так, 32,2 % опрошенных (28 человек) оценивают практику покупок через байеров скорее положительно, а 34,5 % респондентов (30 человек) занимают нейтральную позицию. В то же время доля респондентов, выразивших резко отрицательное отношение к данному явлению, остается незначительной и составляет 4,6 % (4 человека). Распределение оценок общего отношения к покупкам через байеров представлено на рис. 15.



Рис. 15. Отношение респондентов к покупке товаров через байеров (кол-во человек)

Fig. 15. Respondents' attitudes toward purchasing goods through informal intermediaries (number of respondents)

Результаты опроса позволяют выделить ключевые меры, способные повысить уровень доверия и потенциально стимулировать представителей данной группы к совершению первой покупки через байеров. Абсолютным лидером среди таких мер является возможность использования механизма «безопасной сделки» через проверенные сервисы, на что указали 81,6 % респондентов (71 человек). Существенное значение также придается наличию системы верификации продавцов на цифровых платформах (66,7 %, 58 человек) и доступности четких и прозрачных отзывов от других покупателей (57,5 %, 50 человек).

Полученные данные свидетельствуют о том, что вовлечение новой аудитории в рынок услуг частных посредников требует формирования понятных, технологически обеспеченных и защищенных правил взаимодействия. Потенциальные покупатели ориентированы на снижение неопределенности и ожидают институционального подтверждения надежности как продавца, так и самой сделки. Структура факторов, способствующих росту доверия и готовности к первой покупке, представлена на рис. 16.



Рис. 16. Факторы доверия к частным продавцам (кол-во человек)

Fig. 16. Trust factors regarding private sellers (number of respondents)

Анализ 87 анкет респондентов, не имеющих опыта взаимодействия с байерами, показывает наличие выраженного интереса к их ценностному предложению, который, однако, сдерживается высоким уровнем воспринимаемых рисков. К числу ключевых барьеров относятся опасения, связанные с мошенничеством и отсутствием гарантий исполнения сделки. При этом, несмотря на осознание повышенной рискованности сотрудничества с частными посредниками, потенциальные покупатели не исключают для себя возможность совершения подобных покупок. Переход от намерения к фактическому действию, по мнению респондентов, возможен при условии внедрения платформенных инструментов защиты, таких как механизмы «безопасной сделки» и верификация продавцов, способных выполнять функцию институционального гаранта и снижать уровень неопределенности для потребителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными мотивами, побуждающими потребителей к взаимодействию с частными байерами, выступают не только стремление к экономии, но прежде всего возможность получения доступа к уникальным, редким либо официально недоступным на российском рынке товарам. Таким образом, ценностное предложение байеров формируется вокруг устранения институциональных и рыночных ограничений, с которыми сталкивается потребитель в условиях трансформации каналов поставок.

Центральным предметом анализа в рамках исследования стала ключевая поведенческая особенность данного рынка – готовность потребителей осознанно принимать финансовые и правовые риски, опираясь преимущественно на неформальные механизмы доверия. С одной стороны, представители всех исследованных групп отчетливо осознают высокий уровень транзакционных рисков, включая вероятность мошенничества, отсутствие юридических гарантий и ограниченные возможности разрешения спорных ситуаций. С другой стороны, значительная часть покупателей сознательно принимает данные риски, фактически делегируя функцию гаранта неформальным институтам доверия. В качестве ключевых

ориентиров при принятии решения о покупке выступают личные рекомендации, отзывы в цифровых сообществах и репутация байера, сложившаяся в рамках конкретной сети взаимодействий. Именно данные факторы компенсируют отсутствие формализованных гарантий и становятся основой доверия [9, 10].

Исследование выявило качественные различия между потребителями, имеющими опыт взаимодействия с байерами, и потенциальными клиентами. Опытные покупатели, адаптировавшись к специфике рисков, демонстрируют более высокий уровень удовлетворенности и склонность к формированию устойчивых, повторяющихся связей с проверенными посредниками. Потенциальных же клиентов от совершения первой покупки сдерживает дефицит доверия, обусловленный отсутствием понятных и надежных защитных механизмов. Материалы глубинных интервью позволили уточнить, что доверие в данной сфере носит неоднородный характер и трансформируется по мере накопления опыта. Для одних респондентов оно основано на субъективных впечатлениях и ощущении принадлежности к сообществу, для других – на рациональной оценке условий сделки и наличии минимальных гарантий безопасности. Существенным выводом является то, что негативный опыт радикально изменяет поведенческую модель потребителя, смещая акцент со стремления к обладанию уникальным товаром в сторону повышенной осторожности и требования формализованных механизмов защиты.

В целом рынок частных байеров представляет собой динамичную самоорганизующуюся систему, эффективно адаптирующуюся к внешним ограничениям и обеспечивающую удовлетворение специфического потребительского спроса. Вместе с тем дальнейшее развитие данного рынка и расширение его потребительской базы ограничены структурным противоречием между неформальной природой доверия и рациональным запросом на безопасность. Результаты исследования показывают, что потребители формулируют запрос не на отказ от неформальных практик, а на их гибридизацию с технологическими и платформенными инструментами. К числу таких инструментов относятся встроенные сервисы «безопасной сделки», прозрачные системы верификации продавцов и формализованные процедуры разрешения конфликтов. Реализация данных механизмов может рассматриваться как ключевое направление эволюции рынка байеров, обеспечивающее его устойчивость и предсказуемость при сохранении адаптивности и гибкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Котляров И. Д.* Модели активного поведения потребителей в условиях цифровой экономики // Российская экономика в условиях структурной трансформации: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 02 июня 2023 года / Под общей редакцией Д. Н. Ганченко, О. А. Цвиркун. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2023. С. 120–127. EDN: JZNWUP
2. *Котляров И. Д.* Платформы как модель организации хозяйственной деятельности: отдельные особенности функционирования // Экономика и управление: теория и практика. 2022. Т. 8. № 2. С. 30–37. EDN: KIXFCK
3. *Котляров И. Д.* Феномен виртуальных потребительских кооперативов // Общество и экономика. 2016. № 12. С. 75–82. EDN: XETNSR

4. Красноставская Н. В. Блог как инструмент продвижения бренда продукции и личного бренда мастера хендмейд индустрии // Практический маркетинг. 2017. № 2-1(240-1). С. 47–53. EDN: XYGRQD

5. Красноставская Н. В., Божук С. Г., Плетнева Н. А., Бочарникова А. В. Влияние онлайн отзывов покупателей на процесс принятия решения о покупке изделий ручной работы // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6. DOI: 10.15862/71ecvn622. EDN: LUTONG

6. Назарова Э. А., Николаева О. И., Никифорова Ж. А. Параллельный импорт как стратегический инструмент в преодолении санкционного давления и обеспечение экономической стабильности Российской Федерации // Труды XVI Евразийского научного форума: сборник статей, Санкт-Петербург, 12–13 декабря 2024 года. СПб.: Университет при МПА ЕврАзЭС, 2025. С. 237–252. EDN: MXYXUG

7. Олейникова А. В., Красноставская Н. В. Доверие как ключевой элемент системы маркетинговых взаимодействий в сети Интернет // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. Том Часть 3. СПб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2019. С. 378–381. EDN: DSFOLX

8. Плещенко В. И. Параллельный импорт и челноки: реактуализация старых схем организации товародвижения в условиях санкционных ограничений // Логистика сегодня. 2022. № 3. С. 180–184. DOI: 10.36627/2500-1302-2022-3-3-180-184. EDN: EWILZY

9. Шевцова И. Е., Красноставская Н. В. Мессенджеры как инструмент развития современного бизнеса // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года. Том Часть 4. СПб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2017. С. 343–345. EDN: YNACFW

10. Sularto L., Kozlova N. Social media marketing role on online purchasing decisions in Indonesia. *International Journal of Business Information Systems*. 2025. Vol. 50. No. 7. Pp. 1–22. DOI: 10.1504/ijbis.2025.149394. EDN: LZEDOQ

REFERENCES

1. Kotlyarov I.D. Models of active consumer behavior in the digital economy. The Russian economy in the context of structural transformation: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk, June 02, 2023*. (D. N. Ganchenko and O. A. Tsvirkun, Eds.). Moscow: Limited Liability Company "Relevance.RF", 2023. Pp. 120–127. EDN: JZNWUP. (In Russian)

2. Kotlyarov I.D. Platforms as a model of the organization of economic activity: separate features of functioning. *Economics and Management: Theory and Practice*. 2022. Vol. 8. No. 2. Pp. 30–37. EDN: KIKSFK. (In Russian)

3. Kotlyarov I.D. The phenomenon of virtual consumer cooperatives. *Society and Economics*. 2016. No. 12. Pp. 75–82. EDN: KHETNSR. (In Russian)

4. Krasnostavskaya N.V. Blog as a tool for promoting a product brand and a personal brand of a handmade industry master. *Practical Marketing*. 2017. № 2-1(240-1). Pp. 47–53. EDN: XYGRQD. (In Russian)

5. Krasnostavskaya N.V., Bozhuk S.G., Pletneva N.A., Bocharnikova A.V. The influence of online customer reviews on the purchase decision-making process due to the lack of manual work. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022. Vol. 14. No. 6. DOI: 10.15862/71ecvn622. EDN: LUTOG. (In Russian)
6. Nazarova E.A., Nikolaeva O.I., Nikiforova Zh.A. Parallel import as a strategic tool in overcoming sanctions pressure and ensuring economic stability of the Russian Federation. *Proceedings of the XVI century. Eurasian Scientific Forum: Collection of Articles, St. Petersburg, December 12–13, 2024*. St. Petersburg: University under the IPA EurAsEC, 2025. Pp. 237–252. EDN: MKSIKSUG. (In Russian)
7. Oleinikova A.V., Krasnostavskaya N.V. Trust as a key element of the marketing interaction system on the Internet. *SPbPU Science Week: Proceedings of the Scientific Conference with International Participation. Institute of Industrial Management, Economics and Trade*. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Part 3. Pp. 378–381. EDN: DSFOLKS. (In Russian)
8. Pleshchenko V.I. Parallel import and shuttles: reactualization of old schemes of organization of commodity movement in conditions of sanctions restrictions. *Logistics Today*. 2022. No. 3. Pp. 180–184. DOI: 10.36627/2500-1302-2022-3-3-180-184. EDN: WILZY. (In Russian)
9. Shevtsova I.E., Krasnostavskaya N.V. Messengers as a tool for the development of modern business. *SPbPU Science Week: proceedings of a scientific conference with international participation, St. Petersburg, November 13–19, 2017*. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Part 4. Pp. 343–345. EDN: YANAKFV. (In Russian)
10. Sularito L., Kozlova N. Social media marketing role on online purchasing decisions in Indonesia. *International Journal of Business Information Systems*. 2025. Vol. 50. No. 7. Pp. 1–22. DOI: 10.1504/ijbis.2025.149394. EDN: LZEDOQ

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Вклад авторов:

Митяшин Г. Ю. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; редактирование текста, интерпретация полученных данных;

Корнилова К. П. – разработка анкеты, участие в написании текста исследования, формирование выводов;

Филатова А. В. – проведение анкетирования, обработка результатов опроса, участие в написании текста исследования.

Contribution of the authors:

Mityashin G.Y. – scientific guidance; research concept; methodology development; text editing, interpretation of the data obtained;

Kornilova K.P. – development of the questionnaire, participation in writing the text of the study, drawing conclusions;

Filatova A.V. – conducting questionnaires, processing survey results, participating in writing the research text.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Митяшин Глеб Юрьевич, ассистент Высшей школы сервиса и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

gleb.mityashin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0416-7556>

Корнилова Ксения Петровна, студент направления «Торговое дело», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

kornilova.ksen@yandex.ru

Филатова Анжелика Викторовна, студент направления «Торговое дело», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

likalika16092005@yandex.ru

Information about the authors

Gleb Yu. Mityashin, Assistant Professor, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University;

50, Novorossiyskaya street, Saint Petersburg, 195251, Russia;

gleb.mityashin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0416-7556>

Ksenia P. Kornilova, Student, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University;

50, Novorossiyskaya street, Saint Petersburg, 195251, Russia;

kornilova.ksen@yandex.ru

Anzhelika V. Filatova, Student, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University;

50, Novorossiyskaya street, Saint Petersburg, 195251, Russia;

likalika16092005@yandex.ru

Георгий Борисович Клейнер (08.05.1946 – 04.06.2026)



Г. Б. Клейнер родился 8 мая 1946 г. в г. Иваново. В 1964 г. с золотой медалью окончил школу. В 1969 г. с красным дипломом окончил механико-математический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова. С 1969 г. по 1991 г. работал м.н.с., с.н.с., зав. лабораторией в Институте электронных управляющих машин (г. Москва). С 1991 г. по настоящее время работал г.н.с., зав. лабораторией, заместителем директора, руководителем научного направления «Мезоэкономика, микроэкономика, корпоративная экономика» Центрального экономико-математического института РАН (ЦЭМИ РАН). В 2003 г. избран членом-корреспондентом РАН по специальности «экономика».

Георгию Борисовичу Клейнеру принадлежат фундаментальные результаты в области социально-экономической теории, методов стратегического планирования и управления, экономического анализа и прогнозирования. Г. Б. Клейнером разработано новое направление в

экономической теории – системная экономическая теория, нацеленная на повышение уровня системности отечественной экономики, учет культурных, институциональных и ментальных факторов в деятельности экономических систем. В числе основных результатов, полученных Г. Б. Клейнером и изложенных в более чем 900 научных публикациях, включая более 30 монографий, необходимо отметить следующие разработки: теория системной сбалансированности экономики; универсальная теория системных факторов производства; интеллектуальная теория фирмы, описывающая поведение фирмы на развитой стадии цифровой экономики; новая теория экономических циклов, с системных позиций объясняющая возникновение пространственно-временных циклов; концепция мезоэкономики как сегмента экономики, призванного гармонизировать отраслевое и территориальное развитие, макроэкономические процессы и микроэкономические проекты; структура многополярного управления организацией и др. В последние годы Георгий Борисович Клейнер развивал междисциплинарный подход, объединяющий экономические цели, культурные традиции и социальные ориентиры.

Научно-прикладные результаты Г. Б. Клейнера были использованы при разработке программ социально-экономического развития ряда региональных и отраслевых систем, в частности, Кабардино-Балкарской Республики, Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа, отрасли станкостроения и др.

В течение многих лет Г. Б. Клейнер был одним из лидеров среди авторов публикаций по экономической тематике по версии РИНЦ. Под его руководством защищено более 30 кандидатских и докторских диссертаций.

Распространение разработанных Г. Б. Клейнером инновационных методов и социально-экономических программ осуществлялось в рамках профессиональных ежегодных форумов, организуемых ЦЭМИ РАН, Финансовым университетом при Правительстве РФ, Государственным университетом управления. В течение года Г. Б. Клейнер выступал с пленарными и установочными докладами на более чем 20 конференциях и круглых столах.

Заслуги Г. Б. Клейнера признаны государством, научной общественностью и ведомствами. Награды: медали ордена «За заслуги перед Отечеством» I степени (2014), II степени (2007), золотая медаль Н. Д. Кондратьева «За вклад в развитие общественных наук» (2017), лауреат премии РАН имени академика В. С. Немчинова (2002), лауреат премии Вольного экономического общества России «Экономическая книга года – 2022» за книгу «Системная экономика: шаги развития» (2021), лауреат премии «Преображение 2023» «За вклад в развитие и выдающиеся достижения в распространении экономики знаний в России» (2023), лауреат общенациональной премии «Профессор года» (Экономические науки) (2020), почетные грамоты РАН (2021, 2023, 2026), юбилейная медаль «300 лет Российской академии наук» (2024). Орден Дружбы (2024).

Г. Б. Клейнер возглавлял Научный совет РАН «Проблемы комплексного развития промышленных предприятий» Отделения общественных наук РАН, был членом Сената Вольного экономического общества России, главным редактором журнала «Экономическая наука современной России», а также членом редколлегий пяти научных журналов, входящих в ЕГПНИ («Белый список»), и др. Г. Б. Клейнер руководил кафедрами Финансового университета при Правительстве РФ, Государственного университета управления, Государственного академического университета гуманитарных наук.

Память о Георгии Борисовиче навсегда останется в истории, сердцах его учеников, коллег и всех, кто знал этого выдающегося человека.

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):

группа специальностей 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации:

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);

группа специальностей 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство:

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);

группа специальностей 5.2. Экономика:

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-hm/>, на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Научной электронной библиотеки «Киберленинка», в Российской государственной библиотеке, ВИНТИ, 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?jrmid=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 полнзначное 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 A4 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 A4 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 не указания 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 № 3 2026

Сквозной номер выпуска – 131

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*



Подписано в печать 18.06.2026 г. Дата выхода в свет: 22.06.2026 г.

Формат бумаги 60x84 1/8. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 29,06

Цена свободная

Регистрационный номер СМИ Эл № ФС 77-90616 от 29.12.2025 выдан 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