Print ISSN 1991-6639
Online ISSN 2949-1940

Том 26 № 6 2024

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 26 № 6 2024

Сквозной номер выпуска – 122

Журнал основан в 1998 г. Выходит 6 раз в год

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-14936 от 20 марта 2003 г. выдано Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

© КБНЦ РАН, 2024

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. 26 No. 6 2024

Continuous issue number – 122

The journal was founded in 1998, 6 issues per year

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

Certificate of registration PI No. 77-14936 March 20, 2003 issued by the Ministry of Russian Federation of Press, Broadcasting and Mass Communications

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE:

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

© KBSC RAS, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН Том 26 № 6 2024

Редакционная коллегия……7

Математика и механика

Задача с данными на параллельных характеристиках для нагруженного уравнения колебания струны
А. Х. АТТАЕВ……13

Начальная задача для уравнения дробного порядка с производной Герасимова–Капуто с инволюцией
Л. М. ЭНЕЕВА……19

Информационные технологии и телекоммуникации

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Поиск теоретических подходов для исследования киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением
Р. Н. АБУТАЛИПОВ, А. У. ЗАММОЕВ, Г. В. ЧЕРНЫШЕВ……26

Генератор LUT на основе гладкой кусочно-линейной параметризированной функции
М. А. КАЗАКОВ……45

Разработка сервиса роботизированных парковок «умного» города для оптимизации использования парковочных мест в условиях их недостатка
М. А. КАНОКОВА, А. У. ЗАММОЕВ……53

Моделирование алгоритма предотвращения столкновений в робототехнических коллаборативных системах
М. А. ШЕРЕУЖЕВ, Д. И. АРАБАДЖИЕВ, И. В. СЕМЯННИКОВ……67

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

Компьютерное проектирование больших разветвленных трубопроводных систем водоснабжения высокого ранга оптимальности
М. Б. АБАЗОКОВ, В. Ч. КУДАЕВ……82

Математическое моделирование и компьютерное проектирование больших разветвленных трубопроводных сетей водоснабжения Кирхгофа–Штейнера
М. А. БАГОВ……98

Оптимизация режимов работы светофора на двухполосном по каждой трассе перекрестке города
В. Ч. КУДАЕВ, А. К. БУЗДОВ……115

Информатика и информационные процессы

Система интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов
М. А. АБАЗОКОВ, К. Ч. БЖИХАТЛОВ……129

Применение метода машинного обучения для анализа неполных данных
Л. А. ЛЮТИКОВА……139

Информационное и алгоритмическое обеспечение обработки и анализа
нормативных документов в сфере информационной безопасности
в автоматизированной информационной системе
И. Р. ЧЕКАНОВ, А. С. КУЗНЕЦОВ……146

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Применение многоагентных робототехнических систем в сельском хозяйстве
М. И. АНЧЁКОВ, Ж. Х. КУРАШЕВ, А. М. ЛЕШКЕНОВ……158

Анализ целесообразного поведения различных типов автоматов
Д. П. ДИМИТРИЧЕНКО……165

Методы организации вопросно-ответных систем
Г. В. ДОРОХИНА, А. Г. ПОЛОУС……175

Нейрокогнитивные отображения и функции для моделей нейроморфогенеза
в системах управления интеллектуальных онтофилогенетических агентов
З. В. НАГОЕВ……188

Универсальная экспертная система на базе онтоэписоциофилогенетического обучения
федераций интеллектуальных нейрокогнитивных агентов
З. В. НАГОЕВ, М. И. АНЧЁКОВ, Ж. Х. КУРАШЕВ,
О. В. НАГОЕВА, И. А. ПШЕНОКОВА, А. А. ХАМОВ……197

Модификация алгоритма глубокого обучения для распределения функций и задач
между робототехническим комплексом и человеком в условиях неопределенности
и переменности окружающей среды
М. А. ШЕРЕУЖЕВ, У ГО, В. В. СЕРЕБРЕННЫЙ……208

Агрономия, лесное и водное хозяйство

Общее земледелие и растениеводство

Продуктивность кукурузы на зерно при разных способах основной обработки почвы
С. А. МАГОМЕДАЛИЕВ, М. Р. МУСАЕВ, М. Г. АБДУЛНАТИПОВ……219

Эффективность химпрополки в борьбе с амброзией полыннолистной
и другими сорняками на посевах подсолнечника в условиях степной зоны
Кабардино-Балкарской Республики
Х. Ш. ТАРЧОКОВ, Ф. Х. БЖИНАЕВ, Д. А. ТУТУКОВА……227

Потенциал гибридов подсолнечника в зависимости от обработки почвы и удобрений
Л. Н. ТХАКУШИНОВА, Н. И. МАМСИРОВ……237

Селекция, семеноводство и биотехнология растений

Повышение эффективности подбора родительских пар в селекции картофеля
А. В. МИТЮШКИН, А. А. ЖУРАВЛЕВ, Е. А. СИМАКОВ, Ал-р. В. МИТЮШКИН,
А. С. ГАЙЗАТУЛИН, В.А. ЖАРОВА, В. А. СЕМЕНОВ, С. В. ОВЕЧКИН……249

Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

Влияние некорневых подкормок на продуктивность сои в условиях Республики Адыгея
О. А. БЛАГОПОЛУЧНАЯ, Н. И. ДЕВТЕРОВА……260

Изучение влияния биопрепарата «Лигногумат» в сочетании с минеральными удобрениями
на продуктивность ячменя озимого в условиях южно-предгорной зоны Адыгеи
Н. И. ДЕВТЕРОВА……268

Экономика

Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

Моделирование стратегического поведения производителей на локальном рынке сельскохозяйственной продукции с ограниченным спросом
А. О. ГУРТУЕВ, О. Л. БОЗИЕВ……280

Региональная и отраслевая экономика

Влияние внедрения инновационных технологий в сфере роботизации и автоматизации агропромышленного комплекса и его социально-эколого-экономические последствия
О. З. ЗАГАЗЕЖЕВА, К. Ф. КРАЙ, М. И. ХАДЖИЕВА……291

Роль современных технологий в повышении экономической эффективности и решении социальных вызовов сельского хозяйства
О. З. ЗАГАЗЕЖЕВА, К. Ф. КРАЙ, С. Х. ШАЛОВА, А. А. МАХОШЕВ……302

Анализ эффективности реализации инновационных проектов развития региона
Т. Р. МАГОМАЕВ……316

Менеджмент

Тенденции, проблемы и перспективы современного этапа развития венчурной «экосистемы»
М. В. ЖАНОКОВА, С. А. МАХОШЕВА, Э. М. ЖАНОКОВ……326

Исторические науки

Аул Хумара. Краткий исторический очерк
И. Х. ГУКЕМУХ……344

Филология

Народные названия растений в цокающем диалекте карачаево-балкарского языка
Л. Б. КУЧМЕЗОВА……363

Функциональная роль алгышей (благопожеланий) и каргышей (проклятий) в карачаево-балкарских историко-героических песнях
Ж. М. ЛОКЬЯЕВА……369

Филологическое осетиноведение в контексте северокавказской исследовательской мысли
И. В. МАМИЕВА……382

Новости в науке

Петроглифы Хагондоково II: картина охоты на оленей
Ж. В. КАГАЗЕЖЕВ……392

Юбиляры

Хизри Амирхановичу Амирханову – 75 лет……397

Николаю Ивановичу Комкову – 85 лет ……399

Правила для авторов журнала……400

CONTENTS

News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS Vol. 26 No. 6 2024

Editorial Board……7

Mathematics and Mechanics

Problem with data on parallel characteristics for the loaded wave equation
A.Kh. ATTAEV……13

Initial value problem for a fractional order equation with the Gerasimov–Caputo derivative with involution
L.M. ENEEVA……19

Information Technologies and Telecommunications

Automation and control of technological processes and productions

Search for theoretical approaches to the study of cyber-physical systems and environments with intelligent control
R.N. ABUTALIPOV, A.U. ZAMMOEV, G.V. CHERNYSHEV……26

LUT generator based on smooth piecewise linear parameterized function
M.A. KAZAKOV……45

Development of a smart city robotic parking service to optimize the use of parking spaces in conditions of their shortage
M.A. KANOKOVA, A.U. ZAMMOEV……53

Modeling algorithm to avoid collisions in robotic collaborative systems
M.A. SHEREUZHEV, D.I. ARABADZHIEV, I.V. SEMYANNIKOV……67

Computer modeling and design automation

Computer modelling of large branched water pipeline systems with higher-order optimality
M.B. ABAZOKOV, V.Ch. KUDAEV……82

Mathematical modeling and computer design for water distribution system based on Kirchhoff-Steiner large branched network
M.A. BAGOV……98

Optimization of traffic light operation at urban intersections made of roads with two lanes
V.Ch. KUDAEV, A.K. BUZDOV……115

Informatics and information processes

Intelligent system to analyse distributed geophysical data for a network of test ranges with multiple landscapes
M.A. ABAZOKOV, K.Ch. BZHIKHATLOV……129

Application of machine learning method to analyse incomplete data
L.A. LYUTIKOVA……139

Information and algorithmic support for processing and analysis of regulative documents
in the field of information security in an automated information system
I.R. CHEKANOV, A.S. KUZNETSOV……146

System analysis, management and information processing, statistics

Application of multi-agent robotic systems in agriculture
M.I. ANCHEKOV, Zh.Kh. KURASHEV, A.M. LESHCKENOV……158

Analysis of expedient behavior of various types of automata
D.P. DIMITRICHENKO……165

Methods of organizing question-answering systems
G.V. DOROKHINA, A.G. POLOUS……175

Neurocognitive mappings and functions for neuromorphogenesis models
in control systems of intelligent ontophylogenetic agents
Z.V. NAGOEV……188

Universal expert system based on ontoepisosociophylogenetic training
of federations of intelligent neurocognitive agents
Z.V. NAGOEV, M.I. ANCHEKOV, Zh.Kh. KURASHEV,
O.V. NAGOEVA, I.A. PSHENOKOVA, A.A. KHAMOV……197

Modification of a deep learning algorithm for distributing functions and tasks between
a robotic complex and a person in conditions of uncertainty and variability
of the environment
M.A. SHEREUZHEV, Wu GUO, V.V. SEREBRENNY……208

Agronomy, Forestry and Water Management

General farming and crop production

Corn for grain productivity with different methods of basic cultivation
S.A. MAGOMEDALIEV, M.R. MUSAEV, M.G. ABDULNATIPOV……219

Efficiency of chemical weeding in the fight against ragweed
and other weeds on sunflower crops in the steppe zone
of the Kabardino-Balkarian Republic
Kh.Sh. TARCHOKOV, F.Kh. BZHINAEV, D.A. TUTUKOVA……227

Potential of sunflower hybrids depending on soil cultivation and fertilizers
L.N. THAKUSHINOVA, N.I. MAMSIROV……237

Breeding, seed production and plant biotechnology

Improving the efficiency of the selection of parent pairs in potato breeding
A.V. MITYUSHKIN, A.A. ZHURAVLEV, E.A. SIMAKOV, Al-r V. MITYUSHKIN,
A.S. GAIZATULLIN, V.A. ZHAROVA, V.A. SEMENOV, S.V. OVECHKIN……249

Agrochemistry, agrosoil science, plant protection and quarantine

The influence of foliar feeding on soybean productivity
in the Republic of Adygea
O.A. BLAGOPOLUCHNAYA, N.I. DEVTEROVA……260

Study of the influence of the biopreparation Lignohumate in combination with mineral fertilizers
on the productivity of winter barley in the conditions of the southern foothill zone of Adygea
N.I. DEVTEROVA……268

Economy

Mathematical, statistical and instrumental methods in economics

Modeling the strategic behavior of producers in a local agricultural market with bounded demand
A.O. GURTUEV, O.L. BOZIEV……280

Regional and sectoral economics

The impact of the introduction of innovative technologies in the field of robotics and automation in the agro-industrial complex and its socio-environmental and economic consequences
O.Z. ZAGAZEZHEVA, K.F. KRAI, M.I. KHADZHIEVA……291

The role of modern technologies in increasing economic efficiency and solving social challenges of agriculture
O.Z. ZAGAZEZHEVA, K.F. KRAY, S.Kh. SHALOVA, A.A. MAKHOSHEV……302

Analyzing the efficiency of innovative regional development projects
T.R. MAGOMAEV……316

Management

Trends, problems and prospects of current development of venture “ecosystem”
M.V. ZHANOKOVA, S.A. MAKHOSHEVA, E.M. ZHANOKOV……326

Historical Sciences

Khumara village. Brief historical essay
I.Kh. GUKEMUKH ……344

Philology

Folk names of plants in the click dialect of the Karachay-Balkar language
L.B. KUCHMEZOVA……363

The functional role of algysh (benevolence) and kargysh (curses) in Karachay-Balkar historical and heroic songs
Zh.M. LOKYAEVA……369

Philological Ossetian studies in the context of North Caucasian research thought
I.V. MAMIEVA……382

News in Science

Petroglyphs of Khagondokovo II: a picture of deer hunting
Zh.V. KAGAZEZHEV……392

Anniversaries

Khizri Amirkhanovich Amirkhanov is 75 years old ……397

Nikolai Ivanovich Komkov is 85 years old ……399

Publishing regulations for the authors ……400

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

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

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

Амирханов Хизри Амирханович, академик РАН, доктор исторических наук, профессор, Институт истории, археологии и этнографии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ронжин Андрей Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, директор Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Юсупов Рафаэль Мидхатович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Санкт-Петербургский институт информатики РАН, Санкт-Петербург, 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 History, Archeology and Ethnography of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Rafael M. Yusupov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg Institute of Informatics of RAS, St. Petersburg, Russia

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

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 517 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-13-18
EDN: AMHSFW

Задача с данными на параллельных характеристиках для нагруженного уравнения колебания струны

А. Х. Аттаев

Институт прикладной математики и автоматизации –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А

Аннотация. Теория нагруженных уравнений является весьма актуальной как в теоретическом плане, так и в ее многочисленных практических применениях в различных областях современного естествознания. Этим объясняется выход огромного количества работ по исследованию и применению нагруженных уравнений за последние неполные пятьдесят лет. Основная цель исследования – показать, что нагруженные уравнения могут выступать как метод постановки новых корректных краевых задач. Доказательство корректности поставленной задачи основывается на формуле Даламбера, полученной для исследуемого нагруженного уравнения колебания струны. В данной работе рассматривается нагруженное уравнение гиперболического типа с двумя нагруженными слагаемыми. Следы нагрузок принадлежат разным характеристическим многообразиям одномерного волнового оператора. Объектом исследования является задача с данными на непересекающихся характеристиках. Доказаны существование и единственность поставленной задачи, а само решение выписано в явном виде. Отличительной особенностью рассматриваемой задачи является то, что при отсутствии нагруженных слагаемых она является некорректной.

Ключевые слова: нагруженное уравнение, одномерный волновой оператор, характеристика, некорректная задача, формула Даламбера

Поступила 18.10.2024, одобрена после рецензирования 04.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Аттаев А. Х. Задача с данными на параллельных характеристиках для нагруженного уравнения колебания струны // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 13–18. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-13-18

MSC: 35L02 Original article

Problem with data on parallel characteristics for the loaded wave equation

A.Kh. Attaev

Institute of Applied Mathematics and Automation –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street

Abstract. The theory of loaded equations is very relevant both in theoretical terms and in its numerous practical applications in various fields of modern natural science. This explains a huge number of works devoted to research and application of loaded equations in the last fifty years. The main objective of the study is to present the loaded equations as a method for setting new correct boundary value problems. The proof for the correctness of the problem is based on the d'Alembert's

© Аттаев А. Х., 2024

formula obtained for the studied wave equation. The paper considers a loaded hyperbolic equation with two loaded terms. The load traces are related to different characteristic manifolds of a one-dimensional wave operator. Our goal is to study the problem with data on non-intersecting characteristics. We prove the existence and uniqueness of the solution, which is presented in an explicit form. The distinguishing feature of the problem is that it is ill-posed in the absence of loaded terms.

Keywords: loaded equation, one-dimensional wave operator, characteristic, ill-posed problem, d'Alembert formula

Submitted 18.10.2024, approved after reviewing 04.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Attaev A.Kh. Problem with data on parallel characteristics for the loaded wave equation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 13–18 . DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-13-18

Введение

Основной теоретической базой математического моделирования систем с сосредоточенными и распределенными параметрами является так называемая общая теория граничных задач для обыкновенных и основных типов дифференциальных уравнений в частных производных. Термин «общая теория граничных задач», появившийся в начале 20-го столетия, включал в себя, исходя из современной терминологии, теорию локальных и нелокальных краевых задач как для обычных дифференциальных уравнений, так и для нагруженных. Впервые определение нагруженных уравнений было введено А. М. Нахушевым [1].

После выхода работы [1] появилось огромное количество публикаций, посвященных исследованию различных начально-краевых задач для нагруженных дифференциальных уравнений. Приведем лишь некоторые из них, которые в той или иной мере близки к тематике исследования данной работы, – [2–9]. Все это привело А. М. Нахушева к написанию монографии [10], посвященной основополагающим элементам теории нагруженных уравнений. В ней излагаются такие способы применения нагруженных уравнений, как метод математического моделирования нелокальных процессов и явлений и метод эффективного поиска приближенных решений дифференциальных уравнений.

В предлагаемой работе мы хотим продемонстрировать нагруженные уравнения как метод регуляризации некорректных задач для уравнений гиперболического типа. Решающими факторами, влияющими на результат исследования той или иной задачи для нагруженного дифференциального уравнения, являются: во-первых, взаимное расположение следа нагрузки и области, где ищется решение задачи; во-вторых, вид следообразующего отображения.

Пусть Ω – конечная односвязная область плоскости независимых переменных x и y, ограниченная характеристиками: $AC: x - y = 0$, $AD: x + y = 0$, $BC: x + y = 1$, $BD: x - y = 1$ оператора $Lu = \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}$. В дальнейшем через J будем обозначать единичный интервал $(0, 1)$.

В области Ω рассмотрим нагруженное уравнение

$$Lu = 4[\lambda u(x - y, 0) + \mu u(x + y, 0)], \tag{1}$$

где λ, μ – произвольные действительные константы.

В характеристических переменных $\xi = x - y$, $\eta = x + y$ уравнение (1) принимает вид

$$v_{\xi\eta} = \lambda v(\xi, \xi) + \mu v(\eta, \eta), \tag{2}$$

где $v(\xi, \eta) = u\left(\frac{\xi+\eta}{2}, \frac{\eta-\xi}{2}\right)$.

Очевидно, что нахождение общего решения (2) эквивалентным образом редуцируется к нахождению общего решения следующего нагруженного интегрального уравнения:

$$v(\xi,\eta)-\mu\xi\int_{\xi}^{\eta}v\,(t,t)dt+\lambda\eta\int_{\xi}^{\eta}v\,(t,t)dt=P(\xi,\eta),$$

где $P(\xi,\eta)$ является общим решением уравнения $P_{\xi\eta}=0$.

Обращая полученное интегральное уравнение, получим

$$v(\xi,\eta)=f(\xi)+g(\eta)+(\mu\xi-\lambda\eta)\int_{\xi}^{\eta}[f(t)+g(t)]\,dt. \tag{3}$$

Переходя к прежним переменным, получим

$$u(x,y)=f(x-y)+g(x+y)+\mu(x-y)\int_{x-y}^{x+y}[f(t)+g(t)]\,dt-$$

$$-\lambda(x+y)\int_{x-y}^{x+y}[f(t)+g(t)]\,dt. \tag{4}$$

Формулу (4) назовем аналогом формулы Даламбера для уравнения (1).

Определение 1. *Регулярным решением уравнения (1) назовем функцию $u(x,y)$, представимую формулой (4), где f, g – произвольные дважды непрерывно дифференцируемые функции.*

Краевая задача для уравнения (1) с данными на непересекающихся характеристиках

Задача 1. *Найти регулярное для уравнения (1) решение $u(x,y)\in C^1(\bar{\Omega})$, удовлетворяющее условиям*

$$u|_{AD}=\varphi_1(x),\qquad u|_{BC}=\varphi_2(x),\qquad 0\le x\le 1, \tag{5}$$

$\varphi_1,\varphi_2\in C^1(\bar{J})\cap C^3(J)$.

Теорема 1. *Пусть* $\lambda\neq 0$,

$$\varphi_2'^{(0)}-\varphi_1'^{(0)}=\lambda\varphi_1(0),\qquad \varphi_2'^{(1)}-\varphi_1'^{(1)}=\lambda\varphi_1(1), \tag{6}$$

$$\mu[\varphi_2(0)-\varphi_1(0)-\varphi_2(1)+\varphi_1(1)]=0. \tag{7}$$

Тогда решение задачи 1 существует и единственно.

Доказательство. Пусть существует решение задачи 1. В характеристических переменных $\xi=x-y$, $\eta=x+y$ условия (5) примут вид

$$v(\xi,0)=\varphi_1(\xi),\qquad v(\xi,1)=\varphi_2(\xi),\qquad 0\le\xi\le 1. \tag{8}$$

Удовлетворяя (3) условиям (8), получим

$$f(\xi)+g(0)+\mu\xi\int_{\xi}^{0}[f(t)+g(t)]\,dt=\varphi_1(\xi), \tag{9}$$

$$f(\xi)+g(1)+(\mu\xi-\lambda)\int_{\xi}^{1}[f(t)+g(t)]\,dt=\varphi_2(\xi). \tag{10}$$

Дифференцируя (9) и (10) по ξ и отнимая из (10) почленно выражение (9), получим

$$\mu \int_0^1 [f(t) + g(t)]\, dt + \lambda[f(\xi) + g(\xi)] = \varphi_2{}'(\xi) - \varphi_1{}'(\xi).$$

Учитывая, что $f(0) + g(0) = \varphi_1(0)$, из последнего соотношения получаем, что

$$f(\xi) + g(\xi) = \frac{1}{\lambda}[\varphi_2{}'(\xi) - \varphi_1{}'(\xi)] + c, \tag{11}$$

где $c = -\frac{\mu}{\lambda}[\varphi_2{}'(0) - \varphi_1{}'(0) - \lambda\varphi_1(0)]$.

Из (9) находим $f(\xi)$:

$$f(\xi) = \varphi_1(\xi) + \frac{\mu\xi}{\lambda}[\varphi_2(\xi) - \varphi_1(\xi) - \varphi_2(0) + \varphi_1(0)] + \mu\xi^2 c - g(0).$$

Из (11) находим $g(\xi)$:

$$g(\xi) = \frac{1}{\lambda}[\varphi_2{}'(\xi) - \varphi_1{}'(\xi)] + c - \varphi_1(\xi) -$$

$$-\frac{\mu\xi}{\lambda}[\varphi_2(\xi) - \varphi_1(\xi) - \varphi_2(0) + \varphi_1(0)] - \mu\xi^2 c + g(0).$$

Подставляя полученные значения для $f(\xi)$, $g(\xi)$, $f(\xi) + g(\xi)$ в (3), после некоторых преобразований, с учетом того, что значение для c принимаем равным нулю, получим

$$v(\xi,\eta) = \varphi_1(\xi) - \varphi_1(\eta) + \frac{1}{\lambda}[\varphi_2{}'(\eta) - \varphi_1{}'(\eta)] -$$

$$- \eta[\varphi_2(\eta) - \varphi_1(\eta) - \varphi_2(\xi) + \varphi_1(\xi)] +$$

$$+\frac{\mu}{\lambda}(\eta - \xi)[\varphi_2(0) - \varphi_1(0) - \varphi_2(\eta) + \varphi_1(\eta)]. \tag{12}$$

Или, переходя к переменным x, y, имеем

$$u(x,y) = \varphi_1(x - y) - \varphi_1(x + y) + \frac{1}{\lambda}[\varphi_2{}'(x + y) - \varphi_1{}'(x + y)] -$$

$$- (x + y)[\varphi_2(x + y) - \varphi_1(x + y) - \varphi_2(x - y) + \varphi_1(x - y)] +$$

$$+\frac{2\mu}{\lambda}y[\varphi_2(0) - \varphi_1(0) - \varphi_2(x + y) + \varphi_1(x + y)]. \tag{13}$$

Итак, доказано, что если существует решение задачи 1, то оно представимо в виде (13). Легко установить справедливость обратного утверждения. Принимая во внимание условие гладкости на заданные функции φ_1 и φ_2, непосредственной проверкой можно убедиться в том, что задаваемая формулой (13) функция $u(x,y)$, удовлетворяющая условиям (6), (7), является регулярным в области Ω решением уравнения (1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нахушев А. М.* О задаче Дарбу для одного вырождающегося нагруженного интегро-дифференциального уравнения второго порядка // Дифференциальные уравнения. 1976. Т. 12. № 1. С. 103–108. EDN: PDBUJB

2. *Казиев В. М.* Задача Гурса для одного нагруженного интегро-дифференциального уравнения // Дифференциальные уравнения. 1981. Т. 17. № 2. С. 313–319. https://www.mathnet.ru/rus/de4195

3. *Гогуноков З. Г.* Задача Гурса для нагруженного гиперболического уравнения второго порядка // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2000. Т. 5. № 1. С. 20–23.

4. *Огородников Е. М.* Некоторые характеристические задачи для систем нагруженных дифференциальных уравнений и их связь с нелокальными краевыми задачами // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Серия Физ.-мат. науки. 2003. Т. 19. С. 22–28. EDN: EBRVHH

5. *Аттаев А. Х.* Задача с данными на параллельных характеристиках для нагруженного волнового уравнения // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2013. Т. 15. № 2. С. 25–28. EDN: RWCJIL

6. *Ломов И. С.* Нагруженные дифференциальные операторы: сходимость спектральных разложений // Дифференциальные уравнения. 2014. Т. 50. № 8. С. 1070–1079. DOI: 10.1134/S0374064114080068

7. *Аттаев А. Х.* Задача граничного управления для нагруженного уравнения колебания струны // Дифференциальные уравнения. 2020. Т. 56. № 5. С. 646–651. DOI: 10.1134/S0374064120050088

8. *Аттаев А. Х.* Характеристическая задача Коши для линейного нагруженного гиперболического уравнения // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2010. Т. 12. № 1. С. 9–10. EDN: OGYECJ

9. *Аттаев А. Х.* Краевые задачи с внутреннекраевым смещением для уравнения колебания струны // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2014. Т. 16. № 2. С. 17–19. EDN: SJTMNX

10. *Нахушев А. М.* Нагруженные уравнения и их применение. М.: Наука, 2012. 232 с. ISBN: 978-5-02-037977-0

REFERENCES

1. Nakhushev A.M. The Darboux problem for a certain degenerate second order loaded integrodifferential equation. *Differential Equations*. 1976. Vol. 12. No. 1. Pp. 103–108. EDN: PDBUJB. (In Russian)

2. Kaziev V.M. Gursa problem for one loaded integro-differential equation. *Differential Equations*. 1981. Vol. 17. No. 2. Pp. 313–319. http://mi.mathnet.ru/de4195. (In Russian)

3. Gogunokov Z.G. The Gursa problem for a loaded second-order hyperbolic equation. *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*. 2000. Vol. 5. No. 1. Pp. 20–23. (In Russian)

4. Ogorodnikov E.M. Some characteristic problems for loaded systems of differential equations and their relationship with non-local boundary value problems. *J. Samara State Tech. Univ. Ser. Phys. math. Sci*. 2003. Vol. 19. Pp. 22–28. EDN: EBRVHH. (In Russian)

5. Attaev A.Kh. Problem with data on parallel characteristics for a loaded wave equation. *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*. 2013. Vol. 15. No. 2. Pp. 25–27. EDN: RWCJIL. (In Russian)

6. Lomov I.S. Loaded differential operators: Convergence of spectral expansions. *Differential Equations*. 2014. Vol. 50. No. 8. Pp. 1070–1079. DOI: 10.1134/S0374064114080068. (In Russian)

7. Attaev A.K. Boundary control problem for a loaded string vibration equation. *Differential Equations*. 2020. Vol. 56. No. 5. Pp. 635–640. DOI: 10.1134/S0374064120050088. (In Russian)

8. Attaev A.Kh. Characteristic Cauchy problem for a linear loaded hyperbolic equation. *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*. 2010. Vol. 12. No. 1. Pp. 9–10. EDN: OGYECJ. (In Russian)

9. Attaev A.Kh. Boundary value problems with inner shift for the string equation. *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*. 2014. Vol. 16. No. 2. Pp. 17–19. EDN: SJTMNX. (In Russian)

10. Nakhushev A.M. *Nagruzhennyye uravneniya i ikh primeneniye* [Loaded equations and their applications]. Moscow: Nauka, 2012. 232 p. ISBN: 978-5-02-037977-0. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Аттаев Анатолий Хусеевич, к.ф.-м.н., доцент, зав. отд., вед. науч. сотр. отдела уравнений смешанного типа, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;

attaev.anatoly@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5864-6283, SPIN-код: 6389-3114

Information about the author

Anatoly Kh. Attaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of Department, Leading Researcher of the Department of Mixed-Type Equations, the Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;

attaev.anatoly@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5864-6283, SPIN-code: 6389-3114

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 517.926 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-19-25
EDN: BOUNKR

Начальная задача для уравнения дробного порядка с производной Герасимова–Капуто с инволюцией

Л. М. Энеева

Институт прикладной математики и автоматизации –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А

Аннотация. В работе рассматривается линейное обыкновенное дифференциальное уравнение с производной дробного порядка в смысле Герасимова–Капуто. Рассматриваемое уравнение относится к классу дифференциальных уравнений, возникающих, в частности, при исследовании краевых задач для дифференциальных уравнений, содержащих композицию лево- и правосторонних производных дробного порядка, которые, в свою очередь, выступают основой при моделировании различных физических и геофизических процессов. В частности, такие уравнения возникают при описании диссипативных колебательных систем. В работе для рассматриваемого уравнения исследуется начальная задача в единичном интервале. Доказана теорема существования и единственности решения исследуемой задачи, построено явное представление решения.

Ключевые слова: уравнение дробного порядка, задача Коши, производная Герасимова–Капуто, инволюция, фундаментальное решение

Поступила 12.10.2024, одобрена после рецензирования 10.11.2024, принята к публикации 29.11.2024

Для цитирования. Энеева Л. М. Начальная задача для уравнения дробного порядка с производной Герасимова–Капуто с инволюцией // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 19–25. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-19-25

MSC: 26A33, 34B05 Original article

Initial value problem for a fractional order equation with the Gerasimov–Caputo derivative with involution

L.M. Eneeva

Institute of Applied Mathematics and Automation –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street

Abstract. The paper considers a linear ordinary differential equation with a fractional derivative in the Gerasimov–Caputo sense. The equation under consideration belongs to the class of differential equations that arise, in particular, in the study of boundary value problems for differential equations containing a composition of left- and right-hand derivatives of fractional order, which, in turn, serve as the basis for modeling various physical and geophysical processes. In particular, such equations arise when describing dissipative oscillatory systems. In this work, the initial value problem in the unit interval is studied for the equation under consideration. A theorem for the existence and uniqueness of a solution to the problem under study is proven, and an explicit representation of the solution is constructed.

© Энеева Л. М., 2024

Keywords: fractional order equation, Cauchy problem, Gerasimov–Caputo derivative, involution, fundamental solution

Submitted 12.10.2024, approved after reviewing 10.11.2024, accepted for publication 29.11.2024

For citation. Eneeva L.M. Initial value problem for a fractional order equation with the Gerasimov–Caputo derivative with involution. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 19–25. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-19-25

1. Введение

Рассмотрим уравнение

$$\partial_{0x}^{\alpha} u(x) - \lambda I_x u(x) = f(x), \tag{1}$$

где ∂_{0x}^{α} – дробная производная Герасимова–Капуто порядка α $(0 < \alpha < 1)$, I_x – оператор инволюции, $f(x)$ – заданная, а $u(x)$ – искомая функции. Уравнение (1) будем рассматривать в интервале $0 < x < 1$.

Производные Римана–Лиувилля и Герасимова–Капуто порядка $\alpha \in]0,1[$ с началом в точке $x = 0$ задаются, соответственно, равенствами [1]

$$D_{0x}^{\alpha} g(x) = \frac{d}{dx} D_{0x}^{\alpha-1} g(x) \qquad \text{и} \qquad \partial_{0x}^{\alpha} g(x) = D_{0x}^{\alpha-1} g'(x),$$

где $D_{0x}^{\alpha-1}$ – дробный интеграл Римана–Лиувилля [1],

$$D_{0x}^{-\beta}\, u(x) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^x u(t)(x-t)^{\beta-1}\, dt \qquad (\beta > 0).$$

Отметим, что производная Римана–Лиувилля и производная Герасимова–Капуто связаны соотношением [1]

$$\partial_{0x}^{\alpha} g(x) = D_{0x}^{\alpha}[g(x) - g(0)] \qquad (0 < \alpha < 1).$$

Это соотношение несколько расширяет область определения оператора ∂_{0x}^{α}, и в дальнейшем мы именно его рассматриваем в качестве определения этого оператора.

Оператор инволюции I_x для функции $g(x)$, заданной на отрезке $[0,1]$, определяется соотношением

$$I_x g(x) \coloneqq g(1-x).$$

Уравнение (1) относится к классу обыкновенных дифференциальных уравнений дробного порядка с инволюцией. Необходимость исследовать такие уравнения возникает, в частности, при решении уравнений, содержащих композиции производных дробного порядка с различными началами, которые, в свою очередь, выступают основой при моделировании различных физических и геофизических процессов. Так, в работе [2] был предложен подход к решению краевых задач для уравнений дробного порядка, содержащих композицию лево- и правосторонних производных дробного порядка в смысле Римана–Лиувилля и Герасимова–Капуто, возникающих при моделировании диссипативных колебательных систем [3–8], основанный на редукции изучаемых задач к исследованию уравнений дробного порядка с инволюцией. В работе [9] рассмотрено уравнение вида (1) с производной Римана–Лиувилля. В частности, найдено фундаментальное решение, построено представление решения исследуемой задачи.

В настоящей работе, используя результаты работы [9], мы решаем начальную задачу для уравнения (1), доказываем теорему существования и единственности рассматриваемой задачи и в терминах фундаментального решения, найденного в работе [9], строим явное представление решения.

2. Постановка задачи и вспомогательные утверждения

Регулярным решением уравнения (1) будем называть функцию $u(x) \in AC[0,1]$, удовлетворяющую уравнению (1) во всех точках интервала $]0,1[$. Здесь, как обычно, $AC[0,1]$ будет обозначать пространство абсолютно непрерывных на отрезке $[0,1]$ функций.

Начальная задача формулируется следующим образом: *найти регулярное решение уравнения (1), удовлетворяющее начальному условию*

$$u(0) = u_0. \tag{2}$$

Рассмотрим функцию $F_{\alpha,\lambda}(x,t)$, которая определяется [9] как решение интегрального уравнения

$$F_{\alpha,\lambda}(x,t) = \lambda\, Q_x^{\alpha} F_{\alpha,\lambda}(x,t) + q_0(x,t) \qquad (0 < x,t < 1), \tag{3}$$

где оператор Q_x^{α} и функция $q_0(x,t)$ задаются соответственно равенствами

$$Q_x^{\alpha} := D_{0x}^{-\alpha}\, I_x$$

и

$$q_0(x,t) := \frac{(x-t)_+^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}.$$

Здесь и далее

$$z_+^{\mu} := \begin{cases} z^{\mu}, & \text{при } z > 0, \\ 0, & \text{при } z = 0, \end{cases} \qquad (\mu \in \mathbb{R}).$$

В работе [9] показано, что оператор Q_x^{α} можно представить в виде

$$Q_x^{\alpha}\, g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{1-x}^{1} (s + x - 1)^{\alpha-1}\, g(s)\, ds,$$

и, кроме того, справедливо включение

$$Q_x^{\alpha}(L[0,1]) \subset L[0,1].$$

Примем следующие обозначения:

$$\|g(x)\|_{(a,\mu)} := \sup_{[0,1]} \frac{|g(x)|}{|x-a|^{-\mu} + |x+a-1|^{-\mu}}$$

и

$$M_a^{\mu}[0,1] := \left\{ g(x) \in C([0,1] \setminus \{a, 1-a\}) \colon \|g(x)\|_{(a,\mu)} < \infty \right\}.$$

Определение. *Множество всех $\lambda \in \mathbb{C}$, для которых уравнение*

$$g(x) = \lambda\, Q_x^{\alpha} g(x) \qquad (0 < x < 1)$$

не имеет в пространстве $M_t^{1-\alpha}[0,1]$ для всех $t \in [0,1]$ отличных от тождественного нуля решений, обозначим через S_{α}.

Как доказано в [9], принадлежность λ множеству S_α гарантирует однозначную разрешимость уравнения (3) и существование функции $F_{\alpha,\lambda}(x,t)$.

В работе [9], в частности, показано, что

$$\left\{\lambda \in \mathbb{C}:\ |\lambda| < \frac{1}{C_\alpha}\right\} \subset S_\alpha,$$

где

$$C_\alpha = \frac{1}{\Gamma(\alpha+1)} + \frac{\Gamma(\alpha)}{\Gamma(2\alpha)}.$$

Таким образом, неравенство $|\lambda| < \frac{1}{C_\alpha}$ является достаточным условием существования функции $F_{\alpha,\lambda}(x,t)$.

3. Основной результат

Пусть $u(x)$ – регулярное решение задачи (1), (2). Принимая во внимание определения операторов дробного дифференцирования (см. Введение) и условие (2), можем записать

$$\partial_{0x}^{\alpha}\, u(x) = D_{0x}^{\alpha}\,[u(x) - u(0)] = \ D_{0x}^{\alpha}\, u(x) - \frac{u_0\, x^{-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)}. \tag{4}$$

С учетом (4) уравнение (1) примет вид

$$D_{0x}^{\alpha} u(x) - \lambda I_x u(x) = f(x) + \frac{u_0\, x^{-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)}. \tag{5}$$

Принимая во внимание непрерывность регулярного решения вплоть до нуля, имеем

$$\lim_{x\to 0} D_{0x}^{\alpha-1} u(x) = 0. \tag{6}$$

Таким образом, мы показали, что всякое регулярное решение задачи (1), (2) является решением задачи (5), (6). Теперь, если $\lambda \in C_\alpha$ и $f(x) \in M_0^{1-\alpha}[0,1]$, то, как показано в [9], решение задачи (5), (6) и, следовательно, решение задачи (1), (2) имеет вид

$$u(x) = \int_0^1 F_{\alpha,\lambda}(x,t)\left[f(t) + \frac{u_0\, t^{-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)}\right] dt =$$

$$= \int_0^1 F_{\alpha,\lambda}(x,t)\, f(t)\, dt + \frac{u_0}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^1 F_{\alpha,\lambda}(x,t)\, t^{-\alpha}\, dt.$$

Нетрудно заметить, что

$$\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^1 F_{\alpha,\lambda}(x,t)\, t^{-\alpha}\, dt = \left[D_{1t}^{\alpha-1} F_{\alpha,\lambda}(x,t)\right]_{t=0},$$

где

$$D_{1t}^{\alpha-1} g(t) \coloneqq \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_t^1 g(s)\, (s-t)^{-\alpha}\ ds$$

– (правосторонний) дробный интеграл Римана–Лиувилля порядка $1-\alpha$ с началом в точке $t = 1$.

Теорема. *Пусть* $\lambda \in C_\alpha$, $\alpha \in [0,1]$ *и* $f(x) \in C[0,1]$. *Тогда регулярное решение задачи (1), (2) существует, единственно и имеет вид*

$$u(x) = u_0\left[D_{1t}^{\alpha-1}F_{\alpha,\lambda}(x,t)\right]_{t=0} + \int_0^1 F_{\alpha,\lambda}(x,t)\, f(t)\, dt. \tag{7}$$

Доказательство. Тот факт, что регулярное решение задачи (1), (2), в случае его существования, имеет вид (7), следует из рассуждений, приведенных перед формулировкой теоремы. Отсюда, в частности, в силу линейности задачи (1), (2) следует единственность решения.

Докажем, что функция $u(x)$, представимая в виде (7), является решением задачи (1), (2). Примем обозначения

$$G_0(x) := \left[D_{1t}^{\alpha-1}F_{\alpha,\lambda}(x,t)\right]_{t=0} \qquad \text{и} \qquad G_f(x) := \int_0^1 F_{\alpha,\lambda}(x,t)\, f(t)\, dt. \tag{8}$$

Рассмотрим функцию

$$G(x,t) = D_{1t}^{\alpha-1}F_{\alpha,\lambda}(x,t). \tag{9}$$

С учетом обозначения (9), подействовав на обе части равенства (3), имеем

$$G(x,t) = \lambda\, Q_x^\alpha G(x,t) + D_{1t}^{\alpha-1}q_0(x,t).$$

Нетрудно заметить, что

$$D_{1t}^{\alpha-1}q_0(x,t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(1-\alpha)}\int_t^1 (x-s)_+^{\alpha-1}\,(s-t)^{-\alpha}\, ds.$$

Отсюда следует, что $D_{1t}^{\alpha-1}q_0(x,t) = 0$, если $x \le t$ и

$$D_{1t}^{\alpha-1}q_0(x,t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(1-\alpha)}\int_t^x (x-s)^{\alpha-1}\,(s-t)^{-\alpha}\, ds = 1,$$

если $x > t$. То есть

$$D_{1t}^{\alpha-1}q_0(x,t) = H(x-t),$$

где $H(z)$ – функция Хевисайда,

$$H(z) := \begin{cases} 0, & \text{если } z \le 0, \\ 1, & \text{если } z > 0. \end{cases}$$

Таким образом, функция $G(x,t)$ является решением уравнения

$$G(x,t) = \lambda\, Q_x^\alpha G(x,t) + H(x-t).$$

И, в частности,

$$G(x,0) = \lambda\, Q_x^\alpha G(x,0) + 1.$$

Отсюда следует, что

$$\lim_{x\to 0} G(x,0) = 1$$

и с учетом (4)

$$\partial_{0x}^\alpha G(x,0) = D_{0x}^\alpha[G(x,0)-1] = \lambda\, I_x\, G(x,0).$$

Принимая во внимание обозначения (8) и (9), нетрудно заметить, что $G_0(x) = G(x,0)$. Таким образом, получаем, что функция $G_0(x)$ является решением исследуемой задачи для однородного уравнения:

$$\partial_{0x}^{\alpha} G_0(x) - \lambda\, I_x\, G_0(x) = 0, \qquad G_0(0) = 1. \tag{10}$$

Далее, в силу свойств $F_{\alpha,\lambda}(x,t)$ (см. лемму 4, а также формулу (24) в [9]) имеем

$$G_f(0) = 0$$

и, принимая во внимание (4), получаем

$$\partial_{0x}^{\alpha} G_f(x) = D_{0x}^{\alpha}\, G_f(x) = \lambda \frac{d}{dx} \int_0^1 \left[D_{0x}^{-1} I_x F_{\alpha,\lambda}(x,t) - H(x-t) \right] f(t)\, dt =$$

$$= \lambda \int_0^1 F_{\alpha,\lambda}(1-x,t)\, f(t)\, dt + f(x) = \lambda\, I_x\, G_f(x)\ + f(x).$$

Таким образом, $G_f(x)$ является решением задачи

$$\partial_{0x}^{\alpha} G_f(x) - \lambda\, I_x\, G_f(x) = f(x), \qquad G_f(0) = 0. \tag{11}$$

Из (10) и (11), с учетом обозначений (8), следует, что функция $u(x)$, определенная равенством (7), является искомым решением задачи (1), (2). Это завершает доказательство теоремы.

Заключение

В работе для рассматриваемого уравнения исследована начальная задача в единичном интервале. Доказана теорема существования и единственности решения исследуемой задачи, построено явное представление решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Нахушев А. М.* Дробное исчисление и его применение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 272 с.

Nakhushev A.M. *Drobnoye ischisleniye i yego primeneniye* [Fractional calculus and its application]. Moscow: FIZMATLIT, 2003. 272 p. (In Russian)

2. *Энеева Л. М.* К вопросу о решении смешанной краевой задачи для уравнения с производными дробного порядка с различными началами // Доклады Адыгской международной академии наук, 2023. Т. 23. № 4. С. 62–68. DOI: 10.47928/1726-9946-2023-23-4-62-68

Eneeva L.M. On the question of solving a mixed boundary value problem for an equation with fractional derivatives with different origins. *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences.* 2023. Vol. 23. No. 4. Pp. 62–68. DOI: 10.47928/1726-9946-2023-23-4-62-68. (In Russian)

3. Stankovi´c B. An equation with left and right fractional derivatives. *Publications de l'institute math´ematique. Nouvelle serie.* 2006. Vol. 80(94), Pp. 259–272.

4. Atanackovic T.M., Stankovi´c B. On a differential equation with left and right fractional derivatives. *Fractional Calculus and Applied Analysis*. 2007. Vol. 10. No. 2. Pp. 139–150.

5. Torres C. Existence of a solution for the fractional forced pendulum. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics.* 2014. Vol. 13. No. 1. Pp. 125–142.

6. Eneeva L.M., Pskhu A.V., Potapov A.A. et al. Lyapunov inequality for a fractional differential equation modelling damped vibrations of thin film MEMS. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* ICCD2019 (paper ID: E19100). 2021.

7. Rekhviashvili S.Sh., Pskhu A.V., Potapov A.A. et al. Modeling damped vibrations of thin film MEMS. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. ICCD2019 (paper ID: E19101). 2021.

8. Eneeva L., Pskhu A., Rekhviashvili S. Ordinary differential equation with left and right fractional derivatives and modeling of oscillatory systems. *Mathematics*. 2020. Vol. 8(12). P. 2122. DOI: 10.3390/math8122122

9. *Энеева Л. М.* Задача Коши для уравнения дробного порядка с инволюцией // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 48. № 3. С. 43–55. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-48-3-43-55

Eneeva L.M. Cauchy problem for fractional order equation with involution. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2024. Vol. 48. No. 3. Pp. 43–55. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-48-3-43-55. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Энеева Лиана Магометовна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. отдела математического моделирования геофизических процессов, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;

Eneeva72@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2530-5022, SPIN-код: 3403-8412

Information about the author

Liana M. Eneeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Department of Mathematical Modeling of Geophysical Processes at the Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;

Eneeva72@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2530-5022, SPIN-code: 3403-8412

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 004.89:004.94:007.5 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-26-44
EDN: CCVAZY

Поиск теоретических подходов для исследования киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением

Р. Н. Абуталипов, А. У. Заммоев✉, Г. В. Чернышев

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 рамках исследований бионаноробототехники актуальной является разработка методологических подходов, интегрирующих междисциплинарные знания. С этой целью предложена архитектурная модель когнитивной инфокоммуникационной системы (КИКС), основанной на принципах доменного моделирования. В работе анализируются возможности применения теории категорий и интуиционистской логики для формализованного описания и предсказания характеристик биоинтегрированных киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением. Предложен метод представления топологической структуры КИКС посредством концепции «предпучка». Для повышения точности и эффективности моделирования рекомендовано использование современных инструментальных средств, таких как гомотопическая теория типов, помощники по доказательству теорем, языки функционального и логического программирования, дискретно-событийные имитационные модели.

Ключевые слова: бионаноробототехника, мягкая робототехника, многоклеточные инженерные живые системы, теория категорий, интуиционистская логика, предпучок, интеллектуальное управление, когнитивная инфокоммуникационная система, киберфизические системы и среды, проектирование

Поступила 03.11.2024, одобрена после рецензирования 26.11.2024, принята к публикации 03.12.2024

Для цитирования. Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У., Чернышев Г. В. Поиск теоретических подходов для исследования киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 26–44. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-26-44

MSC: 68W50; 93B51 Original article

Search for theoretical approaches to the study of cyber-physical systems and environments with intelligent control

R.N. Abutalipov, A.U. Zammoev✉, G.V. Chernyshev

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Abstract. In the context of bionanorobotics research it is important to develop methodological approaches that integrate interdisciplinary knowledge. For this purpose an architectural model of a cognitive infocommunication system (CICS) based on the principles of domain modeling is proposed. The paper analyzes the possibilities of applying category theory and intuitionistic logic for formalized description and prediction of characteristics of biointegrated cyber-physical systems and environments

© Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У., Чернышев Г. В., 2024

with intelligent control. A method for representing the topological structure of CICS using the concept of a «presheaf» is proposed. To improve the accuracy and efficiency of modeling it is recommended to use modern tools such as homotopy type theory, theorem proving assistants, functional and logical programming languages, and discrete-event simulation models.

Keywords: bionanorobotics, soft robotics, multicells engeneering living systems, category theory, intuitionistic logic, presheaf, intelligent control, cognitive infocommunication system, cyber-physical systems and environments, design

Submitted 03.11.2024, approved after reviewing 26.11.2024, accepted for publication 03.12.2024

For citation. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Chernyshev G.V. Search for theoretical approaches to the study of cyber-physical systems and environments with intelligent control. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 26–44. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-26-44

Введение

Бионаноробототехника (БНРТ) – это раздел наноробототехники, который изучает принципы движений, закономерности функционирования и конструкцию молекулярных машин, существующих в живой природе. Цель БНРТ – использовать биологические элементы для проектирования и конструирования мехатронных систем для манипуляции нанообъектами, включая субклеточные структуры живых организмов [1–4].

БНРТ рассматривает молекулярные машины, конструкция которых основана на законах живой природы для наномасштабов (нанофазы). Основные компоненты таких машин включают белки и ДНК, которые могут действовать как двигатели, механические сочленения и шестерни, триггеры и датчики. Соединяя разнообразные биокомпоненты наноразмеров, можно построить наноустройства с определенным числом степеней свободы, которые позволяют манипулировать нанообъектами [1].

Основные проблемы и задачи БНРТ [1–4]:

1. *Исследование природных нанороботов*: изучение элементов живых клеток, которые могут служить прототипами для создания бионанороботов.

2. *Создание бионаносенсоров*: разработка устройств для исследования биосистем, включая медицинскую диагностику.

3. *Проектирование и моделирование молекулярных и наноструктур*: разработка структур, обладающих свойствами нанороботов.

4. *Проектирование бионанороботов*: создание устройств для наномедицины, исследования космоса, электроники, экологии и сельского хозяйства.

Задачи исследований в БНРТ можно представить как систему оптимизации проектирования нанотехнологий, наноустройств и наноматериалов. Это включает использование управляемого экспертной системой аппаратно-программного комплекса с обратной связью для имитации известных свойств и процессов наномира [1–5]. БНРТ открывает широкие возможности для автоматизации молекулярного производства, биоинтегрированных технологий, мягкой робототехники и многоклеточных инженерных живых систем [6–12]. Для реализации этих возможностей необходимо дальнейшее развитие и модернизация в целях достижения более высокого уровня автоматизации и интеллектуального управления.

Продолжение исследований в сфере БНРТ не только включает обработку существующих данных и результатов, но также предполагает интеграцию новых информационных массивов [7]. Данный процесс требует систематической организации и консолидации данных для последующего аналитического исследования. Для дальнейшего исследования БНРТ нужно создать методологические и технологические подходы, со-

ответствующие стандартам междисциплинарного научного поиска, для систематической организации и анализа данных.

Интеграция в науке затруднена из-за отсутствия общей системы интерпретации терминов и сложности согласования знаний между специалистами. Интеграция различных научных дисциплин сталкивается с серьезными трудностями, вызванными отсутствием единой системы интерпретации как терминов, так и критериев оценки результатов в контексте междисциплинарных исследований. Процесс формулирования комплексных исследовательских задач зачастую сопряжен с рядом проблем, таких как сложности в достижении согласованности между различными структурами знаний, необходимость учета рекурсивных связей между объектами исследования, а также вопросы коммуникации между специалистами разных областей науки. Это требует постоянного мониторинга текущих достижений и регулярного пересмотра методологических подходов, чтобы обеспечить успешное достижение поставленных целей.

Для успешной интеграции технологий и оптимизации координационных процессов необходимо обеспечение междисциплинарного взаимодействия посредством применения междисциплинарных конструктов, способствующих трансферу схем исследований между различными научными направлениями. Междисциплинарные конструкты характеризуются сложной структурой, включающей свойства замкнутости, нелинейности и цикличности, что требует применения рекурсивных, коммуникативных и структурно сопряженных методов для их адекватного функционирования. Эффективное использование таких конструктов возможно при условии разработки инструментов междисциплинарной коммуникации, таких как трансдисциплинарный метаязык [5, 13].

Весьма перспективным видится использование для этого информационных структур, характеризующихся регулярностями различного рода. В частности, возможно использовать обогащенные иерархические информационные структуры, позволяющие моделировать произвольные графовые зависимости, свойственные объектам БНРТ, и которые можно представлять в реализациях прикладных информационно-управляющих систем посредством информационного инструментария представления знаний, базирующегося на иерархических структурах, типизация которых основана на использовании теоретико-категорного подхода [14–16].

В дополнение к этому целесообразно использование так называемых помощников по доказательству теорем [17, 18] – программных систем, ориентированных на проверку корректности свойств компонент, создаваемых и используемых в теоретико-категорных рамках.

Для эффективного выполнения междисциплинарных исследований в области био- и наноинженерии требуется разработка специализированных методологических и технологических подходов, что предполагает интенсификацию междисциплинарного взаимодействия с целью интеграции знаний и методов различных научных дисциплин.

Основная часть

Теория категорий – это раздел математики, изучающий свойства отношений между математическими объектами, не зависящие от их внутренней структуры. Она была создана Саундерсом Маклейном и Самуэлем Эйленбергом. Моментом рождения теории категорий считается появление статьи [19].

Любая категория [20] содержит совокупность объектов и для каждой упорядоченной пары объектов множество морфизмов – отображений от исходного объекта к целевому объекту, а также для каждой тройки объектов – ассоциативный оператор композиции, связывающий эти объекты соответствующими морфизмами и левый и правый элементы (единичные морфизмы или единицы) для каждого объекта.

Основные свойства и определения [20, 21]:

• *Изоморфизм* – это морфизм, для которого существует обратный морфизм, сохраняющий структуру объектов.

• *Эндоморфизм* – это морфизм, действующий на один и тот же объект.

• *Автоморфизм* – это эндоморфизм, являющийся изоморфизмом.

• *Произведение объектов*: прямое произведение объектов A и B, которое является новым объектом $A \times B$ с морфизмами p_1: $A \times B \to A$ и p_2: $A \times B \to B$.

Поскольку теория категорий находится в развитии, ее функции соответственно развиваются, расширяются и умножаются. Это мощный язык или концептуальная структура, позволяющая анализировать универсальные компоненты семейства структур данного вида и то, как структуры разных видов взаимосвязаны. Ее можно применять к изучению логических систем, и в этом случае теория категорий называется «категорными доктринами» на синтаксическом, теоретико-доказательном и семантическом уровнях [21].

Теория категорий предоставляет мощный инструмент для описания и анализа сложных структур и отношений в различных областях науки. Вот несколько ключевых аспектов, подтверждающих допустимость и необходимость ее использования.

Допустимость:

1. *Абстракция и универсальность*: теория категорий оперирует типами, которые соответствуют человеческой логике, такими как базовые объекты, произведения, суммы, функциональные типы и другие. Эти типы определены универсально и однозначно с точностью до изоморфизма, что делает их применимыми в различных контекстах.

2. *Логическая основа*: категории соответствуют интуиционистской логике, что делает их логическую структуру надежной и понятной для исследователей. Это позволяет использовать теорию категорий для моделирования и анализа сложных логических систем.

3. *Гибкость и многомерность*: теория категорий позволяет описывать объекты и связи между ними в специфическом когерентном стиле, что делает ее подходящей для моделирования многомерных и иерархических структур.

Необходимость:

1. *Развитие фундаментальных понятий*: в информационных науках теория категорий может использоваться для разработки фундаментальных понятий теории информации в более широком и гибком контексте, что позволяет выражать многомерные аспекты информационных процессов.

2. *Применение в нейросетевых теориях*: операды и тензорные категории могут быть полезны для управления конфигурациями, композицией и отношениями между нейросетями, что способствует более глубокому пониманию и развитию этих технологий.

3. *Однозначное представление знаний*: категорные понятия могут быть использованы для точного и краткого выражения сути явлений без переизбыточности, что важно в теории искусственного интеллекта и других областях, где требуется однозначное и моносемантическое представление знаний.

Примеры использования:

• *Алгебраическая топология и гомологическая алгебра*: изначально теория категорий была создана для нужд этих областей, что подчеркивает ее применимость в фундаментальных математических исследованиях.

• *Теория топосов и мотивов*: Александр Гротендик перенес теорию категорий в алгебраическую геометрию, что способствовало значительному развитию этих областей.

• *Логические системы*: теория категорий позволяет моделировать и анализировать сложные логические системы, что делает ее полезной в различных областях науки.

Таким образом, теория категорий является допустимым и необходимым инструментом для научных исследований благодаря своей универсальности, логической основе и гибкости в описании сложных структур и отношений.

Ряд практических примеров использования теоретико-категорного подхода в различных прикладных областях, таких как электрические цепи, теория управления, каскадные сбои, информационная интеграция и гибридные системы, представлен в работе [22].

Наряду с этим известны также примеры работ из различных областей приложений, в которых авторы совместно с теоретико-категорным подходом используют методы интуиционистской логики [23–29].

В работах [30–32] для разработки математических методов, позволяющих строго описывать и исследовать процедуры проектирования гетерогенных киберфизических систем на основе цифровых двойников, использован аппарат теории категорий. Так, например, введенная новая конструкция категории мультизапятой, где объекты описывают архитектуры систем с заданной структурной иерархией, а морфизмы – действия по подбору составных частей, позволила формализовать и автоматизировать процедуры проектирования рассматриваемых систем, например, роботизированных производственных линий.

Но, тем не менее, использование теории категорий связано с учетом и преодолением ряда особенностей, которые препятствуют более успешному ее приложению к сложным и большим предметным областям, к которым относится и область БНРТ.

Помимо проблем, связанных с большой терминологической емкостью, недостаточным количеством значимых для прикладных аспектов аналитических средств, реализация «категорных» прототипов даже относительно простых объектов сталкивается с проблемой больших информационных затрат (при описании объектов, морфизмов, функторов, естественных преобразований и т.п.).

С целью попытки преодоления подобных проблем предлагается исследовать возможность применения многоаспектных теорий. К последним можно отнести гомотопическую теорию типов, которая основана на связи между алгебраической топологией, теорией гомотопий, теорией высших категорий и теорией типов.

В рамках теоретико-типологических исследований различные интерпретации типов обеспечивают возможность выявления как интуиционистских, так и вычислительных аспектов рассматриваемой системы. Это открывает перспективы применения теоретического анализа к изучению широкого спектра структурированных объектов, включая такие сложные конструкции, как гомотопические теории. Применение пучков для описания типов помогает понять логику в интуиционистской парадигме, которая основана на конструктивных доказательствах и вычислительных методах. Применение отношений частичной эквивалентности (partial equivalence relations) для формализации типовых структур позволяет глубже осмыслить механизмы функционирования логических систем в вычислительном контексте, что имеет особое значение в рамках теории типов и парадигмы функционального программирования.

Ключевой идеей гомотопической интерпретации является то, что логическое понятие тождества $a = b$ двух объектов $a, b: A$, одного и того же типа A можно понимать как существование пути p от точки a до точки b в пространстве A. Это также означает, что две функции $f, g: A \to B$ можно отождествить, если они гомотопны, поскольку гомотопия является просто (непрерывным) семейством путей p_x в B для любого $x: A$.

В теории категорий играет важную роль предпучок, предоставляющий мощный инструмент для исследования и анализа сложных топологических и алгебраических структур [33].

Преимущества использования предпучков:

• *Наглядность*: позволяет легко визуализировать сложные взаимосвязи между объектами и морфизмами.

• *Анализ*: помогает выявлять и анализировать скрытые структуры и зависимости.

• *Универсальность*: может применяться в различных областях математики и информатики.

Таким образом, предпучок в теории категорий – это мощный инструмент для исследования и анализа сложных топологических и алгебраических структур. Он обеспечивает наглядность и удобство в работе с абстрактными категориями и топосами.

Предпучок в контексте БНРТ представляет собой математическую конструкцию, которая описывает структуру и поведение сложных биологических и нанотехнологических систем. В своих исследованиях мы, оставаясь в пределах области определений БНРТ, представленных в [1, 2, 4, 10], и в рамках основных тезисов, описывающих модель когнитивной инфокоммуникационной системы (КИКС) БНРТ, представленных в [3, 4, 9, 11], намерены исходить из предположения о том, что исходя из [33–39] можно сформулировать основные аспекты определения предпучка для БНРТ в следующей форме:

1. *Топологическое пространство*:

- предпучок определяется на топологическом пространстве, которое может изменяться и адаптироваться в процессе функционирования системы;
- это позволяет учитывать динамические изменения в топологии и структуре системы.

2. *Структуры данных и операции*:

- предпучок включает в себя структуры данных и операции, которые стабильны относительно перестроек топологии;
- это обеспечивает устойчивость и предсказуемость системы, несмотря на изменения в ее структуре.

3. *Логическое исчисление*:

- логическое исчисление предпучка определяет способы слипания и склеивания точек пространственного континуума;
- это позволяет создавать устойчивые структуры и операции, необходимые для эффективного функционирования нанороботов и их интеграции в биологические системы.

Таким образом, предпучок в БНРТ может стать математической структурой, которая открывает возможность описывать и моделировать сложные биологические и нанотехнологические системы, обеспечивая их стабильность и предсказуемость в условиях динамических изменений.

Понятие «предпучок» в контексте КИКС в БНРТ [3, 4, 9] можно определить следующим образом:

Предпучок – это структурированный информационный процесс, который обрабатывается в доменах КИКС и содержит биологические, технологические, иные данные, интегрируемые и анализируемые для достижения целей БНРТ, обеспечивая более точные и обоснованные решения.

Структурированный информационный процесс – это организованный и упорядоченный подход к обработке информации, который включает в себя несколько ключевых этапов:

1. *Сбор информации*:

- определение источников данных;
- получение данных из различных источников.

2. *Анализ информации*:

- проверка данных на достоверность и полноту;
- выделение ключевых элементов и фактов.

3. *Систематизация информации*:

- группировка данных по определенным признакам;
- создание логических связей между группами.

4. *Хранение информации*:

- выбор и использование подходящих носителей;

- организация хранения данных для быстрого доступа.

5. *Обработка информации*:

- выполнение необходимых преобразований данных;
- применение алгоритмов и методов для анализа и интерпретации данных.

6. Передача информации:

- обмен данными между различными устройствами или людьми;
- использование соответствующих каналов связи.

7. *Представление информации*:

- визуализация данных в удобной для восприятия форме;
- использование графиков, диаграмм, таблиц и других инструментов.

8. *Использование информации*:

- принятие решений на основе обработанных данных;
- применение информации для достижения поставленных целей.

Эти этапы помогают организовать и упростить работу с информацией, что особенно важно в условиях большого объема данных и сложных задач.

Преимущества использования понятия «***предпучок***» в контексте КИКС:

1. *Интеграция данных*:

- предпучок позволит интегрировать данные из различных доменов и уровней системы, обеспечивая комплексное представление информации.

2. *Эффективность передачи данных*:

- использование предпучков позволит оптимизировать передачу данных, минимизируя потери и задержки.

3. *Интеллектуальное управление*:

- в когнитивном домене предпучки данных могут быть использованы для анализа ситуаций и принятия решений в реальном времени.

Применение понятия «***предпучок***» в контексте КИКС в БНРТ позволит эффективно интегрировать и обрабатывать информацию из различных доменов для повышения эффективности передачи данных, оптимизации управления и улучшения качества принимаемых решений.

«**Предпучок**» в контексте КИКС БНРТ представляет собой математическую структуру, которая позволяет анализировать и моделировать информационные процессы, происходящие в системе. Применение предпучка может открыть возможность описания и управления сложными взаимодействиями между различными компонентами системы, такими как биологические наноструктуры, информационные модели и интеллектуальные агенты. Использование этой структуры дает возможность эффективно моделировать и управлять взаимодействиями между различными компонентами системы, что критически важно для успешного применения нанотехнологий в медицине и экологии.

С развитием математической науки все более широким становилось применение математики в технике и соответственно в технических дисциплинах, развитие которых предъявляло все более и более высокие требования к трактовке теории множеств. В итоге это привело к появлению такого востребованного в компьютерных науках направления современной математики, как интуиционизм.

Интуиционизм был начат Л. Э. Я. Бауэром [40] и развит А. Гейтингом [41], а затем интерпретирован А. Н. Коломогоровым [42, 43] в независимое представление, ставшее основой исчисления задач Колмогорова. Впоследствии интуиционистская логика была использована А. А. Марковым для конструктивной математики [44].

В настоящее время интуиционисты создали свои логику, арифметику (теория чисел), теорию типов, теорию множеств, анализ [45].

Главные особенности интуиционизма: замена равенства эквивалентностью, слабый закон исключенного третьего (отрицание отрицания), рассмотрение в качестве объектов, основанных на умственных построениях утверждений (пропозиций) [46].

Вследствие необходимости подбора свойств в процессе прототипирования для БНРТ в интуиционизме привлекательна возможность построения в аксиоматике исчисления задач Колмогорова логических выражений и конструкций, основанных на пропозициях и с эквивалентностью вместо равенства.

Структура предметной области БНРТ может быть концептуализирована как многоуровневая когнитивная инфокоммуникационная система (КИКС) БНРТ, представляющая собой сложную сеть взаимодействий между различными уровнями организации. Данная система, разработанная нашим научным коллективом, служит платформой для выполнения широкого спектра экспериментальных исследований и симуляций поведения разнообразных типов бионаноструктур, охватывающих как природные, так и полусинтетические, а также полностью искусственно созданные системы. Помимо этого, КИКС БНРТ находит активное применение в процессе разработки как виртуальных, так и физических прототипов синтетических и полусинтетических бионанотехнологических систем и их отдельных компонентов.

Формирование базы знаний для БНРТ требует интеграции данных из разных наук, соответствующих системным представлениям БНРТ и КИКС.

«***Сигнал*** – это изменяющаяся во времени физическая величина, описываемая функцией времени. Один из параметров этой функции содержит информацию о другой физической величине. Такой параметр сигнала (функции) называют информативным, а физическую величину, которой представлен сигнал, – носителем сигнала (несущей сигнала); сигнал имеет размерность этой величины» [47].

КИКС состоит из физической, информационной и когнитивной части, где физическая часть – это энергообеспечение и технические системы переноса информации от источника к потребителю; информационная – данные, знания, методы; когнитивная производит интеллектуальную деятельность по анализу ситуаций, оценке и принятию решений, а все эти части действуют на макро-, микро- и наноуровнях [3, 4, 8].

Рассмотрим сущность «сигнала» в рамках представлений о КИКС БНРТ.

Сигнал в КИКС существует во всех процессах:

• восприятие явлений и процессов внешней среды: наблюдение за внешней средой и получение сообщений из внешней среды;

• передача информации между элементами системы и внутри ее подсистем;

• воздействие на объекты и процессы внешней среды: изменение состояния объектов внешней среды и передача сообщений во внешнюю среду.

Внешней средой по отношению, КИКС БНРТ главным образом является бионаносреда, при взаимодействии с которой выполняется процесс познавательно-целевого моделирования, позволяющий строить представления о ее структуре, закономерностях, а также производить целенаправленный поиск решений прикладных задач БНРТ [2–4].

КИКС посредством сенсоров интерфейсной подсистемы наблюдает за явлениями и процессами во внешней среде, в т.ч. воспринимая управляющие сигналы от внешних источников информации. Далее посредством телекоммуникационной и информационно-управляющих подсистем информация преобразуется в множество сигналов системы, которые передают полученные и обработанные сведения в соответствующие прикладные подсистемы [3, 4, 8].

Таким же образом информация от прикладных подсистем КИКС передается к эффекторам интерфейсной подсистемы, с помощью которой КИКС оказывает воздействие на объекты и процессы внешней среды.

Передача информации между элементами КИКС осуществляется посредством сигналов. При этом форма и содержание сигнала задаются теми процессами, которые выполняются генерирующими их подсистемами:

• интерфейсной подсистемой;

• телекоммуникационной подсистемой;

• информационно-управляющей подсистемой.

Каждая указанная подсистема также включает в себя прикладные подсистемы нижнего уровня, которые функционально аналогичны им и в которых элементы информационно связаны посредством сигналов.

Доменное разделение элементов КИКС на части выполнено по признакам и свойствам, раскрывающим их основную сущность: материальность (свойства форм материи и энергии), информационность (свойства форм представления информации), когнитивность (свойства форм преобразования информации) [3–5, 8].

Рассмотрим теперь сущность сигнала в зависимости от доменной принадлежности элементов подсистем.

Физический домен

Для передачи сигнала физически требуются:

• эффектор – физический преобразователь сообщения источника информации в воздействие на физическую среду;

• канал связи – физическая среда, в которой под действием эффектора может изменяться определенная физическая величина в пространстве или времени, сохраняющая достаточный уровень изменений для восприятия сенсором в заданном местоположении и заданный момент времени;

• сенсор – физический преобразователь изменений физической величины среды канала связи в пространстве или времени в сообщение потребителю информации.

Физическая сущность эффектора проявляется в том, что в соответствии с представлением сообщения в первичном сигнале от источника информации, поступающего на вход эффектора, выполняется преобразование/изменение форм материи и энергии физической среды, характеризуемое изменением заданной физической величины в пространстве или времени.

Физическая сущность сенсора представляет обратный процесс, заключающийся в том, что им воспринимаются изменения заданной физической величины окружающей среды или среды канала связи в пространстве или времени, преобразуемые в выходной сигнал, воспринимаемый потребителем информации. Особенностью сенсора является то, что его выходной сигнал может и не содержать сообщение от источника информации.

Физическая сущность канала связи заключается в том, что изменения физической величины среды в пространстве и времени, созданные эффектором, могут быть восприняты сенсором.

Таким образом, эффекторы, сенсоры и канал связи, с точки зрения передачи информации посредством сигналов, выступают в качестве физических преобразователей в пространстве или времени одних форм материи и энергии в другие формы материи и энергии, отражающих в изменениях физических величин содержание предаваемых сообщений.

Интерфейсная подсистема (ИП) КИКС включает в себя:

• сенсоры восприятия состояния физических величин внешней среды;

• эффекторы для физического воздействия на внешнюю среду;

• интерфейсы, включающие в себя специализированные эффекторы и сенсоры для информационного обмена с объектами внешней среды: внешними источниками и приемниками информации.

Сигналы в интерфейсной подсистеме существуют в технических устройствах сенсоров, эффекторов и интерфейсов во внутренних каналах связи между их элементами.

Телекоммуникационная подсистема (ТКП) включает в себя ресурсы сети связи, транспортную сеть, сеть коммутации, представляющие собой совокупность технических устройств прикладных подсистем узлов связи и технических устройств интерфейсов с устройствами информационно-управляющей и интерфейсной подсистем и совокупность линий каналов связи, представляющих физическую среду передачи сообщений. Сигналы в телекоммуникационной подсистеме существуют в каналах связи и внутри технических устройств прикладных подсистем узлов связи между элементами устройств.

Информационно-управляющая подсистема (ИУП) включает в себя серверы, накопители данных, носители информации, представляющие собой совокупность вычислительных устройств прикладных подсистем для приема, обработки, хранения и передачи информации. Сигналы в информационно-управляющей подсистеме существуют в каналах связи между элементами вычислительных и информационно-накопительных устройств.

Информационный домен

Сигналы подсистем верхнего уровня КИКС (интерфейсная, телекоммуникационная и информационно-управляющая подсистемы КИКС) несут информацию следующего содержания:

• сведения, получаемые от внешних источников информации;

• сведения, передаваемые внешним потребителям информации;

• сведения о состоянии физических величин внешней среды;

• сведения о заданных эффекторам параметрах воздействий на внешнюю среду;

• сведения о структуре и состоянии элементов подсистем (активность, настройка элементов и параметров связи элементов и т.п.);

• сведения для управления подсистемами (команды, параметры команд, включение/выключение элементов, настройка, изменение параметров связи элементов (схем) и т.п.);

• сведения, передаваемые потребителям информации в прикладных подсистемах и подсистемах нижнего уровня;

• сведения, передаваемые от источников информации из прикладных подсистем и подсистем нижнего уровня.

Таким образом, сигналы с входными сообщениями трансформируются/преобразуются в сигналы внутренних сообщений КИКС, которые распределяются в зависимости от своего назначения и содержания, сохраняются, повторно используются, преобразуются и передаются потребителям информации.

Когнитивный домен

Сигналы подсистем верхнего уровня КИКС несут сведения, на основании которых выполняются следующие управляющие функции анализа данных и принятия решений по управлению подсистемами КИКС:

• анализ воспринимаемых сигналов внешней среды;

• извлечение и анализ сообщений источников информации, в т.ч. пользователей;

• принятие решений и формирование сигналов управления пользовательскими подсистемами и устройствами, в т.ч. роботами;

• анализ данных, принятие решений и формирование сигналов по управлению телекоммуникационной, информационно-управляющей и интерфейсной подсистемами;

• поиск, анализ, принятие решений и формирование сигналов управления в прикладных подсистемах нижнего уровня.

Морфизмы сигнала в КИКС

Все сигналы КИКС связывают внешние источники и потребителей информации с внутренними преобразователями информации, которые в зависимости от своих свойств и принципов функционирования, законов, правил и т.п. по входным сообщениям формируют выходные сообщения и сигналы, в т.ч. направленные к внешним потребителям информации, включая эффекторы, воздействующие на внешнюю среду.

Преобразования сигналов в КИКС во всех ее подсистемах и на всех уровнях представляют собой морфизмы – стрелки.

Сигналы в КИКС распространяются по перечисленным выше подсистемам следующим образом: «сигнал из внешней среды → сигнал сенсора ИП → сигнал ТКП в ИУП → сигнал ИУП в ТКП → сигнал эффектору ИП → сигнал во внешнюю среду» (рис. 1).

При этом множество «сигналы сенсоров ИП» образовано группами «сигнал сенсора ИП» по всей КИКС.

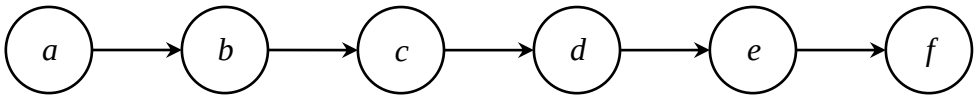


Рис. 1. *Преобразования сигналов в КИКС:*
a – сигнал из внешней среды, b – сигнал сенсора ИП, c – сигнал ТКП в ИУП,
d – сигнал ИУП в ТКП, e – сигнал эффектору ИП, f – сигнал во внешнюю среду

Fig. 1. *Signal transformations in the cognitive infocommunication system (CICS):*
a – signal from the external environment, b – signal from the sensor of interface subsystem (IS),
c – signal from the telecommunications subsystem (TCS) to information and control subsystem (ICS),
d – signal from ICS to TCS, e – signal to the effector of IS,
f – signal to the external environment

Для КИКС расслоение как топологическое пространство (рис. 2) включает топологические пространства (ТП):

- «сигналы из внешней среды»;
- «сигналы сенсоров ИП»;
- «сигналы ТКП в ИУП»;
- «сигналы ИУП в ТКП»;
- «сигналы эффектору ИП»;
- «сигналы во внешнюю среду».

Между ТП «сигналы внешней среды», «сигналы сенсоров ИП», «сигналы ТКП в ИУП» и так далее можно указать отношение, потому что их свойства коммутативны, что выражается следующим:

1) «сигнал из внешней среды» преобразуется сенсором ИП в «сигнал сенсора ИП»;

2) «сигнал сенсора ИП» преобразуется ТКП в «сигнал ТКП в ИУП»;

3) «сигнал из внешней среды» и «сигнал ТКП в ИУП» коммутативны через «сигнал сенсора ИП».

Можно построить «декартов» квадрат, в котором есть стрелки от «сигнал из внешней среды» к «сигнал сенсора ИП» и затем от «сигнал сенсора ИП» к «сигнал ТКП в ИУП», что и дает морфизм.

Теперь рассмотрим образование ТП как множества.

«Сигнал из внешней среды» образует топологическое пространство группой свойств сигналов внешней среды КИКС. Все сигналы из внешней среды КИКС обладают общими свойствами: вид физического свойства, количественная мера физического свойства, момент времени измерения, пространственное расположение точки измерения и т.д.

Каждое из этих свойств можно представить отдельной точкой, например: точка А – это вид физического свойства, точка Б – это количественная мера физического свойства и точка В – это момент времени измерения. Через три точки можно провести плоскость, которая и есть ТП «сигнал из внешней среды».

Также образованы и другие ТП КИКС: «сигнал сенсора ИП», «сигнал ТКП в ИУП» и т.д.

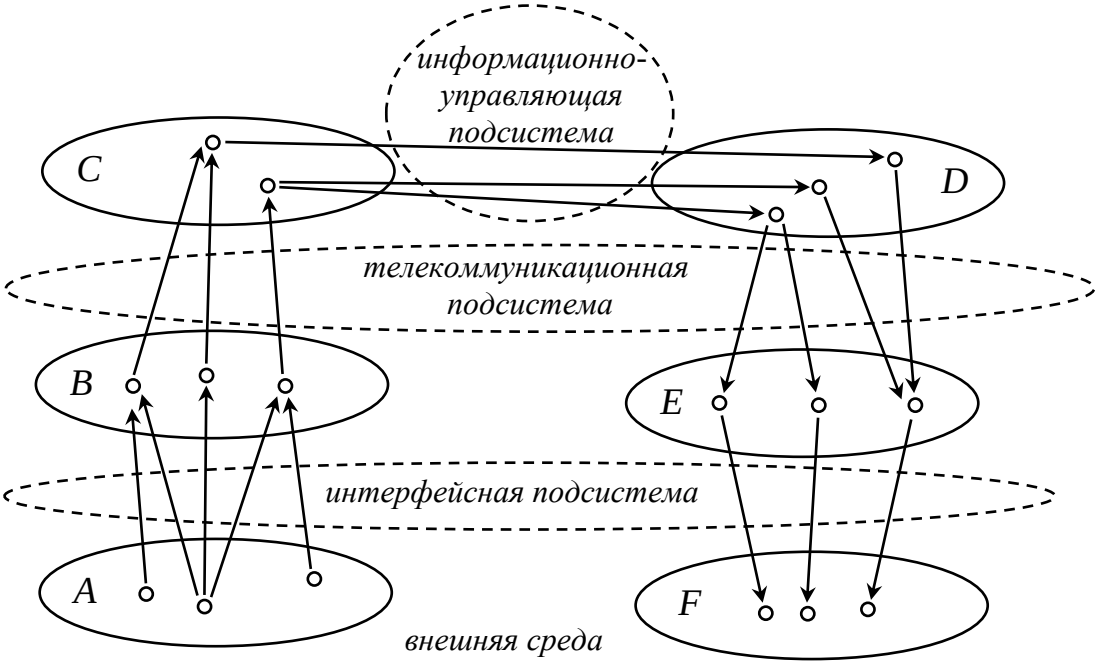


Рис. 2. *Расслоение топологического пространства КИКС:*
A – ТП сигналов из внешней среды, B – ТП сигналов сенсоров ИП,
C – ТП сигналов ТКП в ИУП, D – ТП сигналов ИУП в ТКП,
E – ТП сигналов эффекторам ИП, F – ТП сигналов во внешнюю среду

Fig. 2. *Topological space (TS) bundle of the CICS:*
A – TS of signals from the external environment, B – TS of signals from IS sensors,
C – TS of signals from TCS to ICS, D – TS of signals from ICS to TCS,
E – TS of signals to IS effectors, F – TS of signals to the external environment

Предпучок КИКС

Рассмотрим теперь морфизмы:

«сигнал из внешней среды → сигнал сенсора ИП»;

«сигнал сенсора ИП → сигнал ТКП в ИУП»;

«сигнал ТКП в ИУП → сигнал ИУП в ТКП»;

«сигнал ИУП в ТКП → сигнал эффектору ИП»;

«сигнал эффектору ИП → сигнал во внешнюю среду».

Морфизмы тоже образуют ТП «Морфизмы КИКС», отличие которых в том, что для каждого морфизма есть свое ТП. Следовательно, морфизмы соединяют все ТП расслоения КИКС таким образом, что из ТП морфизмов можно получить доступ к свойствам каждого элемента каждого ТП расслоения, что делает ТП морфизмов предпучком КИКС.

Представленное выше аксиоматическое задание морфизма описательной конструкцией допустимо для интуиционизма [41]. Р. Голдблатт в главе 4 книги по теории топосов в разделе «Пучки» определяет пучок как расслоение, обладающее дополнительной топологической структурой [36]. А. Гротендик в своей работе по теории пучков [34]

использует аналогичный подход к определению термина «предпучок» по отношению к ТП. Поэтому и мы тоже можем использовать в рамках и в пределах интуиционистской логики такое же представление о предпучке.

Выводы

Архитектура доменной области КИКС представляет собой многослойную систему, анализируемую посредством междисциплинарных методов и стандартизированной экспериментально-моделирующей платформы, что критически важно для исследования и прототипирования устройств и систем БНРТ. В связи со сложностью рассматриваемой области необходимо использовать широкий спектр имеющихся инструментальных средств, в частности, гомотопической теории типов, помощников по доказательству теорем, языков функционального и логического программирования, дискретно-событийных имитационных моделей.

Применение в исследованиях области БНРТ теоретико-категорного подхода и методов интуиционистской логики открывает возможности развития теоретических основ формализации и оптимизации биоинтегрированных киберфизических систем и сред БНРТ, предназначенных для познавательно-целевого моделирования, проектирования и физического прототипирования устройств и систем БНРТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У., Нагоев З. В.* Бионаноробототехника: концептуализация, проблематика и задачи исследований // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 6(74). С. 11–17. EDN: XRUYRN

2. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Интеррепрезентативные сети (ИРС) и репрезентативность VR визуализации наноструктур и процессов в наносреде // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 4(72). С. 5–9. EDN: WKDXXD

3. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Доменная модель когнитивной инфокоммуникационной системы для интеллектуального медицинского онлайн-сервиса на базе бионаносенсорных устройств // Славянский форум. 2018. № 1(19). С. 104–113. EDN: YWXRMT

4. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Поиск, исследование и развитие технологий бионаноробототехники для устойчивого развития горных территорий в эпоху шестого технологического уклада // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10. № 3(37). С. 447–457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457

5. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Актуальные методологические проблемы междисциплинарных исследований в области бионаноробототехники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 6(92). С. 10–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-6-92-10-20

6. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Актуальные задачи бионаноробототехники в области виртуального прототипирования бионаноустройств // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XV всероссийской научно-практической конференции и XI молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах», Нижний Архыз, 5–9 октября 2020 года. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2020. С. 193–200. EDN: HDQFSF

7. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Достижения и перспективы бионаноробототехники на современном этапе развития науки и техники. Необходимость и возможность модернизации бионаноробототехники для молекулярного биопроизводства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 7–13. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-7-13

8. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Поиск методов и исследование возможностей применения современных технологий виртуального прототипирования и конструирования биоинженерных систем при проектировании бионаноустройств и систем бионаноробототехники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 34–42. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-34-42

9. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Доменная модель когнитивной информационно-коммуникационной системы как основа среды виртуального прототипирования устройств и систем бионаноробототехники // Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация науки и образования». Нальчик, 1–4 октября 2021 года. Нальчик, 2021. С. 140–148. EDN: DTKSPA

10. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Разработка элементов технологии экспериментального прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1(105). С. 12–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24

11. *Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У.* Проблема разработки теоретических основ проектирования и прототипирования устройств и систем бионаноробототехники в киберфизических системах и средах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 28–38. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-28-38

12. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Разработка техники виртуального прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций // Материалы XVIII всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара «Перспективные системы и задачи управления», п. Домбай, Карачаево-Черкесская Республика, 3–7 апреля 2023 года. Таганрог: Лукоморье, 2023. С. 302–313

13. *Князева Е. Н.* Трансдисциплинарные стратегии исследований // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2011. № 10(112). С. 193–201. EDN: OJQDNT

14. *Чернышев Г. В.* К созданию информационных инструментальных средств поддержки представления знаний. XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 8762–8772.

15. *Чернышев Г. В.* О типизации иерархических структур данных // Междунар. науч. конф. «Дискретная математика, алгебра и их приложения». Минск, 14-18 сентября 2015 г. Минск: Институт математики НАН Беларуси, 2015. С. 139–141.

16. *Chernyshev G.* Theoretical aspects of definition for hierarchical structures types / Proceedings of International Russian-Chinese Conference “Actual Problems of Applied Mathematics and Physics”. Tegenekly village, Boarding House «Elbrus», 14–18, December 2015. Pp. 48–50.

17. Coq 8.20.0 documentation [Электронный ресурс]. URL: https://coq.inria.fr/doc/V8.20.0/refman/index.html (дата обращения: 25.09.2024)

18. *Norell U.* Towards a practical programming language based on dependent type theory // Chalmers University of Technology, 2007. 166 p. URL: https://ncatlab.org/nlab/files/Norell-PracticalDTT.pdf

19. *Eilenberg S., MacLane S.* General theory of natural equivalences // Transactions of the American Mathematical Society. 1945. Vol. 58. No. 2. Pp. 231–294.

20. *Маклейн С.* Категории для работающего математика / пер. под ред. В. А. Артамонова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 351 с. ISBN: 5-9221-0400-4

21. *Category Theory (Stanford Encyclopedia of Philosophy).* [Электронный ресурс]. URL: https://plato.stanford.edu/entries/category-theory/ (дата обращения: 25.09.2024)

22. *Fong B., Spivak D. I.* Seven sketches in compositionality: An invitation to applied category theory // arXiv. Preprint arXiv:1803.05316. 2018

23. *Васюков В. Л.* Логический плюрализм и неклассическая теория категорий // Логические исследования: ежегодник. 2012. № 18. С. 60–76. EDN: PFOEPV

24. *Родин А. В.* Теория категорий и поиски новых математических оснований физики // Вопросы философии. 2010. № 7. С. 67–81. EDN: MSXDKX

25. *Гуц А. К., Паутова Л. А.* Теория категорий в социологии: общества как объекты топоса Гротендика // Математические структуры и моделирование. 2015. № 3(35). С. 61–71. EDN: VCYIOF

26. *Сергиенко Н. А.* Теория категорий в отечественной и зарубежной науке: классический подход // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2017. № 7-1(73). С. 150–153. EDN: YQEEKV

27. *Жожикашвили А. В.* Категорная технология создания и развития интеллектуальных систем, основанных на знании // Информационные процессы. 2016. Т. 16. № 4. С. 312–332. EDN: XEIENR

28. *Игамбердиев А. У.* Логика организации живых систем. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1995. 152 с.

29. *Ковалев С. П.* Теория категорий как математическая прагматика модельно-ориентированной системной инженерии // Информатика и ее применения. 2018. Т. 12. № 1. С. 95–104. DOI: 10.14357/19922264180112. EDN: YTTRFC

30. *Ковалев С. П.* Алгебраические методы проектирования гетерогенных киберфизических систем // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 144–147. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_2_144

31. *Ковалев С. П.* Методы теории категорий в цифровом проектировании гетерогенных киберфизических систем // Информатика и ее применения. 2021. Т. 15. № 1. С. 23–29. DOI: 10.14357/19922264210104

32. *Ковалев С. П.* Проектирование гетерогенных киберфизических систем с применением теории категорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 2. С. 59–67. DOI: 10.17587/mau.23.59-67

33. *MacLane S., Moerdijk L.* Sheaves in geometry and logic: a first introduction to topos theory (Universitext). New York: Springer, 1994. 640 p.

34. *Гротендик А.* О некоторых вопросах гомологической алгебры: перевод с фр. Б. Б. Венкова / Под ред. А. Л. Онищика. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 175 с.

35. *Гротендик А.* Урожаи и посевы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 288 с.

36. *Голдблатт Р.* Топосы. Категорный анализ логики. М.: Мир, 1983. 487 с.

37. *Натанзон С. М.* Введение в пучки, расслоения и классы Черна. М.: МЦНМО, 2010. 48 с. ISBN: 978-5-94057-647-1

38. *Букур И., Деляну А.* Введение в теорию категорий и функторов. М.: Мир, 1972. 260 с.

39. *Category Theory* (Теория категорий. Конспект лекций Н. А. Вавилова и А. Ю. Лузгарева). URL: http://cadadr.org/notes/categories.pdf (дата обращения: 25.09.2024).

40. *Непейвода А. Н.* Л.Э.Я. Брауэр «недостоверность принципов логики» // Логические исследования. 2016. Т. 22. № 1. С. 171–176. EDN: WHTPCT

41. *Гейтинг А.* Интуиционизм. Введение: перевод с англ. В. А. Янкова / Под ред. и с коммент. А. А. Маркова. М.: Мир, 1965. 200 с.

42. *Колмогоров А. Н.* О принципе tertium non datur // Математический сборник. 1925. Т. 32. № 4. С. 646–667.

43. *Колмогоров А. Н.* Современные споры о природе математики // Научное слово. 1929. Вып. 6. С. 41–54.

44. *Марков А. А.* Избранные труды. Т. II. Теория алгоритмов и конструктивная математика, математическая логика, информатика и смежные вопросы. М.: МЦНМО, 2003. 626 с. ISBN: 5-94057-113-1

45. *Новоселов М. М.* К истории дискуссий об интуиционистской логике // Философия науки. 1998. Т. 4. № 1. С. 223–232. EDN: UMMKVJ

46. *Шанин Н. А.* О конструктивном понимании математических суждений // Проблемы конструктивного направления в математике: сборник работ. Тр. МИАН СССР. 1958. Т. 52. С. 226–311.

47. *Краус М., Кучбах Э., Вошни О.-Г.* Сбор данных в управляющих вычислительных системах: пер. с нем. М.: Мир, 1987. 294 с.

REFERENCES

1. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Nagoev Z.V. Bionanorobotics: conceptualization, problems and research tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 6(74). Pp. 11–17. EDN: XRUYRN. (In Russian)

2. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Interrepresentational networks (IN) and representativeness of VR visualization of nanostructures and processes in the nanoenvironment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 4(72). Pp. 5–9. EDN: WKDXXD. (In Russian)

3. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Domain model of a cognitive infocommunication system for an intelligent medical online service based on bionano-sensory devices. *Slavyanskiy forum* [Slavic Forum]. 2018. No. 1(19). Pp. 104–113. EDN: YWXRMT. (In Russian)

4. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search, research and development of bionanorobotics technologies for the sustainable development of mountain territories in the era of the sixth technological structure. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories]. 2018. Vol. 10. No. 3(37). Pp. 447–457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457. (In Russian)

5. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Actual methodological problems of interdisciplinary research in the field of bionanorobotics. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2019. No. 6(92). Pp. 10–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-6-92-10-20. (In Russian)

6. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Current problems of bionanorobotics in the field of virtual prototyping of bionanodevices. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Advanced systems and control problems]: Materialy XV vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XI molodezhnoy shkoly-seminara “Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh”, Nizhniy Arkhyz, 5–9.10.2020. Rostov-on-Don: SFU, 2020. Pp. 193–200. EDN: HDQFSF. (In Russian)

7. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Progress and prospects of bionanorobotics at present stage of development of science and technology. Necessity and opportunity of modernization of bionanorobotics for molecular biomanufacturing. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 6(98). Pp. 7–13. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-7-13. (In Russian)

8. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search for methods and study of the possibilities of using modern technologies of virtual prototyping and design of bioengineering systems in the design of bionanodevices and systems of bionanorobotics. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 6(98). Pp. 34–42. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-34-42. (In Russian)

9. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Domain model of a cognitive information and communication system as the basis for an environment for virtual prototyping of devices and bionanorobotics systems. *Tsifrovaya transformatsiya nauki i obrazovaniya*: Sbornik nauchnykh trudov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Nal'chik, 1–4.10.2021. Pp. 140–148. EDN: DTKSPA. (In Russian)

10. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. Development of elements of technology for experimental prototyping of soft polymer mechatronic structures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 1(105). Pp. 12–24. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-12-24. (In Russian)

11. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. The problem of developing theoretical foundations for the design and prototyping of bionanorobotics devices and systems in cyberphysical systems and environments. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 28–38. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-28-38. (In Russian)

12. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Development of technology for virtual prototyping of soft polymer mechatronic structures. *Materialy XVIII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the XVIII All-Russian scientific and practical conference and the XIV youth school-seminar "Advanced systems and management problems"]. Dombay, 3–7.04.2023. Taganrog: Lukomor'e, 2023. Pp. 302–313. (In Russian)

13. Knyazeva E.N. Transdisciplinary research strategies. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Tomsk State Pedagogical University Bulletin]. 2011. No. 10(112). Pp. 193–201. EDN: OJQDNT. (In Russian)

14. Chernyshev G.V. To create information tools to support knowledge representation. *XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014.* [Materials of the XII All-Russian Meeting on Management Problems] Moscow, 16–19.06.2014. Moscow: *Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN*, 2014. Pp. 8762–8772. (In Russian)

15. Chernyshev G.V. About typing hierarchical data structures. *Mezhdunar. nauch. konf. «Diskretnaya matematika, algebra i ikh prilozheniya». Minsk, 14–18 sentyabrya 2015 g.* Minsk: Institut matematiki NAN Belarusi, 2015. Pp. 139–141. (In Russian)

16. Chernyshev G. Theoretical Aspects of Definition for Hierarchical Structures Types. *Proceedings of International Russian-Chinese Conference "Actual Problems of Applied Mathematics and Physics"*. Tegenekly village, Boarding House "Elbrus", 14–18, December 2015. Pp. 48–50.

17. Coq 8.20.0 documentation. URL: https://coq.inria.fr/doc/V8.20.0/refman/index.html (date of request: 25.09.2024).

18. Norell U. Towards a practical programming language based on dependent type theory. *Chalmers University of Technology*, 2007. 166 p. URL: https://ncatlab.org/nlab/files/Norell-PracticalDTT.pdf

19. Eilenberg S., MacLane S. General theory of natural equivalences. *Transactions of the American Mathematical Society*. 1945. Vol. 58. No. 2. Pp. 231–294.

20. MacLane S. Categories for the working mathematician. Translated by B.A. Artamonova. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 351 p. ISBN: 5-9221-0400-4. (In Russian)

21. Category Theory (Stanford Encyclopedia of Philosophy). URL: https://plato.stanford.edu/entries/category-theory/ (date of request: 25.09.2024).

22. Fong B., Spivak D.I. Seven sketches in compositionality: An invitation to applied category theory. *arXiv. Preprint arXiv*:1803.05316. 2018.

23. Vasyukov V.L. Logical pluralism and non-classical category theory. *Logicheskie issledovaniya* [Logical Investigations]. 2012. No. 18. Pp. 60–76. EDN: PFOEPV. (In Russian)

24. Rodin A.V. The theory of categories and searches of the new mathematical bases of physics. *Voprosy filosofii* [Russian Studies in Philosophy]. 2010. No. 7. Pp. 67–81. EDN: MSXDKX. (In Russian)

25. Gutz A.K., Pautova L.A. Category theory in sociology: societies as objects of the Grothendieck topos. *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical structures and modeling]. 2015. No. 3(35). Pp. 61–71. EDN: VCYIOF. (In Russian)

26. Sergienko N.A. Category theory in domestic and foreign science: classical approach. *Filologicheskie nauki. Voprosy teorii i praktiki* [Philology. Theory & practice]. 2017. No. 7-1(73). Pp. 150–153. EDN: YQEEKV. (In Russian)

27. Zhozhikashvili A.V. Category technology for creating and developing intelligent systems based on knowledge. *Informatcionnye processy* [Information processes]. 2016. Vol. 16. No. 4. Pp. 312–332. EDN: XEIENR. (In Russian)

28. Igamberdiev A.U. *Logika organizatsii zhivykh sistem* [Logic of organization of living systems]. Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1995. 152 p. (In Russian)

29. Kovalyov S.P. Category theory as a mathematical pragmatics of model-based systems engineering. *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and Applications]. 2018. Vol. 12. No. 1. Pp. 95–104. DOI: 10.14357/19922264180112. (In Russian)

30. Kovalyov S.P. Algebraic means of heterogeneous cyber-physical systems design. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Technologies and Technics]. 2021. No. 2. Pp. 144–147. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_2_144. (In Russian)

31. Kovalyov S.P. Methods of the category theory in digital design of heterogeneous cyber-physical systems. *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and Applications]. 2021. Vol. 15. No. 1. Pp. 23–29. DOI 10.14357/19922264210104. (In Russian)

32. Kovalyov S.P. Design of heterogeneous cyber-physical systems employing category theory. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control]. 2022. Vol. 23. No. 2. Pp. 59–67. DOI: 10.17587/mau.23.59-67. (In Russian)

33. MacLane, S., Moerdijk L. Sheaves in geometry and logic: a first introduction to topos theory (universitext). New York: Springer, 1994. 640 p.

34. Grotendic A. *O nekotorykh voprosakh gomologicheskoy algebry* [On some questions of homological algebra]. Translated from the French by B.B. Venkov; Edited by A.L. Onishchika. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1961. 175 p. (In Russian)

35. Grotendic A. *Urozhai i posevy* [Harvests and crops]. Izhevsk: NITs "Regularnaya i khaoticheskaya dinamika", 2001. 288 p. (In Russian)

36. Goldblatt R. Toposes. *Kategornyy analiz logiki* [Categorical analysis of logic]. Moscow: Mir, 1983. 487 p. (In Russian)

37. Natanzon S.M. *Vvedeniye v puchki, rassloyeniya i klassy Cherna* [Introduction to sheaves, bundles, and Chern classes]. Moscow: MTsNMO, 2010. 48 p. ISBN: 978-5-94057-647-1. (In Russian)

38. Bukur I., Delyanu A. *Vvedeniye v teoriyu kategoriy i funktorov* [Introduction to the theory of categories and functors]. Moscow: Mir, 1972. 260 p. (In Russian)

39. Category Theory (Lectures Summary of N.A. Vavilov and A.Y. Luzgarev). URL: http://cadadr.org/notes/categories.pdf (date of request: 25.09.2024). (In Russian)

40. Nepeyvoda A.N. L.E.Ya. Brouwer "the unreliability of the principles of logic". *Logicheskie issledovaniya* [Logical Research]. 2016. Vol. 22. No. 1. Pp. 171–176. EDN: WHTPCT. (In Russian)

41. Geyting A. *Intuitsionizm. Vvedeniye* [Intuitionism. Introduction]. Transl. from Engl. In A. Yankov; Ed. by. and with comments. A. A. Markov. Moscow: Mir, 1965. 200 p. (In Russian)

42. Kolmogorov A.N. On the principle of tertium non datur. *Matematicheskiy sbornik* [Mathematical Collection]. 1925. Vol. 32. No. 4. Pp. 646–667. (In Russian)

43. Kolmogorov A.N. Modern disputes about the nature of mathematics. *Nauchnoe slovo*. 1929. No. 6. Pp. 41–54. (In Russian)

44. Markov A.A. Selected works. Vol. II. *Teoriya algoritmov i konstruktivnaya matematika, matematicheskaya logika, informatika i smezhnye voprosy* [Theory of algorithms and constructive mathematics, mathematical logic, computer science and related issues]. Moscow: MTsNMO, 2003. 626 p. ISBN: 5-94057-113-1. (In Russian)

45. Novoselov M.M. On the history of discussions about intuitionistic logic. *Filosofiya nauki* [Philosophy of Science]. 1998. Vol. 4. No. 1. Pp. 223–232. EDN: UMMKVJ. (In Russian)

46. Shanin N.A. On the constructive understanding of mathematical judgments. *Problemy konstruktivnogo napravleniya v matematike* [Proceedings of the Steklov Mathematical Institute]. 1958. Vol. 52. Pp. 226–311. (In Russian)

47. Kraus M., Kuchbach E., Voshni O.-G. *Sbor dannykh v upravlyayushchikh vychislitel'nykh sistemakh* [Data collection in control computing systems. Trans. from German]. Moscow: Mir, 1987. 294 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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Абуталипов Ренат Надельшаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. совместной лаборатории ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андроидная техника» «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

bnt_nat_2016@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0187-563X, SPIN-код: 6219-9432

Заммоев Аслан Узеирович, канд. техн. наук, зав. совместной лабораторией ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андроидная техника» «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zammoev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7966-3557, SPIN-код: 6317-3115

Чернышев Геннадий Васильевич, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. отдела автоматизации и информатизации региональных систем управления, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

henrychern@yandex.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0870-6318, SPIN-код: 4103-0163

Information about the authors

Renat N. Abutalipov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher of the Joint Laboratory Android Technology and Bionanorobotics, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

bnt_nat_2016@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0187-563X, SPIN-code: 6219-9432

Aslan U. Zammoev, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Joint Laboratory Android Technology and Bionanorobotics, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

zammoev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7966-3557, SPIN-code: 6317-3115

Gennady V. Chernyshev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher of the Department of Automation and Informatization of Regional Management Systems, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

henrychern@yandex.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0870-6318, SPIN-code: 4103-0163

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 004.932 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-45-52
EDN: CHHKEN

Генератор LUT на основе гладкой кусочно-линейной параметризированной функции

М. А. Казаков

Институт прикладной математики и автоматизации –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А

Аннотация. При визуализации рентгеновских изображений возникает задача специфического преобразования исходного изображения в соответствии с исследуемыми тканями и частями тела. Так как различные ткани имеют различный диапазон плотностей, требуемых результатов можно добиться путем расширения динамического диапазона для пикселей, значения интенсивности которых находятся в некотором диапазоне, характерном для соответствующей ткани. Такого рода преобразования для каждого пикселя изображения определяются непосредственно значением интенсивности пикселя и не зависят от значений интенсивности соседних пикселей, т.е. преобразование представляет собой функцию от одной переменной. Это позволяет использовать табличные представления функций (Lookup Tables – LUT), которые обеспечивают высокую вычислительную эффективность. Для подбора соответствующих функций преобразования требуется участие эксперта, который определит, насколько та или иная функция корректно преобразовывает изображение. В работе представлен гибкий генератор таблиц преобразования (LUT), при помощи которого можно продуцировать таблицы с различными параметрами. Приведены иллюстрации результатов преобразования. Прилагается ссылка с реализацией на языке Python, в которой предусмотрена возможность визуализации результата для того, чтобы интерактивно подбирать подходящие параметры.

Ключевые слова: Lookup Tables, рентгеновские изображения, обработка изображений, повышение контраста

Поступила 02.10.2024, одобрена после рецензирования 09.10.2024, принята к публикации 08.11.2024

Для цитирования. Казаков М. А. Генератор LUT на основе гладкой кусочно-линейной параметризированной функции // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 45–52. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-45-52

MSC: 68U10 Original article

LUT generator based on smooth piecewise linear parameterized function

M.A. Kazakov

Institute of Applied Mathematics and Automation –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street

Abstract. When visualizing X-ray images, there is a problem of specific transformation of the original image in accordance with the examined tissues and body parts. Since different tissues have different ranges of densities, the required results can be achieved by expanding the dynamic range for

© Казаков М. А., 2024

pixels whose intensity values are in a certain range characteristic of the corresponding tissue. Such transformations for each pixel of the image are determined directly by the pixel intensity value and do not depend on the intensity values of neighboring pixels, i.e. the transformation is a function of one variable. This allows using tabular representations of functions (Lookup Tables – LUTs), which ensures high computational efficiency. To select the appropriate transformation functions, the participation of an expert is required, who will determine how correctly a particular function transforms the image. The paper presents a flexible generator of lookup tables (LUTs), with the help of which it is possible to produce tables with various parameters. Illustrations of the transformation results are provided. A link with an implementation in Python is attached, which provides the ability to visualize the result in order to interactively select the appropriate parameters.

Keywords: Lookup Tables, X-ray images, image processing, contrast enhancement

Submitted 02.10.2024, approved after reviewing 09.10.2024, accepted for publication 08.11.2024

For citation. Kazakov M.A. LUT generator based on smooth piecewise linear parameterized function. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 45–52. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-45-52

Введение

Визуализация изображений с широким динамическим диапазоном становится все более востребованной в различных областях – от компьютерной графики до медицинской визуализации и цифрового искусства. Одним из ключевых методов улучшения восприятия таких изображений является использование специальных инструментов для их обработки. К таким инструментам относится генератор таблиц соответствия для работы с монохромными изображениями, который позволяет преобразовывать изображение с учетом широкого диапазона интенсивностей пикселей, обеспечивая оптимальное отображение деталей как в светлых, так и в темных участках изображения. В настоящий момент преобразование изображений является широко изученной областью, в которой разработано огромное множество техник и написано большое количество библиотек [1–5] и, в частности, в области обработки изображений в радиологии [6–9].

Таблицы преобразования (Lookup Tables или LUTs) – это таблицы соответствия, которые применяются для преобразования значений пикселей исходного изображения в новые значения. В контексте монохромных изображений с широким динамическим диапазоном LUT играет важную роль в преобразовании и оптимизации уровней яркости, что позволяет лучше адаптировать изображение для отображения на устройствах с ограниченным динамическим диапазоном. Генерация и настройка LUT для таких изображений требует понимания их физических характеристик и визуальных потребностей. Подробнее с данными вопросами можно ознакомиться в [10, 11].

В предыдущей статье [12] был предложен метод выравнивания гистограммы, который позволяет «развернуть» информативную часть гистограммы на весь динамический диапазон. Однако в рентгенографии возникает задача специфической коррекции изображения при работе с определенными тканями или частями тела. Если, к примеру, требуется исследовать твердые ткани, то целесообразно растянуть динамический диапазон для тусклых участков изображения, в то время как для мягких тканей может быть уместным растягивание динамического диапазона для среднего участка гистограммы и т.д. Для таких преобразований рационально использовать LUTs, так как функция преобразования пикселя зависит только от исходного значения пикселя.

В работе предложен алгоритм генерации LUTs для решения задачи оптимального отображения деталей. Несмотря на то, что LUTs могут быть использованы для разнообразных задач, таких как гамма-коррекция или инверсия изображения (или отдельных участков гистограммы), разработанный генератор специфичен для описанной выше задачи и содержит минимальное число параметров для более быстрого получения нужного результата.

Код с возможностью визуализации и настройки параметров функции преобразования написан на языке Python и представлен в файле формата Jupyter (с расширением `*.ipynb`) с подробной аннотацией, размещенной в репозитории, который доступен по ссылке:

https://github.com/ordevoir/PapersWithCode/tree/master/LUT_Generator

Look Up Tables

Lookup Table (LUT) представляет собой таблицу соответствий для преобразования интенсивностей пикселей. Для 16-битных изображений LUT может быть представлен в виде последовательности целых неотрицательных чисел длины 65536. Значения элементов последовательности варьируются в диапазоне $[0, 65535]$. Преобразование изображения с использованием LUT производит попиксельное изменение исходного изображения, при котором исходное значение каждого пикселя заменяется значением из таблицы: индекс элемента последовательности соответствует интенсивности пикселя в исходном изображении, а значение по индексу определяет интенсивность пикселя результирующего изображения.

Метод LUT является табличным представлением некоторой функции $f(x)$ от одной переменной. Область определения функции – $[0, 65535]$, область значения функции может содержать значения только в пределах диапазона $[0, 65535]$. Таким образом, применение LUT равносильно преобразованию каждого пикселя соответствующей функцией. Значение пикселя результирующего изображения определяется только значением пикселя исходного изображения, в отличие от ядерных фильтров, в которых результирующее значение зависит также и от значений соседних пикселей.

Применение LUT вместо функции преобразования существенно увеличивает производительность за счет сокращения вычислений. При преобразовании пикселей при помощи функции необходимо вызвать функцию для каждого пикселя изображения. Если, к примеру, требуется преобразовать изображение размером 1000×1000, то необходимо произвести вызов функции 10^6 раз. Если используется LUT для преобразования, то необходимо произвести 10^6 раз замену значения, что может быть существенно дешевле (в вычислительном плане), чем вызов функции. Для генерации LUT необходимо вызвать функцию 65536 раз и далее можно использовать ее для преобразования неограниченного числа изображений. С учетом того, что фактически рентгеновские изображения состоят из $\sim 10^7$ и более точек рост производительности за счет использования LUT вместо непосредственного вызова функций проявляется существенно.

Требования к функции

Функция в соответствии с поставленной задачей должна обладать несколькими свойствами. Так как целью является увеличение динамического диапазона определенного участка изображения, функция должна быть монотонной. Функция тождественного преобразования $f(n) = n$ всюду имеет значение производной, равное 1. Соответственно, на участках гистограммы, которые требуется растянуть, функция преобразования должна иметь производную больше 1. Если требуется сохранение динамического диапазона, то функция преобразования на границах диапазона $[0, 65535]$ должна совпадать с функцией тождественного преобразования. Функция преобразования будет неизбежно содержать участки с производной меньше 1 (если она отлична от тождественной функции), поэтому за счет расширения динамического диапазона определенного участка гистограммы неизбежно сокращение динамического диапазона для других участков гистограммы.

Таким образом, функция будет представлять собой монотонно возрастающую функцию, всюду определенную для целых чисел в диапазоне $[0, 65535]$, область значений которой не выходит за пределы диапазона $[0, 65535]$. Некоторый участок функции должен возрастать с производной больше 1. Необходимо иметь возможность задавать ширину этого участка, крутизну и расположение. При этом она должна быть гладкой и должна быть возможность регулировать плавность перехода.

Функция преобразования

В качестве такой функции будет использоваться кусочная функция, составленная из сигмоиды и линейной функции. Нас интересует поведение функции на отрезке $[0, 1]$. Область значений функции на этом отрезке не должна выходить за пределы отрезка $[0, 1]$. Если построить непрерывную функцию в этой области, удовлетворяющую обозначенным выше требованиям, то нетрудно будет получить ее дискретный вариант в диапазоне [0, 65535].

За крутой участок функции будет отвечать линейная функция:

$$g(x) = k(x - b). \tag{1}$$

Крутизна и расположение могут быть заданы при помощи параметров k и b соответственно.

За остальные участки функции будет отвечать сигмоида:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-d)}}. \tag{2}$$

Параметр α позволит управлять плавностью перехода, а параметр d – сдвигом вдоль оси абсцисс.

Для того чтобы гладко «сшить» эти функции, необходимо определить точки сигмоиды, на которых производная функции принимает значение k. Производная сигмоиды может быть выражена через саму сигмоиду:

$$\sigma'(x) = \alpha\sigma(x)\big(1 - \sigma(x)\big).$$

Решая квадратное уравнение, получаем, что $\sigma'(x) = k$ при

$$y_{1,2} = \sigma(x) = \frac{1}{2}\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4k}{\alpha}}\right). \tag{3}$$

Полученные значения y_1 и y_2 соответствуют значениям функций, при которых их нужно сшить, и являются общими как для линейной функции, так и для сигмоиды. Для того чтобы найти значения аргументов функций, при которых они принимают значения y_1 и y_2, воспользуемся обратными функциями. Обратная функция для линейной функции

$$g^{-1}(y) = \frac{y}{k} + b$$

возвращает соответствующие значения x_1 и x_2. Для нахождения значений аргументов сигмоидальной функции воспользуемся его обратной функцией (logit):

$$\sigma^{-1}(y) = d - \frac{1}{\alpha}\left(\frac{1-y}{y}\right).$$

Получаемые по y_1 и y_2 значения аргументов x_1^* и x_2^* для сигмоидальной функции в общем случае не совпадают со значениями x_1 и x_2. Поэтому для совмещения функций необходимо производить дополнительные сдвиги для правой и левой частей сигмоиды на величину $\Delta x = |x_1 - x_1^*|$.

На параметры функций накладываются некоторые ограничения: для линейной функции значение k должно быть больше 1; для заданного k значение параметра α сигмоиды должно быть не менее $4k$, иначе функция не будет иметь точек, на которых ее производная принимает значение k.

В результате получается монотонно возрастающая непрерывная гладкая функция, всюду определенная на $[0, 1]$ с областью значений в $(0, 1)$. Для получения окончательного результата функцию необходимо сложить тождественной функцией и масштабировать, чтобы область ее значений лежала в $[0, 1]$. Также нужно установить нулевое смещение, равное 0.5, чтобы параметр смещения при нуле располагал линейную часть функции в центре отрезка $[0, 1]$.

Параметры функции

Функция преобразования имеет 4 параметра, которые в коде соответствуют именованным аргументам функции: `span`, `shift`, `smoothness` и `strength`. Рассмотрим график функции (Default LUT) при значениях по умолчанию `span=.25, shift=0.0, smoothness=0.9, strength=1.0,` который изображен на диаграмме (рис. 1) сплошной синей линией (подробнее параметры будут описаны ниже). Значения параметров по умолчанию не подбирались целенаправленно для оптимизации в соответствии с конкретной целью, однако могут служить отправной точкой.

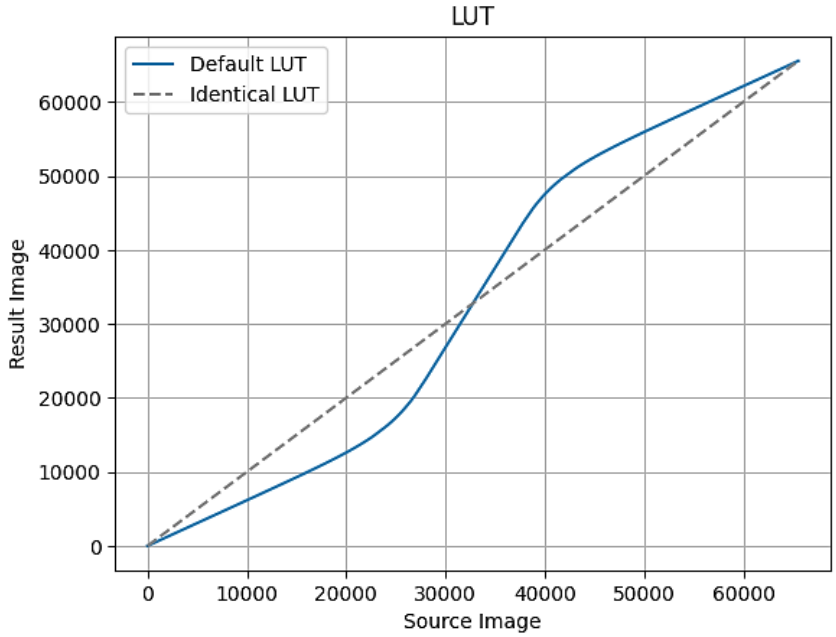


Рис. 1. *Тождественная функция и функция преобразования со значениями по умолчанию*

Fig. 1. *Identity function and transformation function with default values*

На диаграмме также изображен график тождественной функции (Identical LUT) серой пунктирной линией. Очевидно, что применение данной функции преобразования с параметрами по умолчанию произведет увеличение динамического диапазона для пикселей, лежащих в диапазоне около $[25000, 40000]$ до диапазона около $[18000, 47000]$. Такое преобразование может существенно увеличить «читаемость» мягких тканей. Конечно, увеличение данного динамического диапазона достигается уменьшением динамического диапазона остальной области значений пикселей.

Параметр `span` характеризует ширину крутого участка подъема функции. Рабочие значения меняются в диапазоне $[0.05, 0.5]$. Параметр `shift` отвечает за смещение участка подъема вдоль оси абсцисс. Рабочие значения меняются в диапазоне $[-0.5, 0.5]$. Отрицательные значения смещаются влево, положительные – вправо. Параметр `smoothness` характеризует сглаженность перехода к крутому участку функции. Рабочие значения меняются в диапазоне $[0.0, 1.0]$. Параметр `strength` характеризует, насколько сильно будет выражено преобразование. Рабочие значения меняются в диапазоне $[0.1, 10.0]$.

Приведем для наглядности пару примеров применения LUT. На рис. 2 изображен результат применения LUT, сгенерированного по значениям по умолчанию, график функции которой изображен на рис. 1. Следует отметить, что значения по умолчанию не являются оптимальными для мягких тканей, поэтому, произведя некоторую коррекцию параметров, можно получить более подходящий LUT. Рис. 2 служит, скорее, для демонстрации преобразования со стандартными параметрами.

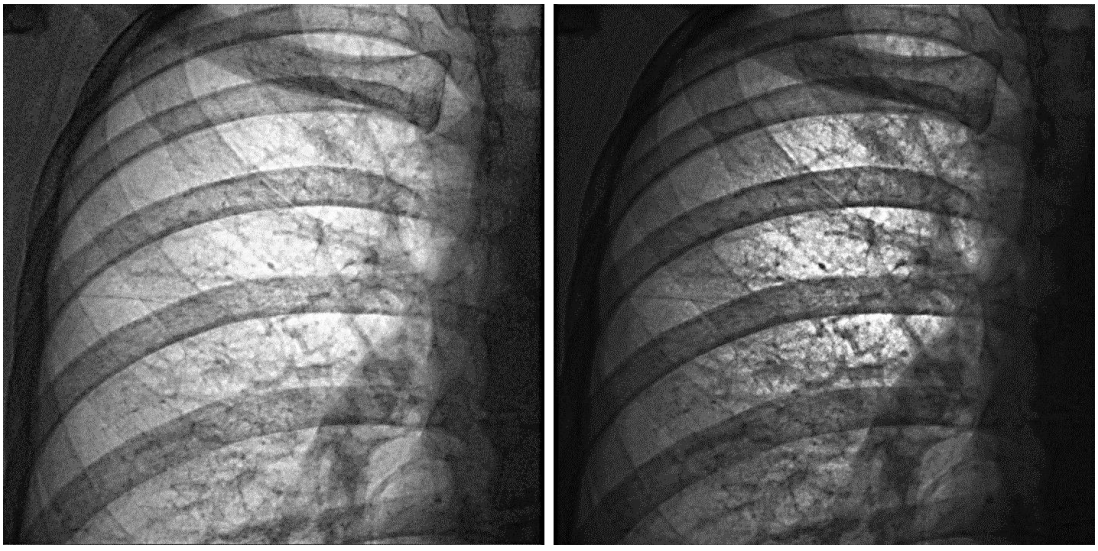


Рис. 2. *Слева – исходное изображение, справа – результат применения LUT, полученного при значениях по умолчанию*

Fig. 2. *The original image is on the left, the result of applying the LUT obtained with default values is on the right*

В качестве второго примера рассмотрим LUT, пригодный для плотных тканей, полученный функцией преобразования со следующими параметрами: `span=.4, shift=-0.35, smoothness=0.99, strength=11.5`. График функции можно видеть на рис. 3.

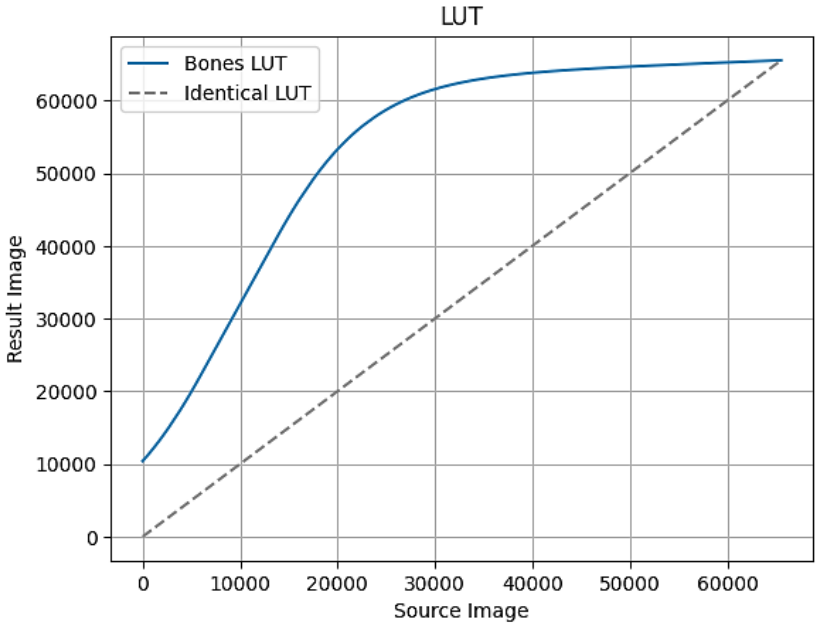


Рис 3. *Функция преобразования для плотных тканей*

Fig. 3. *Transformation function for dense tissues*

На рис. 4 можно видеть результат применения данного LUT. Можно заметить, что в результате такого преобразования существенно увеличивается «читаемость» костей.

Подбор параметров зависит от распределения плотности исследуемых тканей. Чем плотнее ткань, тем больше будет абсолютное значение `shift` (положительное для негатива). Если плотность ткани варьирует в небольшом диапазоне, то и значение `span` следует ограничить. Следует, однако, подчеркнуть, что для установки оптимальных значений требуется оценка эксперта.

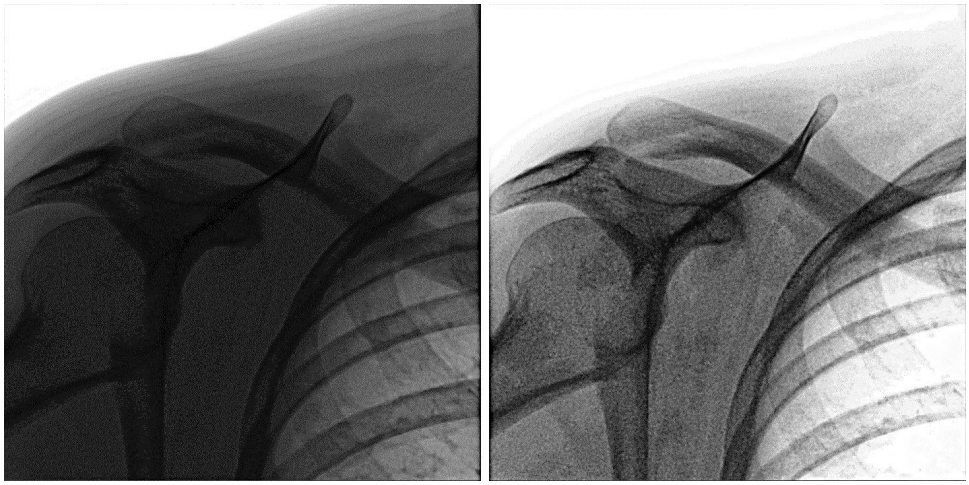


Рис. 4. *Слева – исходное изображение, справа – результат применения LUT для плотных тканей*

Fig. 4. *Left – original image, right – result of applying LUT for dense tissues*

Композиция функций преобразования

Так как функция преобразования не выходит за пределы области определения функции, можно построить функции с различными параметрами путем композиции функций. Следует, однако, иметь в виду, что операция композиции пары функций f и g не является коммутативной ($f \circ g \neq g \circ f$).

Гибкость генерации LUT может быть увеличена также путем композиции с другими функциями, например, с функцией гамма-коррекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Russo P. Handbook of X-ray imaging: physics and technology. CRC Press, 2018. 1419 p.
2. Garrido G., Joshi P. OpenCV 3.x with Python by example. Packt Publishing, 2018. 268 p.
3. Jain A.K. Fundamentals of digital image processing. 1st edition, England: Pearson, 1989. 569 p.
4. Woods R.E., Gonzalez R.C. Digital Image Processing. England: Pearson, 2021. 1022 p.
5. Gonzalez R.C. Digital image processing. Pearson education India, 2009.
6. Yoon D.C. et al. Digital radiographic image processing and analysis. *Dental Clinics*. 2018. Vol. 62. No. 3. Pp. 341–359. DOI: 10.1016/j.cden.2018.03.001
7. Freedman M.T., Artz D.S. Image processing in digital radiography. Seminars in roentgenology. *WB Saunders*. 1997. Vol. 32. No. 1. Pp. 25–37. DOI: 10.1016/s0037-198x(97)80033-8
8. Carroll Q.B. Digital Radiography in Practice. Charles C Thomas Publisher, 2023.
9. Naidu S., Quadros A., Natekar A. et al. Enhancement of X-ray images using various Image Processing Approaches. *International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI)*. Tashkent, 2021. Pp. 115–120. DOI: 10.1109/ICTAI53825.2021.9673317
10. Modi J. Look Up Tables in Radiography: Why Are They Useful? CE4RT.com, 1 Apr. 2023. https://ce4rt.com/rad-tech-talk/look-up-tables-in-radiography-what-are-they/
11. Jo Y., Kim S.J. Practical single-image super-resolution using look-up table. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2021. Pp. 691–700.
12. *Казаков М. А.* Комбинированный метод выравнивания гистограммы изображений с высоким динамическим диапазоном // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6 (116). С. 160–166. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-160-166

Kazakov M.A. A combined method for histogram equalization of high dynamic range images. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2023. No. 6. Pp. 160–166. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-160-166. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Казаков Мухамед Анатольевич, мл. науч. сотр. отдела нейроинформатики и машинного обучения, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;

kasakow.muchamed@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5112-5079, SPIN-код: 6983-1220

Information about the author

Mukhamed A. Kazakov, Junior Researcher of the Department of Neuroinformatics and Machine Learning, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;

kasakow.muchamed@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5112-5079, SPIN-code: 6983-1220

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.5:656.11 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-53-66
EDN: COOLMH

Разработка сервиса роботизированных парковок «умного» города для оптимизации использования парковочных мест в условиях их недостатка

М. А. Канокова[✉1], А. У. Заммоев[1, 2]

[1]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2
[2]Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. На современном этапе развития городской среды очень остро стоит проблема нехватки парковочных мест. В данной работе рассматриваются основные причины возникновения этой проблемы, а также предлагаются возможные пути ее решения. В частности, рассматриваются существующие методы организации парковочного пространства, такие как строительство многоярусных парковок, использование альтернативных видов транспорта (например, подземных или на крышах зданий), а также внедрение интеллектуальных систем управления парковками. Описаны архитектура, структурная схема программно-аппаратной реализации и варианты применения разрабатываемого сервиса роботизированных парковок «умного» города для оптимизации использования парковочных мест. Особое внимание уделяется вопросам оптимизации использования существующего пространства, разработки новых подходов к планированию городской инфраструктуры и учета потребностей различных категорий населения.

Ключевые слова: роботизированное устройство, роботизированные парковки, концепция сервиса, управление парковками, оптимизация парковочного пространства

Поступила 11.11.2024, одобрена после рецензирования 18.11.2024, принята к публикации 29.11.2024

Для цитирования. Канокова М. А., Заммоев А. У. Разработка сервиса роботизированных парковок «умного» города для оптимизации использования парковочных мест в условиях их недостатка // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 53–66. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-53-66

MSC: 68T40 Original article

Development of a smart city robotic parking service to optimize the use of parking spaces in conditions of their shortage

M.A. Kanokova[✉1], A.U. Zammoev[1, 2]

[1]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street
[2]Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Abstract. Current stage of urban environment development sees the lack of parking spaces. This paper analyses main causes of this problem and suggests possible solutions. In particular, the existing methods to organize parking space are considered, such as the construction of multistorey parking lots, the use of

© Канокова М. А., Заммоев А. У., 2024

alternative modes of transport (for example, underground or on the roofs of buildings), as well as the introduction of intelligent parking management systems. The architecture, structural scheme of hardware and software implementation and application options of the developed service of robotic parking of the "smart" city for optimizing the use of parking spaces are described. Special attention is paid to the issues of optimizing the use of existing space, developing new approaches to urban infrastructure planning and taking into account the needs of different population categories.

Keywords: robotic device, robotic parking, service concept, parking management, parking space optimization

Submitted 11.11.2024, approved after reviewing 18.11.2024, accepted for publication 29.11.2024

For citation. Kanokova M.A., Zammoev A.U. Development of a smart city robotic parking service to optimize the use of parking spaces in conditions of their shortage. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 53–66. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-53-66

Введение

Актуальность работы состоит в том, что в современном мире проблема недостатка парковочных мест становится все более масштабной и требует комплексного подхода к решению. Усугубляется она в связи с ростом числа автомобилей, увеличением плотности населения и развитием городской инфраструктуры, приводя к еще большей нехватке парковочных мест, что вызывает ряд проблем и неудобств для жителей и гостей города. Предлагаемая нами разработка могла бы решить часть этих проблем и повысить уровень комфорта граждан. Также данная работа представляет интерес для специалистов в области градостроительства, городского планирования и управления транспортными системами, а также для всех, кто интересуется проблемами развития городской среды.

Одним из главных факторов комфортного проживания в городе является уровень развития транспортной инфраструктуры. Город постоянно развивается, увеличивается количество заселенных районов и многоквартирных домов. Урбанизация ведет к увеличению количества приобретаемых автомобилей, а рост количества парковочных мест не соответствует требуемой для комфортного проживания в городской среде норме. В связи с этим возникает ряд проблем, связанных с отсутствием парковочных мест, например, неправильная парковка в местах, не являющихся парковочной зоной (на газонах, тротуарах, перекрестках, около бордюров на шоссе и т.п.) [1]. Если посмотреть во дворы многоквартирных домов, можно заметить, что около 80 % дворовой территории занято автомобилями, что затрудняет проезд машин «скорой помощи» или МЧС. Причинами подобных проблем являются постоянный рост количества автомобилей, увеличение плотности населения и неэффективное использование городского пространства. Крупные города страдают больше всего. При проведении сравнительного анализа было выявлено, что в Москве всего 10 % земли приходится на хранение транспорта. В США эта цифра составляет 20 %, в европейских городах – 15 % [2]. На данный момент, согласно отчету, подготовленному экспертами агентства «АВТОСТАТ», уровень автомобилизации в России составляет в среднем 322 легковых автомобиля на 1 тыс. человек (на 01.01.2024 г.). Парк легковых автомобилей в России на первое января 2024 года составлял 44 099 620 авто (рис. 1, 2). Если говорить о динамике, продажи новых легковых автомобилей в России в 2024 году выросли на 60 %. На сентябрь 2024 года в России было продано 1 154 778 автомобилей[1].

[1]Структура и прогноз парка легковых автомобилей в России. Отчет агентства «АВТОСТАТ» на 01.01.2024

Кроме того, общий рост городского населения, связанный с развитием городской инфраструктуры, строительством новых жилых комплексов и коммерческих объектов, приводит к росту потребности в парковочных местах, особенно в центре города и в районах с высокой плотностью населения. При этом строительные нормы и требования СНиПов не сопоставляют количество комнат или квадратуру одной квартиры и количество парковочных мест, которые должны приходиться на данную квадратуру. Например, в доме бизнес-класса на одну квартиру приходится 2 парковочных машино-места, а на одну квартиру в доме эконом-класса 1 парковочное место, нормы не обязывают застройщиков учитывать, что в квартире площадью 100 кв. м могут жить, например, 5 человек и как минимум у 3 членов семьи есть автотранспорт[2].

Недостаток парковочных мест также связан с неэффективным использованием городского пространства. Во многих городских районах узкие улицы и ограниченное пространство для строительства парковок. Это затрудняет создание новых парковочных мест и приводит к их нехватке. При этом можно отметить, что парковочные места в избыточном количестве чаще всего можно встретить на территории бизнес-центров и иных коммерческих организаций. Исследования ученых факультета автоматизации технологического университета Гуанчжоу предлагают сдавать в аренду парковочные места бизнес-центров и иных коммерческих организаций. Право собственности на частные парковочные места в коммерческом здании обычно принадлежит нескольким компаниям или бизнесменам. Поскольку эти частные парковки не требуются в течение всего дня, их можно сдавать в аренду. Они предложили модель парковки, в которой все данные о времени и требованиях отдельного парковочного места отправляются на центральную операционную платформу. Для вычисления цены аренды все требования к парковкам и время сдачи сопоставляются друг с другом [3].

Недостаток парковочных мест приводит к ряду проблем транспортной системы города. В первую очередь отсутствие парковок становится причиной затруднения движения на дорогах. Автомобили, ищущие свободные места для парковки, нередко становятся причиной пробок и заторов, особенно в часы максимальной загруженности дорог общего пользования. Из-за пробок и заторов, вызванных нехваткой парковочных мест, ухудшается экологическая ситуация в городе. Выбросы вредных веществ от автомобилей увеличивают загрязнение воздуха, что негативно сказывается на здоровье жителей. Нехватка парковочных мест также снижает качество жизни жителей города. Люди вынуждены искать свободные места для парковки в отдаленных районах, что занимает больше времени и усилий. Это может вызывать стресс и раздражение у водителей.

Проблема нехватки парковочных мест является актуальной для многих городов различных стран мира. Для ее решения необходимо строить новые парковки, оптимизировать использование существующих и внедрять систему управления парковками. При этом в различных странах используется несколько подходов к решению этой проблемы [4, 5].

Одним из решений может быть оптимизация использования парковочных мест, в том числе и за счет использования цифровых сервисов. Например, можно использовать системы управления парковками, которые позволяют отслеживать свободные места и направлять водителей к ним. Развитие общественного транспорта может снизить потребность в личных автомобилях и, соответственно, в парковочных местах. Создание многоуровневых парковок позволит разместить больше автомобилей на ограниченной площади [6]. Введение платы за парковку может стимулировать водителей искать альтернативные способы пе-

[2]СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* (с изменениями № 1, 2)

редвижения. Строительство подземных парковок под зданиями или дорогами позволяет использовать пространство более эффективно. Оптимизация дорожной инфраструктуры может помочь уменьшить количество пробок и, следовательно, потребность в парковочных местах [7]. Сотрудничество с бизнесом, которое может внести свой вклад в решение проблемы нехватки парковочных мест, например, предоставление своих территорий для строительства парковок или организация совместных проектов с городскими властями. Разработка новых подходов к организации движения, таких как «умные» города, включающие в себя элементы ИИ и Интернет вещей, поможет более эффективно использовать парковочные места [8].

Целью данной работы является разработка сервиса интеллектуального управления роботизированными парковочными местами «СитиМультиБот» и описание основных вариантов использования данного сервиса на основе исследования проблем, связанных с недостатком парковочных мест.

В работе используются экспертно-аналитический метод и методы синтеза информационно-управляющих систем.

Варианты оптимизации работы парковок

Одним из возможных путей решения проблемы является строительство новых парковок. Новые парковки могут быть созданы в районах с высоким спросом на парковочные места, таких как центр города и районы с высокой плотностью населения. Расширение парковочной зоны или изменение требований к парковке, как видим из опыта других стран, не являются достаточно эффективными мерами, способными решить проблемы с парковками, т.к. это повышает трафик, и город окончательно забивается автомобилями [9].

Оптимизация использования существующих парковок также может помочь решить проблему нехватки парковочных мест. Например, можно использовать многоуровневые парковки или подземные парковки, чтобы увеличить количество доступных мест.

Внедрение системы управления парковками позволяет оптимизировать использование парковочных мест и снизить нагрузку на дороги. Система управления парковками дает возможность отслеживать свободные места и предоставлять информацию водителям о доступных местах для парковки. Расширение системы управления парковками элементами ИИ добавляет новые функциональные возможности для анализа индивидуальных потребностей горожан и рекомендаций им мест и времени парковки, близких к оптимальным [10–13].

Концепция автоматизированного сервиса роботизированных парковок

В связи с необходимостью внедрения системы управления парковками учеными КБНЦ РАН начата разработка сервиса управления роботизированными парковочными местами «умного» города «СитиМультиБот». Сервис представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из программного комплекса мониторинга и управления парковками в городе, которой связан с сетью роботизированных устройств для управления парковочным местом. Архитектура работы сервиса приведена на рис. 1.

Для обеспечения управления парковочными местами на каждое из них устанавливается робот-парковщик, представляющий собой роботизированное устройство для блокировки парковочного места. При этом каждое роботизированное устройство связано с общим сервером управления «умной» парковкой. В случае, если водитель автомобиля планирует припарковаться на определенной парковке, система управления позволяет ему просмотреть количество свободных мест, забронировать парковочное место, обеспечивает разблокировку места и отвечает за расчет и сбор оплаты. Все собранные данные хранятся и

обрабатываются на сервере и позволяют администратору парковки контролировать оборачиваемость парковочных мест. Обмен данными между роботами, сервером и пользователями обеспечивается за счет беспроводной связи. Управление осуществляется за счет использования приложений для смартфона или веб-интерфейса.

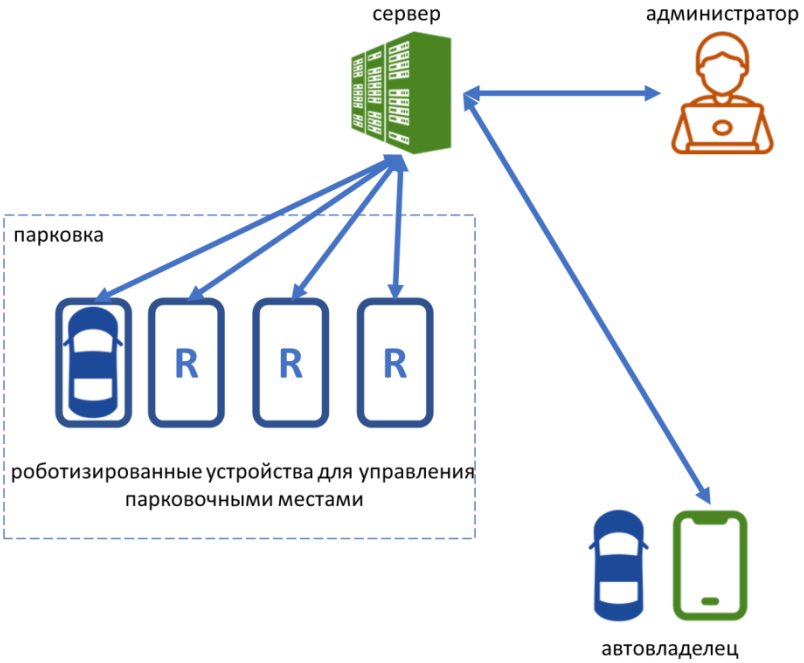


Рис. 1. *Архитектура работы сервиса «СитиМультиБот»*

Fig. 1. *Architecture of the CityMultiBot service*

Роботизированное устройство для управления парковочным местом представляет собой переносной блок, который может заблокировать парковочное место за счет раскрытия стрел. Внешний вид робота-парковщика приведен на рисунке 2 (в закрытом и раскрытом состоянии). В закрытом состоянии робот-парковщик помещается под автомобилем и не препятствует парковке.

Рис. 2. *Внешний вид роботизированного модуля управления парковочным местом*

Fig. 2. *Appearance of the robotic module of parking space control*

На роботизированном устройстве расположен привод с актуатором, который позволяет разворачивать и сворачивать робота-парковщика и боковые стрелы. Для управления роботом-парковщиком используется микроконтроллер, который обеспечивает сбор данных с установленных сенсоров (датчик наличия автомобиля над роботизированным устройством, датчик, отслеживающий попытку взлома или перемещения робота-парковщика) и управление эффекторами роботизированного устройства (привод стрел, светодиодная индикация состояния и звуковая сигнализация), в том числе в автоматическом режиме независимо от связи с сервером по неотложным событиям (поднятие барьера при отъезде автомобиля, сигнализация при актах вандализма или попытках переместить робота-парковщика). В различных конфигурациях роботизированного устройства используются WiFi или 3G-модемы для обеспечения связи с сервером. Кроме того, для удобства автомобилистов реализована функция автоматического поднятия и блокировки парковочного места после отъезда автомобиля. Для защиты от актов вандализма и кражи на роботизированном устройстве реализовано автоматическое срабатывание сигнализации. Для обеспечения питания роботизированного устройства используется легко заменяемый аккумулятор. Схема реализации робота-парковщика приведена на рис. 3.

Рис. 3. *Схема реализации робота-парковщика*

Fig. 3. *Scheme of the implementation of the parking robot*

Программная часть сервиса реализована в виде клиент-серверного приложения. В качестве клиентов на ней выступают программа микроконтроллера роботизированного устройства, приложение для администратора парковки и приложение для водителя. Роботизированное устройство отвечает за сбор и отправку данных на сервер, а также выпол-

нение его команд (за исключением особых случаев, например, при наличии автомобиля над роботом-парковщиком – он не может подняться). Приложение администратора позволяет управлять парковкой, в частности, добавлять и удалять парковки, роботов-парковщиков и пользователей, а также устанавливать режим работы парковки. Кроме того, приложение позволяет контролировать сбор оплаты и метод расчета цены парковочного места (в том числе и автоматически, с учетом текущей и прогнозируемой загрузки парковки). Также администратор может отслеживать статистику и прогноз по состоянию и загрузке парковки. Приложение водителя должно обеспечить основной функционал – просмотр наличия свободных мест, бронирование, управление роботизированным устройством и оплату услуг парковки. Сервер отвечает за сбор, анализ и управление всеми парковками, а также хранение собранной информации в базе данных. Архитектура программной реализации сервиса приведена на рис. 4.

Рис. 4. *Архитектура программной реализации сервиса*

Fig. 4. *Architecture of the software implementation of the service*

На данном этапе разработан прототип сервиса роботизированных парковок «умного» города «СитиМультиБот» и ведется тестирование функционала роботизированного узла управления парковочным местом. Кроме того, на основе анализа требований потребителей определены основные варианты использования.

Основные варианты пользования сервисом роботизированных парковок «умного» города «СитиМультиБот»

1. Базовый вариант сервиса – предусматривает управление с помощью радиопульта и базового варианта приложения, наличие GPS-датчика (табл. 1).

Таблица 1. Варианты пользования базовым вариантом сервиса

Table 1. Options for using the basic version of the service

Базовый вариант сервиса	**Управление с помощью базового варианта приложения**	**Управление с помощью радиопульта**	**Один из способов защиты от кражи**	**Один из способов обеспечения безопасного пользования сервисом**	**Способы оповещения владельца парковки о неисправности сервиса**
Акторы	Владелец автомобиля, робот-парковщик	Владелец парковки, робот-парковщик		Владелец автомобиля, робот-парковщик	
Описание	Парковка автомобиля на заданном машино-месте с использованием кнопки в приложении	Открытие/ блокировка машино-места с использованием радио-пульта	Определение местоположения роботизированного устройства в случае кражи	Отсутствие возможности поднять робота-парковщика, если над ним расположен автомобиль	Оповещение о неисправности, низком заряде аккумулятора, отключении робота-парковщика
Предусловие	Наличие гаджета с установленным приложением, наличие Wi-fi				
Шаги использования	1. Автомобилист подъезжает к парковке. 2. Автомобилист сам находит свободное место/подъезжает к своему парковочному месту. 4. Автомобилист припарковывает автомобиль. 3. Автомобилист через приложение складывает робота-парковщика 6. Робот-парковщик поднимается и блокирует парковочное место. 5. Автомобилист отъезжает от парковочного места	1. Владелец парковки подъезжает к парковке. 2. Владелец парковки выбирает конкретное парковочное место. 3. Владелец парковки с помощью радиопульта складывает/поднимает робота-парковщика.	1. В случае, если робота-парковщика унесли на 20 метров, если произошло воздействие на робота-парковщика (сдвинули или толкнули), если робота-парковщика унесли за пределы зоны wi-fi, владельцу парковки приходит уведомление на панель администратора и смс на телефон о данном событии, а также срабатывает сигнализация. Опционально можно установить sim-карту для получения координат местоположения робота-парковщика в случае, если робота унесли за пределы зоны wi-fi. 2. Владелец парковки открывает уведомление/сообщение о событии. 3. Владелец парковки копирует указанные в уведомлении/в сообщении координаты/нажимает ссылку в уведомлении/сообщении. 4. Владелец парковки открывает поисково-информационную картографическую службу и вбивает в поиск скопированные координаты. 5. Владелец парковки получает примерные координаты местоположения робота-парковщика	1. Сервис при попытке поднять робота-парковщика не реагирует на нажатие кнопки и выводит на экран сообщение, что место занято (если место занято автомобилем, значок опустить парковщика должен гореть отличительным цветом) 2. Сервис показывает с помощью окрашивания определенным цветом значка робота-парковщика, что место занято	1. При наличии неисправности владельцу парковки приходит уведомление на гаджет и на почту о поломке. 2. При низком заряде аккумулятора владельцу парковки приходит уведомление на гаджет и на почту об уровне заряда аккумулятора и о возможном ухудшении работы робота-парковщика. 3. При отключении робота-парковщика владельцу парковки приходит уведомление на гаджет и на почту о том, что робот-парковщик отключен
Результат	Автомобиль удачно припаркован Автомобиль удачно отъехал и освободил парковочное место	Машино-место удачно открыто/заблокировано с помощью радиопульта	Владелец парковки получил уведомление о событии. Сработала сигнализация	Не удалось поднять робота-парковщика в случае нахождения над ним какого-либо объекта. При открытии приложения у пользователя есть понимание, что на данном парковочном месте поднять робота-парковщика нельзя.	В ситуации неисправности, при низком заряде аккумулятора и отключении робота-парковщика на гаджет и на почту пришло уведомление о событии

2. Продвинутый вариант сервиса – предусматривает управление через приложение с возможностью бронирования парковочного машино-места. Вариант использования для автомобилистов и сотрудников муниципалитета на бесплатных парковках (табл. 2).

Таблица 2. Варианты пользования для автомобилистов и сотрудников муниципалитета на бесплатных парковках

Table 2. Options for use for drivers and municipal employees in free parking lots

Продвинутый вариант сервиса для бесплатных парковок	**Бронирование парковочного места с предупреждением пользователя о правилах конкретной парковки**	**Получение и визуализация статистической информации по оборачиваемости парковочных мест для муниципалитетов**	**Получение и визуализация статистической информации по продолжительности парковочных сессий для муниципалитетов**	**Получение и визуализация статистической информации по количеству штрафов и сумм по ним**
Акторы	Владелец автомобиля, сервис	Сотрудник муниципалитета, приложение		
Описание	Предупредить о нарушении правил парковки и при неосвобождении парковочного места начислить штраф	Получить данные по оборачиваемости парковочных мест	Получить данные о продолжительности парковочных сессий	Получить данные по количеству штрафов и сумм по ним
Предусловие	Наличие гаджета с установленным приложением, наличие Wi-fi			
Шаги использования	1. Автомобилист открывает приложение и регистрируется. 2. Автомобилист задает адрес желаемой парковки. 3. Сервис демонстрирует сеть роботов-парковщиков рядом с выбранной локацией. 4. Автомобилист находит через приложение свободное место. 5. Автомобилист бронирует свободное место - необходимо задать время начала парковочной сессии. 6. Автомобилист подъезжает к парковке. 7. Автомобилист складывает робота-парковщика нажатием кнопки в приложении. 8. Автомобилист припарковывает автомобиль. 9. До истечения времени, отведенного на бесплатную парковку, автомобилисту приходит уведомление о необходимости освободить парковочное место, в противном случае будет начислен штраф. 10. Автомобилист освобождает парковочное место по истечению времени, отведенного на бесплатную парковку. 11. Сервис в случае неосвобождения начисляет штраф в зависимости от превышения времени, отведенного на бесплатную парковку. 12. Робот-парковщик поднимается и блокирует парковочное место	1. Сотрудник муниципалитета открывает приложение и регистрируется. 2. Сотрудник муниципалитета задает адрес желаемой парковки/выбирает на карте. 3. Сотрудник муниципалитета нажатием выбирает парковку. 4. Сервис на боковой панели показывает среднее значение по оборачиваемости парковочных мест за текущие сутки. 5. После того, как сотрудник муниципалитета нажимает на данное значение, открывается график, на котором одна шкала показывает время, а другая количество парковочных сессий. 6. Сбоку данного графика сотрудник муниципалитета может выбрать кнопку «задать диапазон» и тем самым вывести среднее значение оборачиваемости парковочных мест за желаемый период времени. 7. Сотрудник муниципалитета имеет возможность выбрать иконку отдельного парковочного места и нажать на нее 8. Сервис выводит на экран информацию о количестве автомобилей, припарковавшихся на данном парковочном месте за текущие сутки. 9. Сотрудник муниципалитета имеет возможность задать определенное время и получить данные по оборачиваемости отдельного парковочного места	1. Сотрудник муниципалитета открывает приложение и регистрируется. 2. Сотрудник муниципалитета задает адрес желаемой парковки. 3. Сотрудник муниципалитета нажатием выбирает парковку. 4. Сервис на боковой панели показывает среднее время парковочных сессий. 5. После того, как сотрудник муниципалитета нажимает на данное значение, открывается график, на котором одна шкала показывает определенное время в сутках, а другая среднее время парковочных сессий. 6. Сотрудник муниципалитета имеет возможность сбоку данного графика выбрать кнопку «задать диапазон» и тем самым вывести среднее время парковочных сессий за желаемый период времени. 7. Сотрудник муниципалитета имеет возможность выбрать определенное парковочное место и нажать на него. 8. Сервис показывает среднее время парковочных сессий на данном парковочном месте. 9. Также сотрудник муниципалитета имеет возможность указать определенный промежуток времени и получить данные о парковочной сессии за конкретный период	1. Сотрудник муниципалитета открывает приложение и регистрируется. 2. Сотрудник муниципалитета задает адрес желаемой парковки. 3. Сотрудник муниципалитета нажатием выбирает парковку. 4. Сервис на боковой панели показывает количество штрафов за текущие сутки и назначенные суммы по ним, а также среднее значение времени превышения выделенных на бесплатную парковку минут. 5. После того, как сотрудник муниципалитета нажимает на данное значение, открывается трехосевой график с тремя переменными, на котором одна шкала показывает время, другая – время превышения выделенных на бесплатную парковку минут, третья – назначенные суммы по штрафам. 6. Сотрудник муниципалитета имеет возможность сбоку данного графика выбрать кнопку «задать диапазон» и тем самым вывести на экран количество штрафов за желаемый период времени, назначенные суммы по штрафам и среднее время превышения выделенных на бесплатную парковку минут. 7. Сотрудник муниципалитета имеет возможность выбрать отдельное парковочное место и нажать на него. 8. Сервис выводит на экран информацию о количестве автомобилей, припарковавшихся на данном парковочном месте за текущие сутки, количество штрафов и сумм по ним, среднее время превышения выделенных на бесплатную парковку минут. 9. Сотрудник муниципалитета имеет возможность задать определенное время и получить данные по количеству штрафов и сумм по ним отдельного парковочного места в заданное время и среднее время превышения выделенных на бесплатную парковку минут
Результат	Бесплатная парковочная сессия прошла удачно: либо парковочное место было освобождено вовремя, либо был начислен штраф. До начисления штрафа автомобилист получил уведомление	Получены достоверные данные по оборачиваемости парковочных мест с разной степенью конкретики	Получены достоверные данные по времени парковочных сессий с разной степенью конкретики	Получены достоверные данные по количеству штрафов, сумм по ним, а также среднее время превышения выделенных на бесплатную парковку минут с разной степенью конкретики

3. Продвинутый вариант сервиса – предусматривает управление через приложение с возможностью бронирования парковочного машино-места. Вариант использования для автомобилистов и сотрудников муниципалитета на платных парковках (табл. 3).

Таблица 3. Варианты использования продвинутого сервиса для автомобилистов и сотрудников муниципалитета на платных парковках

Table 3. Options for using the advanced service for drivers and municipal employees in paid parking lots

Продвинутый вариант сервиса для платных парковок	**Бронирование парковочного места**	**Использование листа ожидания**	**Получение и визуализация статистической информации по оборачиваемости парковочных мест и доход по ним для муниципалитетов**
Акторы	Владелец автомобиля, сервис		Сотрудник муниципалитета, приложение
Описание	Парковка автомобиля с помощью сервиса с использованием функции бронирования парковочного места	Добавление в лист ожидания	Получить данные по оборачиваемости парковочных мест и доход по ним
Предусловие	Наличие гаджета с установленным приложением, наличие Wi-fi		
Шаги использования	1. Автомобилист открывает приложение и регистрируется. 2. Автомобилист задает адрес желаемой парковки. 3. Сервис демонстрирует сеть роботов-парковщиков рядом с выбранной локацией. 4. Автомобилист находит через приложение свободное место. 5. Сервис оповещает о стоимости минуты парковки. 6. Автомобилист бронирует свободное место: - задает время начала парковочной сессии, - задает продолжительность парковочной сессии. 7. Сервис при бронировании выводит стоимость заданной парковочной сессии. 8. Автомобилист подъезжает к парковке. 9. Автомобилист складывает робота-парковщика нажатием кнопки в приложении. 10. Автомобилист припарковывает автомобиль. 11. Автомобилист освобождает парковочное место. 12. Сервис автоматически списывает сумму за услугу с карты. 13. Робот-парковщик поднимается и блокирует парковочное место.	1. Автомобилист открывает приложение и регистрируется. 2. Автомобилист задает адрес желаемой парковки. 3. Сервис демонстрирует сеть роботов-парковщиков рядом с выбранной локацией. 4. Сервис оповещает о стоимости минуты парковки. 5. В случае отсутствия парковочного места на желаемой парковке автомобилист открывает лист ожидания. 6. Сервис в листе ожидания показывает примерное время освобождения каждого робота-парковщика. 7. Автомобилист выбирает робота-парковщика и бронирует парковочное место, тем самым добавляет себя в лист ожидания: - задает время начала парковочной сессии, - задает продолжительность парковочной сессии. 8. Сервис выводит стоимость бронирования заданной парковочной сессии. 9. Автомобилист подъезжает к парковке. 10. Автомобилист складывает робота-парковщика нажатием кнопки в приложении. 11. Автомобилист припарковывает автомобиль. 12. Автомобилист освобождает парковочное место. 13. Сервис автоматически списывает сумму за услугу с карты. 14. Робот-парковщик поднимается и блокирует парковочное место.	1. Сотрудник муниципалитета открывает приложение и регистрируется. 2. Сотрудник муниципалитета задает адрес желаемой парковки. 3. Сотрудник муниципалитета нажатием выбирает парковку. 4. Сервис на боковой панели показывает среднее значение по оборачиваемости парковочных мест за текущие сутки и полученный доход. 5. После того, как сотрудник муниципалитета нажимает на данное значение, открывается трехосевой график с тремя переменными, на котором одна шкала показывает время, другая – количество парковочных сессий, третья – полученный доход. 6. Сотрудник муниципалитета имеет возможность сбоку данного графика выбрать кнопку «задать диапазон» и тем самым вывести среднее значение оборачиваемости парковочных мест за желаемый период времени и доход. 7. Сотрудник муниципалитета имеет возможность выбрать отдельное парковочное место и нажать на него. 8. Сервис выводит на экран информацию о количестве автомобилей, припарковавшихся на данном парковочном месте за текущие сутки, и доходе. 9. Сотрудник муниципалитета имеет возможность задать определенное время и получить данные по оборачиваемости отдельного парковочного места в заданное время и доходу по нему.
Результат	Парковочная сессия прошла удачно, все указанные функции в приложении работают	Автомобилист добавлен в лист ожидания	Получены достоверные данные по оборачиваемости парковочных мест и доходу с разной степенью конкретики

Заключение

Нехватка парковочных мест является актуальной проблемой для многих городов. Рост числа автомобилей, увеличение плотности населения и неэффективное использование городского пространства являются основными причинами возникновения этой проблемы. Нехватка парковочных мест приводит к затруднению движения, ухудшению экологической ситуации и снижению качества жизни. Для решения этой проблемы необходимо строить новые парковки, оптимизировать использование существующих и внедрять систему управления парковками.

Самой эффективной мерой является организация «умных» парковок, способных собирать информацию, прогнозировать нагрузку парковок и регулировать транспортный поток. Также данные парковки дадут возможность автомобилистам заранее знать, где есть свободное парковочное место, а где все места заняты. Что в свою очередь позволит экономить время, финансы и сберечь психологическое здоровье автомобилистов, увеличит пропускную способность улично-дорожной сети, а также повысит уровень безопасности проживания в городе. Данные улучшения происходят за счет упорядочения автомобилей и правильного распределения нагрузки.

В рамках работы был разработан интеллектуальный сервис роботизированных парковок «умного» города, который позволит обеспечить мониторинг и оптимизацию использования парковочных мест с целью разгрузки транспортной системы и максимизации выгоды владельцев парковок. Сервис организован в виде распределенной системы, состоящей из множества роботизированных устройств для управления парковочным местом и программного комплекса для их управления. Подобная архитектура сервиса позволяет обеспечить достаточно простое обслуживание и возможность его масштабирования, а также реализовать комплексный мониторинг парковок всего города.

Приведено несколько возможных вариантов использования предлагаемого нами сервиса, который дал бы такие возможности, как: инициирование бронирования парковочного места исходя из предпочтений пользователя, регулирование предоставления парковочных мест исходя из особенностей пользователя (например, его покупательной способности или особенностей здоровья), увеличение количества парковочных сессий; удобство электронной оплаты парковочной сессии; получение статистики использования парковочных мест, наличие карты с координатами парковок и режимами их работы.

Такого рода эффект достигается за счет:

1) фиксации начала парковочной сессии и ее окончания;

2) определения нарушений правил парковки;

3) предупреждения автовладельца о нарушении и если автовладелец не предпримет меры, начисления штрафа;

4) автоматизации взимания штрафов при превышении положенного времени парковки и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Григорьян О. Ю., Горяинов М. Ф.* Оценка и варианты решения проблем нехватки парковочных мест в густонаселенных городах // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике: материалы и доклады / Технологический институт (филиал) ДГТУ. Азов. 2020. Т. 6. № 1(5). С. 89–93. EDN: GEKZYB

2. *Ульянов В. И.* Перспективные пути решения проблем транспортной загрузки в крупнейших городах России // Инновации и инвестиции. 2020. № 8. С. 215–220. EDN: KOKKCO

3. *Xu F., Chen X., Zhang M. et al.* Sharing economy market system for private EV parking with consideration of demand side management // Energy. 2020. Vol. 190. 116321 p. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116321

4. *Мамаев Г. И., Бакиров Л. Ю.* Проблемы уличных парковок и зарубежный опыт организации парковок // Universum: технические науки. 2022. № 5-4 (98). С. 57–61. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13796

5. *Егоров С. В., Шацонок П. В., Ерпылева А. И., Жарков Д. И.* Мировой и российский опыт применения интеллектуальных транспортных систем // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 130–136. DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-159-169

6. *Котенкова И. Н., Сенин И. С., Беленков Г. И.* Эффективное использование парковочного пространства в городских условиях // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2023. Т. 1. С. 66–69. EDN: ACJYRV

7. *Васильева Е. А.* Оптимизация транспортной инфраструктуры города Челябинска // ИТ & Транспорт. Сб. научных статей. 2022. Т. 17. С. 75–81. EDN: DBOZSA

8. *Кравец А. Г., Астанков А. А., Мокрушин Г. А.* Виртуальный ассистент водителя для поиска места на открытой парковке // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 2(58). С. 35–44. EDN: YQORHI

9. *Ibrahim F. I., Fareez M., Aishah M.* Parking Spaces in Taylor's University: Problems and solutions // Environment-Behaviour Proceedings Journal. 2020. Vol. 5(13). Pp. 323–327. DOI: https://doi.org/10.21834/e-bpj.v5i13.2035

10. *Mei Z., Zhang W., Zhang L., Wang D.* Optimization of reservation parking space configurations in city centers through an agent-based simulation // Simulation Modelling Practice and Theory. 2020. Vol. 99. P. 102020. DOI: 10.1016/j.simpat.2019.102020

11. *Chen Yu., Wang T., Yan X., Wang C.* An Ensemble Optimization Strategy for Dynamic Parking-Space Allocation // IEEE Intell. Transport. Syst. Mag. 2023. Vol. 15. No. 1. Pp. 347–362. DOI: 10.1109/mits.2022.3163506

12. *Elfaki A. O., Messoudi W., Bushnag A. et al.* Constraint Optimization Model for Dynamic Parking Space Allocation // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 12. 3988 p. DOI: https://doi.org/10.3390/s24123988

13. *Liu X., Sun X., Huang W.* The integrated strategy of LIDAR points' evaluation localization and lateral tracking optimization for a new parking robot's tight space transportation // *Source Publication IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* 2023. Vol. 31. No. 2. Pp. 521–535. DOI: 10.1109/tfuzz.2022.3200462

REFERENCE

1. Grigoryan O.Yu., Goryainov M.F. Assessment and options for solving the problems of parking space shortage in densely populated cities. *Sovremennyye tendentsii razvitiya i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh tekhnologiy v mashinostroyenii, obrazovanii i ekonomike*. Modern trends in the development and prospects of innovative technologies inengineering, education and economics. Azov. Tekhnologicheskiy institut (filial) DGTU. 2020. Vol. 6. No. 1(5). Pp. 89–93. EDN: GEKZYB. (In Russian)

2. Ulyanov V.I. Perspective ways of solving the problems of transport load in the largest cities of Russia. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments]. 2020. No. 8. Pp. 215–220. EDN: KOKKCO (In Russian)

3. Xu F., Chen X., Zhang M. et al. Sharing economy market system for private EV parking with consideration of demand side management. *Energy*. 2020. Vol. 190. P. 116321. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116321

4. Mamaev G.I., Bakirov L.Yu. Problems of street parking and foreign experience of parking organization. *Universum: tekhnicheskiye nauki* [Universum: Technical Sciences]. 2022. No. 5-4 (98). Pp. 57–61. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13796. (In Russian)

5. Egorov S.V., Shatsionok P.V., Erpyleva A.I., Zharkov D.I. World and Russian experience in the application of intelligent transportation systems. *Transportnoye delo Rossii* [Transport Business of Russia]. 2022. No. 2. Pp. 130–136. DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-159-169. (In Russian)

6. Kotenkova I.N., Senin I.S., Belenkov G.I. Efficient use of parking space in urban conditions. *Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and Scientific Research in Transport Complex]. 2023. Vol. 1. Pp. 66–69. EDN: ACJYRV. (In Russian)

7. Vasilieva E. A. Optimization of transport infrastructure of the city of Chelyabinsk. *IT i transport* [IT & Transport]. Collection of scientific articles. 2022. Vol. 18. Pp. 37–44. EDN: DBOZSA (In Russian)

8. Kravets A.G., Astankov A.A., Mokrushin G.A. Virtual driver assistant for finding a place in an open parking lot. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies]. 2022. No. 2(58). Pp. 35–44. EDN: YQORHI. (In Russian)

9. Ibrahim F.I., Fareez M., Aishah M. Parking Spaces in Taylor's University: Problems and solutions. *Environment-Behaviour Proceedings Journal.* 2020. Vol. 5(13). Pp. 323–327. DOI: https://doi.org/10.21834/e-bpj.v5i13.2035

10. Mei Z., Zhang W., Zhang L., Wang D. Optimization of reservation parking space configurations in city centers through an agent-based simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020. Vol. 99. 102020 p. DOI: 10.1016/j.simpat.2019.102020

11. Chen Yu., Wang T., Yan X., Wang C. An ensemble optimization strategy for dynamic parking-space allocation. *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.* 2023. Vol. 15. No. 1. Pp. 347–362. DOI: 10.1109/mits.2022.3163506

12. Elfaki A.O., Messoudi W., Bushnag A. *et al.* Constraint Optimization Model for Dynamic Parking Space Allocation. *Sensors.* 2024. Vol. 24. Issue 12. 3988 p. DOI: https://doi.org/10.3390/s24123988

13. Liu X., Sun X., Huang W. The integrated strategy of LIDAR points' evaluation localization and lateral tracking optimization for a new parking robot's tight space transportation. *Source Publication IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* 2023. Vol. 31. No. 2. Pp. 521–535. DOI: 10.1109/tfuzz.2022.3200462

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Канокова Мадина Аликовна, науч. сотр. лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

kanokova.madina@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5313-1360, SPIN-код: 8569-0012

Заммоев Аслан Узеирович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

зав. совместной лабораторией ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андроидная техника» «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

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

zammoev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7966-3557, SPIN-код: 6317-3115

Information about the authors

Madina A. Kanokova, Researcher of the Laboratory of Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

kanokova.madina@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5313-1360, SPIN-code: 8569-0012

Aslan U. Zammoev, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

Head of the Joint Laboratory of IIPRU KBSC RAS and NPO Android Technology Bionanorobotics, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

zammoev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7966-3557, SPIN-code: 6317-3115

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 621.865.8 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-67-81
EDN: CXYWXV

Моделирование алгоритма предотвращения столкновений в робототехнических коллаборативных системах

М. А. Шереужев[✉1,2], Д. И. Арабаджиев[1,2], И. В. Семянников[1,2]

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

Аннотация. В современной коллаборативной и промышленной робототехнике вопрос безопасности взаимодействия человека и робота является одним из основополагающих. Ввиду больших моментов сил и высоких скоростных режимов работы столкновение манипулятора и оператора часто приводит к ранению человека. Цель работы – разработка и тестирование алгоритма предотвращения столкновений для роботов в динамичной среде. Моделирование производилось в симуляторе Webots с использованием метода виртуальных сил. Алгоритм показал высокую эффективность и надежность, поддерживая безопасное расстояние между роботом и человеком. Разработанная система предотвращения столкновений подходит для применения в промышленных условиях.

Ключевые слова: предотвращение столкновений, безопасность, коллаборативный робот, Webot

Поступила 05.11.2024, одобрена после рецензирования 15.11.2024, принята к публикации 06.12.2024

Для цитирования. Шереужев М. А., Арабаджиев Д. И., Семянников И. В. Моделирование алгоритма предотвращения столкновений в робототехнических коллаборативных системах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 67–81. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-67-81

MSC: 68T40 Original article

Modeling algorithm to avoid collisions in robotic collaborative systems

M.A. Shereuzhev[✉1,2], D.I. Arabadzhiev[1,2], I.V. Semyannikov[1,2]

[1]Moscow State University of Technology “STANKIN”
127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane
[2]Moscow State Technical University named after N. E. Bauman
105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1

Abstract. In modern collaborative and industrial robotics, the issue of safety of human-robot interaction is one of the main problems. Due to the high mass and high-speed operating modes, a collision between the manipulator and the operator often leads to injury to a person. The aim of the work is to develop and test an algorithm to avoid collision for robots in a dynamic environment. The simulation was carried out in the Webots simulator using the virtual force method. The algorithm has shown high efficiency and reliability, maintaining a safe distance between a robot and a person. The developed system to avoid collision is suitable for industrial environments.

© Шереужев М. А., Арабаджиев Д. И., Семянников И. В., 2024

Keywords: collision prevention, safety, collaborative robot, Webots

Submitted 05.11.2024, approved after reviewing 15.11.2024, accepted for publication 06.12.2024

For citation. Shereuzhev M.A., Arabadzhiev D.I., Semyannikov I.V. Modeling algorithm to avoid collisions in robotic collaborative systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 67–81. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-67-81

Введение

В области взаимодействия человека и робота безопасность рассматривается как ключевой аспект, необходимый для обеспечения безопасной совместной работы роботов и людей. Это требование одинаково важно как для коллаборативных, так и для промышленных роботов, учитывая их растущее применение в повседневной жизни и на производстве [1]. Промышленные и коллаборативные роботы обеспечивают повышенную производительность и гибкость, а их системы управления упрощают разработку программ [2].

В настоящее время промышленные манипуляторы, как правило, должны работать в изолированных зонах, огражденных барьерами, поскольку они все еще редко имеют возможность воспринимать окружающий мир и представляют значительную опасность для человека. Высокая инерция и скорости работы промышленных манипуляторов, обусловленные требованиями производительности, делают любое столкновение с человеком потенциально опасным и способным нанести серьезные травмы.

Разработка алгоритмов предотвращения столкновений связана с рядом трудностей, обусловленных двумя основными факторами: сложной кинематической структурой роботов и геометрической сложностью окружения в промышленной среде [3]. Эти алгоритмы требуют сложных вычислений, так как для их работы необходимо учитывать большое количество факторов. В связи с этим симуляционные среды становятся незаменимыми инструментами для тестирования таких алгоритмов, особенно с использованием виртуальной реальности, которая предоставляет проектировщикам визуальную обратную связь [4].

Повышение вычислительных мощностей современных компьютеров открывает возможности для создания виртуальных моделей, способных точно имитировать реальные сценарии. Это критически важно для такой задачи коллаборативной робототехники, как предотвращение столкновений в реальном времени [5]. В последние годы виртуальные симуляционные среды, такие как CoppeliaSim (ранее V-REP), Webots, Gazebo, зарекомендовали себя как мощный инструмент для симуляции роботизированных систем и их окружения, предоставляя инженерам удобное средство для разработки и тестирования сложных алгоритмов [5].

Задачи, решаемые в данной работе:

1. Анализ существующих методов, позволяющих избежать столкновения коллаборативного робота и человека-оператора.

2. Разработка алгоритма для возможности избегания препятствий.

3. Тестирование алгоритма в имитационной среде и оценка полученных результатов.

Существующие методы предотвращения столкновений

Предотвращение столкновений является одной из ключевых задач в робототехнике и активно исследуется на протяжении последних нескольких десятилетий. Одним из ранних методов, разработанных для решения этой проблемы, был метод потенциальных полей [3],

где робот рассматривается как движущийся в потенциальном поле. В этом подходе целевая точка располагается в минимуме потенциального поля, а препятствия представлены вершинами в этом поле. Таким образом, робот находит путь к цели, избегая столкновений с препятствиями, двигаясь по «склонам» потенциального поля. С тех пор было предложено множество методов, направленных на усовершенствование и дополнение этого подхода. Например, недавние исследования [4] используют методы глубокого обучения для предотвращения столкновений манипуляторов с применением камеры Kinect для фиксации положения препятствий и вычисления минимальных расстояний между роботом и окружающими объектами.

Одним из ключевых методов предотвращения столкновений является применение виртуальных эллипсоидов для аппроксимации структуры робота. Как было предложено в работе [5], эллипсоиды используются для моделирования внешних границ звеньев робота, и когда одно из звеньев приближается к препятствию, возникает отталкивающая сила, которая корректирует движение робота. В другом подходе, описанном в [5], предложен скелетный метод для предотвращения самопроизвольных столкновений в многоруких роботах. В этом методе звенья робота аппроксимируются цилиндрами, на которые действуют силы отталкивания при приближении к препятствиям.

Одним из современных методов является алгоритм предотвращения столкновений для избыточных манипуляторов, предложенный в работе [6]. Этот алгоритм оперирует на уровне кинематики, рассчитывая минимальное расстояние между роботом и препятствиями и корректируя движение манипулятора на основе векторов отталкивания.

Однако, как отмечается в работе [4], многие современные методы сталкиваются с проблемами приоритетности задач, когда цель робота конфликтует с задачей предотвращения столкновений. Авторы предложили способ плавного изменения приоритетов между задачами через введение специального коэффициента, что позволяет улучшить гибкость управления манипулятором и избежать перепланировки.

Хотя проблема предотвращения столкновений тщательно изучена в теоретической робототехнике, интеграция этих алгоритмов в реальных промышленных условиях остается сложной задачей. В данном исследовании был предложен алгоритм предотвращения столкновений в промышленной роботизированной ячейке. Моделирование и верификация алгоритма осуществлялись с использованием симулятора Webots.

Материалы и методы

Среда моделирования

Современные симуляторы, такие как Webots, обладают широкими возможностями для интеграции алгоритмов предотвращения столкновений. Webots предоставляет инструменты для моделирования и верификации сложных алгоритмов в условиях, приближенных к реальной работе роботизированных систем. Одной из сильных сторон Webots является возможность симуляции сложных робототехнических систем с использованием нескольких физических движков, а также поддержка реального времени для выполнения задач обнаружения столкновений и расчета минимальных расстояний между объектами [7, 8].

Webots выгодно отличается от других симуляторов, таких как Gazebo и CoppeliaSim, своим интуитивно понятным интерфейсом и качественной графической визуализацией. В отличие от Gazebo, требующего более сложной настройки, и CoppeliaSim с менее удобным интерфейсом Webots обеспечивает оптимальное сочетание функциональности и удобства использования.

Алгоритм предотвращения столкновений

Один из подходов к предотвращению столкновений основан на **методе виртуальных сил** [9, 10]. В отличие от метода потенциальных полей, в котором робот двигается под воздействием притягивающих и отталкивающих сил, метод виртуальных сил учитывает не только силы отталкивания и притяжения, но и момент сил, создаваемых препятствиями. Этот метод позволяет более точно контролировать движение робота в сложных условиях с учетом динамики системы и может быть интегрирован с алгоритмами машинного обучения [11].

Притягивающая сила F_{att} направлена к цели и рассчитывается по аналогии с методом потенциальных полей. Она пропорциональна вектору ошибки между текущей позицией робота и целью:

$$F_{att} = -K_p \left(p_e - p_{goal} \right),$$

где K_p – коэффициент пропорциональности, контролирующий скорость движения робота к цели;

p_e – положение конечного эффектора робота;

p_{goal} – положение цели.

Отталкивающая сила F_{rep} аналогично методу потенциальных полей направлена в противоположную сторону от препятствия и зависит от расстояния до препятствия d. Эта сила вступает в расчет, когда робот находится ближе к препятствию, чем некоторое пороговое расстояние d_0, и рассчитывается по формуле:

$$F_{rep} = \begin{cases} k_{rep} \left(\dfrac{1}{d} - \dfrac{1}{d_0} \right) \dfrac{p_r - p_0}{d^2}, & \text{если } d < d_0 \\ O, & \text{если } d \geq d_0 \end{cases}$$

где k_{rep} – коэффициент отталкивания;

p_r – положение точки робота (размер 3×1), ближайшей к препятствию, $p_r = [p_{rx}, p_{ry}, p_{rz}]^T$;

p_0 – положение препятствия (размер 3×1), $p_0 = [p_{0x}, p_{0y}, p_{0z}]^T$;

O – нулевой вектор (размер 3×1), $O = [0,0,0]^T$;

d – минимальное расстояние между роботом и препятствием.

В отличие от метода потенциальных полей, помимо притягивающих и отталкивающих сил, робот может испытывать виртуальный момент M_{rep}, создаваемый препятствием. Этот момент рассчитывается на основе расстояния d между точкой конечного эффектора робота и непосредственно препятствием по формуле:

$$M_{rep} = \lambda \left(p_r - p_0 \right) \times F_{rep}^T,$$

где λ – коэффициент масштабирования момента.

Момент τ_{total}, определяемый для всех степеней свободы робота, состоит из двух компонент: момента τ_{att}, обусловленного движением к цели, и момента τ_{rep}, вызванного отталкивающей силой и моментом.

Для соблюдения размерности векторов сил с матрицей Якоби векторы притягивающей и отталкивающей сил приводятся к виду:

$$F_{att} = [F_{attx}, F_{atty}, F_{attz}, 0,0,0]^T,$$

$$F_{rep} = [F_{repx}, F_{repy}, F_{repz}, 0,0,0]^T.$$

Виртуальный момент приводится к виду:

$$M_{rep} = [0,0,0,M_{rep\,x},M_{rep\,y},M_{rep\,z}]^T .$$

Момент движения к цели τ_{total} вычисляется по формуле:

$$\tau_{att} = J_{TCP}^T F_{att} ,$$

где J_{TCP} – якобиан (размер 6×6), связанный с центральной точкой инструмента;

F_{att} – сила притяжения (размер 6×1), $F_{att} = [F_{att\,x},F_{att\,y},F_{att\,z},0,0,0]^T$.

Момент τ_{rep}, имитирующий отталкивание манипулятора от препятствий, вычисляется по формуле:

$$\tau_{rep} = J_{CP}^T F_{rep} + M_{rep} ,$$

где J_{CP} – якобиан (размер 6×6), связанный с точкой робота, ближайшей к препятствию;

M_{rep} – виртуальный момент силы (размер 6×1);

F_{rep} – сила отталкивания (размер 6×1).

Суммарный момент τ_{total} определяется по формуле:

$$\tau_{total} = \tau_{att} + \tau_{rep} .$$

Подчиняясь вычисленным моментам, робот движется к цели, избегая препятствий. Этот подход позволяет учитывать не только силы, но и моменты, что делает его более точным и эффективным при работе в сложных средах с высоким риском столкновений.

Таким образом, использование метода виртуальных сил позволяет реализовать алгоритм предотвращения столкновений, который более эффективно учитывает динамические аспекты системы, такие как моменты сил, и может быть адаптирован для сложных роботизированных систем.

Экспериментальная среда

В качестве объекта исследования был выбран промышленный манипулятор с шестью степенями свободы – **FANUC CR-15iA**. В ходе экспериментов робот либо простаивал, либо выполнял операцию, в то время как подвижные препятствия двигались по курсу столкновения с манипулятором.

В контексте предложенной методологии была выполнена серия симуляций в реальном времени с целью верификации структуры и эффективности разработанного алгоритма. Для моделирования использовался симулятор Webots, который обеспечивал как 3D-визуализацию и отслеживание объектов, так и выполнение основных вычислений, таких как расчет векторов напряжения и отталкивания, решение задач прямой и обратной кинематики, реализация конечных автоматов.

В рамках симуляций, выполненных в Webots, было создано виртуальное представление рабочей зоны, включающее робота, сотрудника и траекторию его движения. Так как в рамках данной работы задача определения минимального расстояния между манипулятором и человеком не рассматривается, данная величина определяется и визуализируется через графический интерфейс в реальном времени с помощью встроенных инструментов Webots, что позволяет наблюдать взаимодействие робота и сотрудника с графической обратной связью высокого качества.

В процессе моделирования манипулятор перемещался свободно по всем координатам. Однако анализировались движения оператора и конечного инструмента только в плоскости *Oxy*. Такой подход обусловлен тем, что многие технологические операции, например,

сборка и упаковка, выполняются на фиксированном уровне рабочего стола или конвейера. Человек, обладая вытянутой по вертикали формой, перемещается по рабочей зоне преимущественно на одном уровне. По этой причине в рамках данной работы рассмотрение перемещения инструмента по оси *Oz* не представляет интереса.

Для оценки эффективности работы алгоритма предотвращения столкновений проводилось три различных теста. В первых двух тестах оценивалась производительность алгоритма при различных конфигурациях робота и препятствий. Манипулятор перемещался по траекториям *X* и *Y* в 1-м и 2-м тестах соответственно. Третий тест проводился в условиях типичной роботизированной ячейки, где робот выполнял операции захвата и размещения объектов, избегая столкновения с человеком, перемещающимся по общему рабочему пространству по траектории К под углом 45°С относительно оси *x* робота. Во всех тестах минимальное допустимое расстояние сближения человека и манипулятора составляло 0,75 м.

Результаты тестирования

Тест 1

В данном эксперименте робот оставался в неподвижном состоянии, в то время как человек-оператор подходил к роботу спереди вдоль оси *X* (рис. 1).

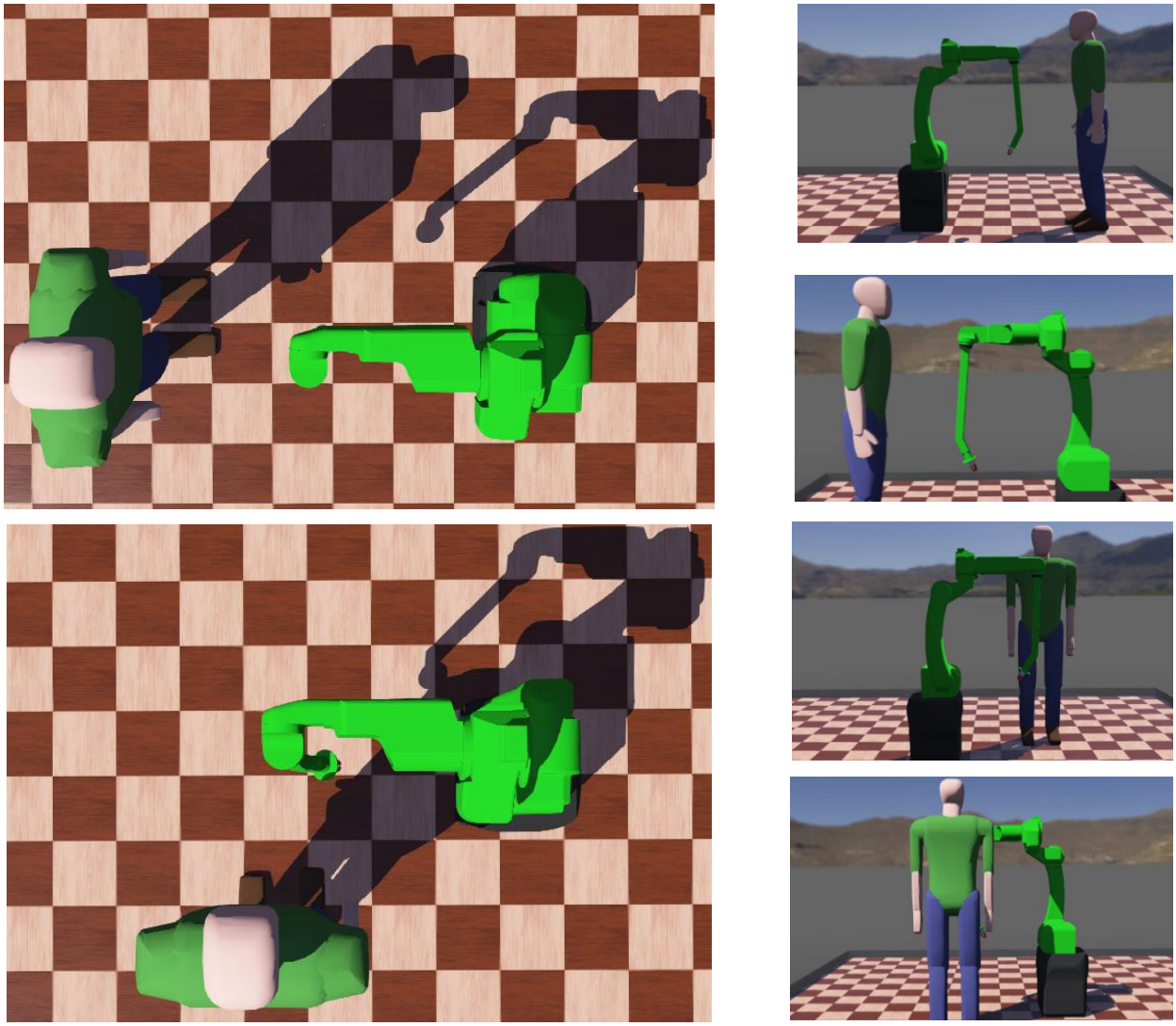


Рис. 1. *Сцена виртуального полигона для проведения 1-го и 2-го тестов*

Fig. 1. *Scene of the virtual testing ground for 1st and 2nd tests*

В процессе движения оператора минимальное расстояние между ним и роботом постепенно сокращалось, и при достижении заданного безопасного порога робот начинал реагировать, удаляясь от оператора, чтобы избежать возможного столкновения. Моментальные снимки проведения 1-го и 2-го тестов представлены на рис. 2.

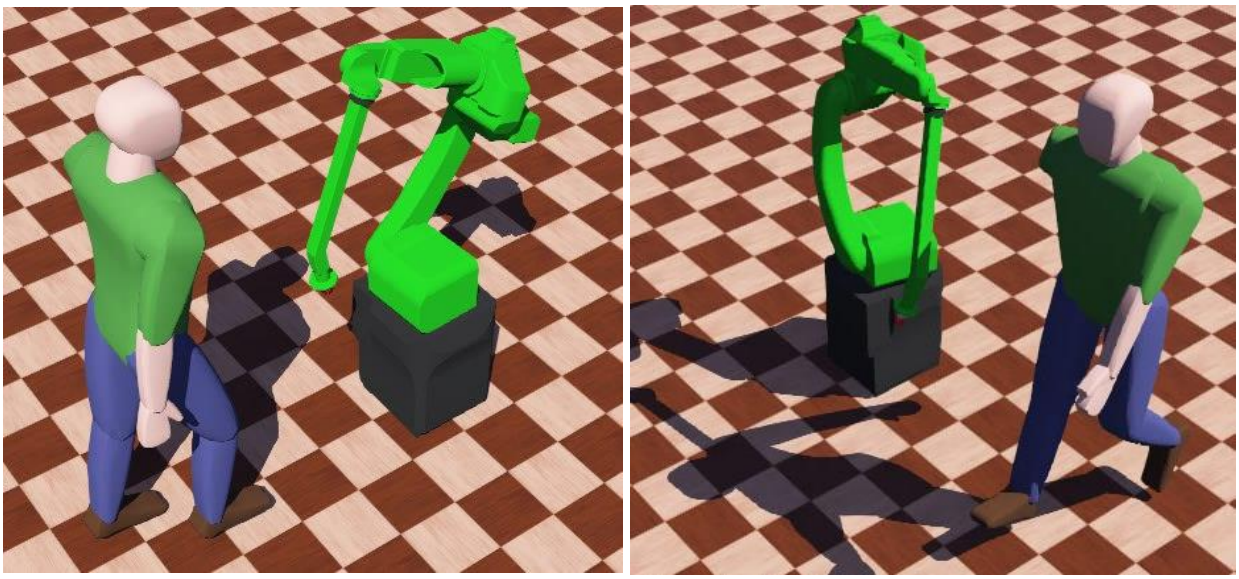


Рис. 2. *Симуляция робототехнической ячейки при проведении 1-го и 2-го тестов*

Fig. 2. *Simulation of the robotic cell during the 1st and 2nd tests*

Для анализа поведения системы и оценки реакции робота были выбраны следующие параметры:

1. Положение конечного эффектора робота в декартовой системе координат.
2. Положение оператора в декартовой системе координат.
3. Минимальное расстояние между роботом и оператором в каждый момент времени.
4. Скорость конечного эффектора во времени.

На основании полученных данных были построены графики, которые позволили провести анализ работы системы. На рис. 3 отображены координаты оси x конечного эффектора и оператора, а также разница между ними. В начальный момент времени робот оставался неподвижным, в то время как оператор двигался с постоянной скоростью порядка 1,15 м/с вдоль оси x, направляясь к роботу. Как только расстояние между роботом и оператором сократилось до заданного безопасного значения, робот начал удаляться, реагируя на приближение человека.

Как только оператор изменил траекторию движения и начал удаляться от робота, манипулятор возвращался в исходное положение. Цикл движения повторялся несколько раз, и робот продемонстрировал аналогичную реакцию в каждом из циклов. Анализ нескольких циклов моделирования показал, что минимальное расстояние поддерживалось на уровне 0,75 м, что соответствовало установленному порогу безопасности. На рис. 4 представлена зависимость скорости движения конечного эффектора вдоль оси x от времени, которая позволяет оценить реакцию системы на изменения в окружении.

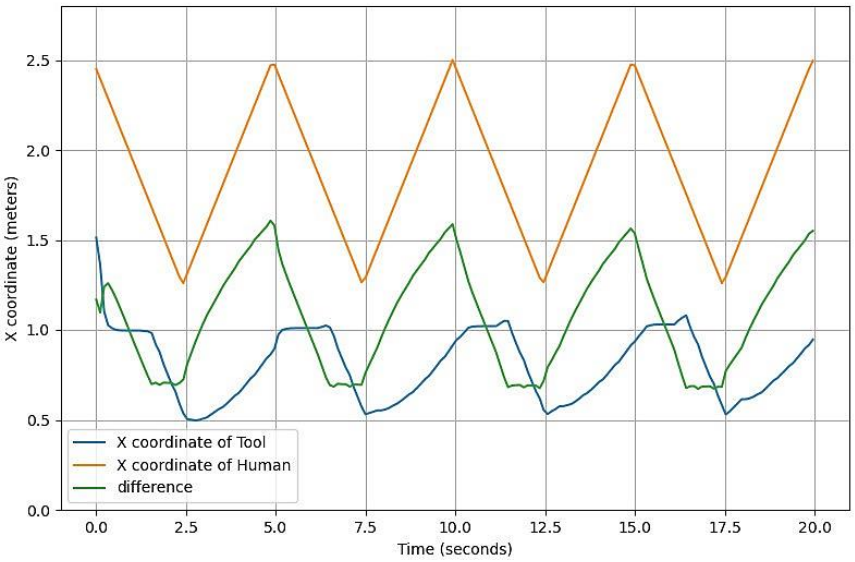


Рис. 3. *Изменение координаты X человека, инструмента робота и их разница при проведении 1-го теста*

Fig. 3. *Change in coordinates of a person, a robot tool and their difference during the 1st test*

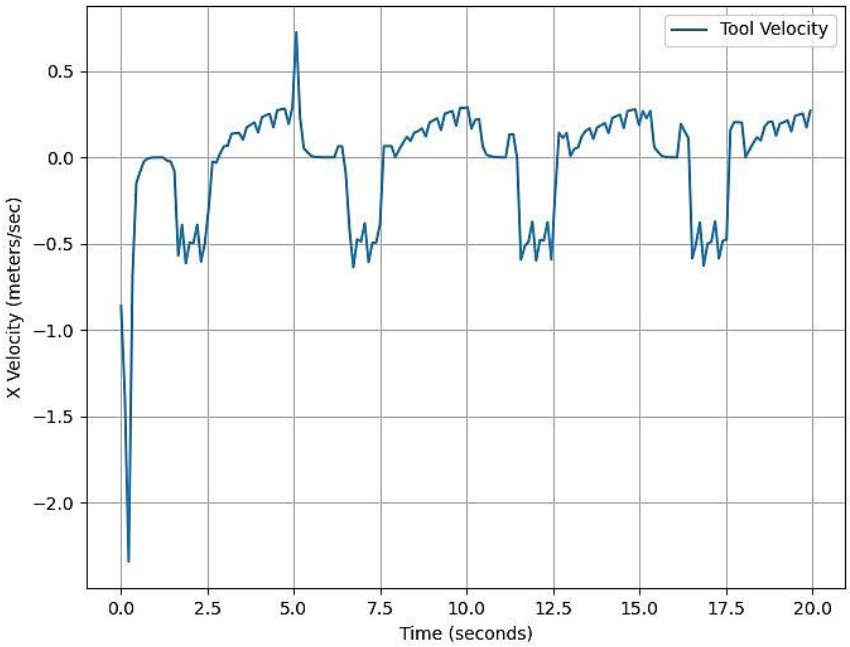


Рис. 4. *Изменение скорости движения инструмента вдоль оси Ox*

Fig. 4. *Change in the movement speed of the tool along the Ox axis*

Полученные результаты демонстрируют, что предложенный алгоритм успешно решает задачу предотвращения столкновений в реальном времени, что подтверждается стабильной и предсказуемой реакцией робота на приближение оператора.

Тест 2

В данном эксперименте оператор подходил к роботу со стороны вдоль оси Y (рис. 1). В начальный момент времени расстояние между конечным эффектором робота и оператором составляло 2,5 метра, после чего оператор начал двигаться в сторону робота со средней скоростью 1,15 м/с вдоль оси Y манипулятора. На рис. 5 видно, что сначала робот находился в состоянии покоя, пока оператор не приблизился на заданное безопасное рас-

стояние 0,75 м. При достижении этого расстояния робот начал реагировать, отдаляясь с целью предотвращения столкновения.

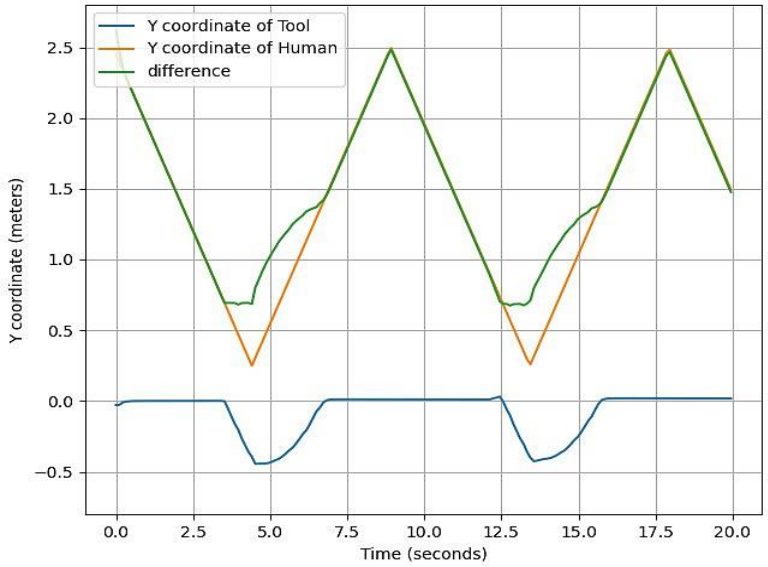


Рис. 5. *Изменение координаты Y человека, инструмента робота и их разница при проведении 2-го теста*

Fig. 5. *Change in the Y coordinate of the human, the robot tool and their difference during the 2nd test*

На рис. 6 представлен график изменения скорости движения инструмента вдоль оси Oy. Аналогично предыдущему эксперименту, заметен отвод инструмента при приближении человека и дальнейший его возврат в исходное положение. Этот сценарий, при котором оператор приближается сбоку, отличается от ситуации с фронтальным подходом, рассмотренным ранее, тем, что реакция робота преимущественно зависела от его движения вокруг оси вращения 1-го звена, что связано с особенностями кинематической структуры робота.

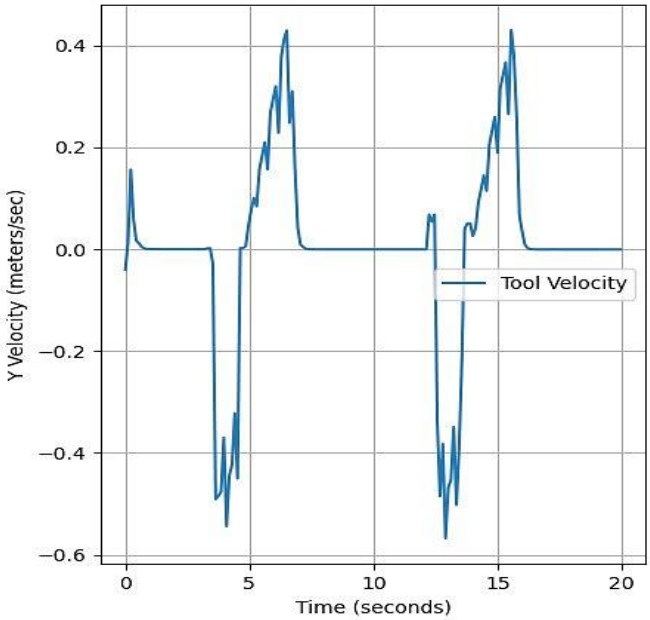


Рис. 6. *Изменение скорости движения инструмента вдоль оси Oy*

Fig. 6. *Chang in the movement speed of the tool along the Oy axis*

Несмотря на различия в характере движений, результаты демонстрируют аналогичную эффективность работы системы предотвращения столкновений: робот плавно адаптировал свое положение и успешно избегал столкновения с оператором. Эти результаты подтверждают универсальность предложенного алгоритма для различных сценариев взаимодействия человека и робота.

Так как Webots является физическим симулятором, в нем нет инструментов для точного определения скорости объекта, ввиду чего скорость инструмента находится путем численного дифференцирования координаты. По этой причине график скорости имеет колебательный характер в случае 1-го (рис. 5) и 2-го (рис. 6) тестов.

Тест 3

Для выполнения сложных манипуляций с сохранением способности избегания столкновений с динамическими объектами предложенный алгоритм может быть реализован в виде архитектуры конечного автомата (рис. 7). Примером такой реализации является Тест 3. В данном тесте робот выполнял операцию прохождения траектории в виде окружности в плоскости Oxy, которая однозначно отслеживается на графиках изменения координат схвата инструмента в виде периодической функции. Подобный тип движения часто встречается в траекториях движения манипуляторов при выполнении промышленных операций.

Рис. 7. *Конечный автомат робототехнической ячейки для контроля столкновений с человеком*

Fig. 7. *Finite state automaton of a robotic cell for human collision detection*

Основные состояния конечного автомата включают:

1. Перемещение робота в начальное положение.
2. Выполнение операции.
3. Замедление робота в случае присутствия человека в рабочей зоне.
4. Запуск безопасного уклонения, если человек пересек критическое расстояние в 0.75 метров.

5. Возврат на траекторию после безопасного уклонения.

Целью теста является обеспечение максимальной точности следования роботом заранее заданной траектории при одновременном избегании столкновений с человеком, который работает в той же зоне, что и робот. Описанный выше конечный автомат позволяет роботу переключаться между различными состояниями в зависимости от текущей ситуации и взаимодействовать с окружением. На рис. 8 наблюдаются изменения координат инструмента относительно базы робота, изменяющиеся по периодическому закону с разным периодом, зависящим от режима работы (стандартный или с пониженной скоростью). Также представлено абсолютное расстояние от инструмента до человека в зависимости от времени. Траектория движения вдоль окружности в плоскости *Oxy* и траектории уклонений, сформировавшиеся в процессе прохождения теста 3, продемонстрированы на рис. 9.

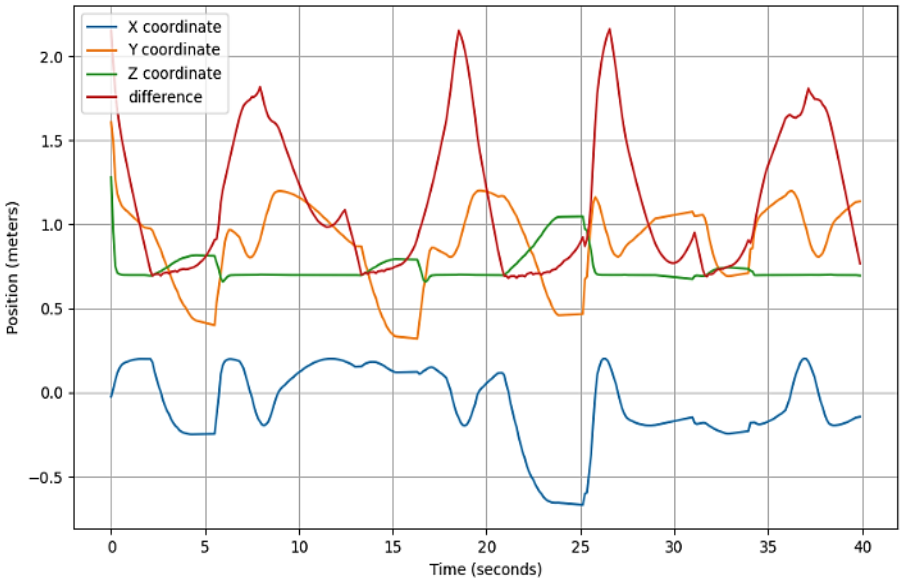


Рис. 8. *Изменение координат X, Y, Z инструмента робота и расстояния до человека в 3-м тесте*

Fig. 8. *Change in X, Y, Z coordinates of the robot tool and the distance to the person in test 3*

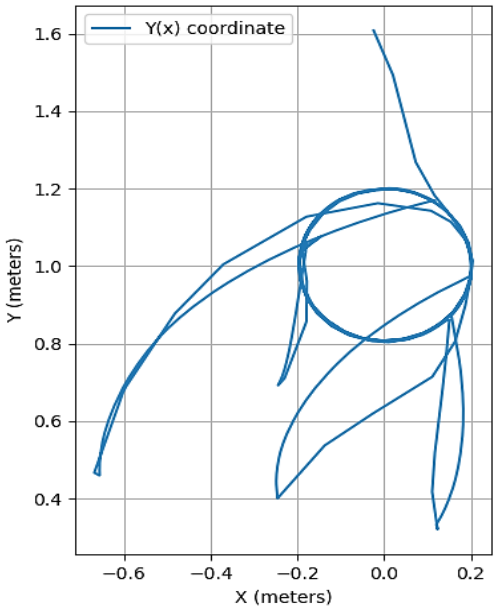


Рис. 9. *Траектория движения инструмента робота в плоскости Oxy*

Fig. 9. *The trajectory of the robot tool in the Oxy plane*

На рис. 10 представлены моментальные снимки процесса моделирования 3-го теста. Результаты симуляции показали успешное выполнение задачи: робот не только точно следовал заданной траектории, но и эффективно избегал столкновений с человеком.

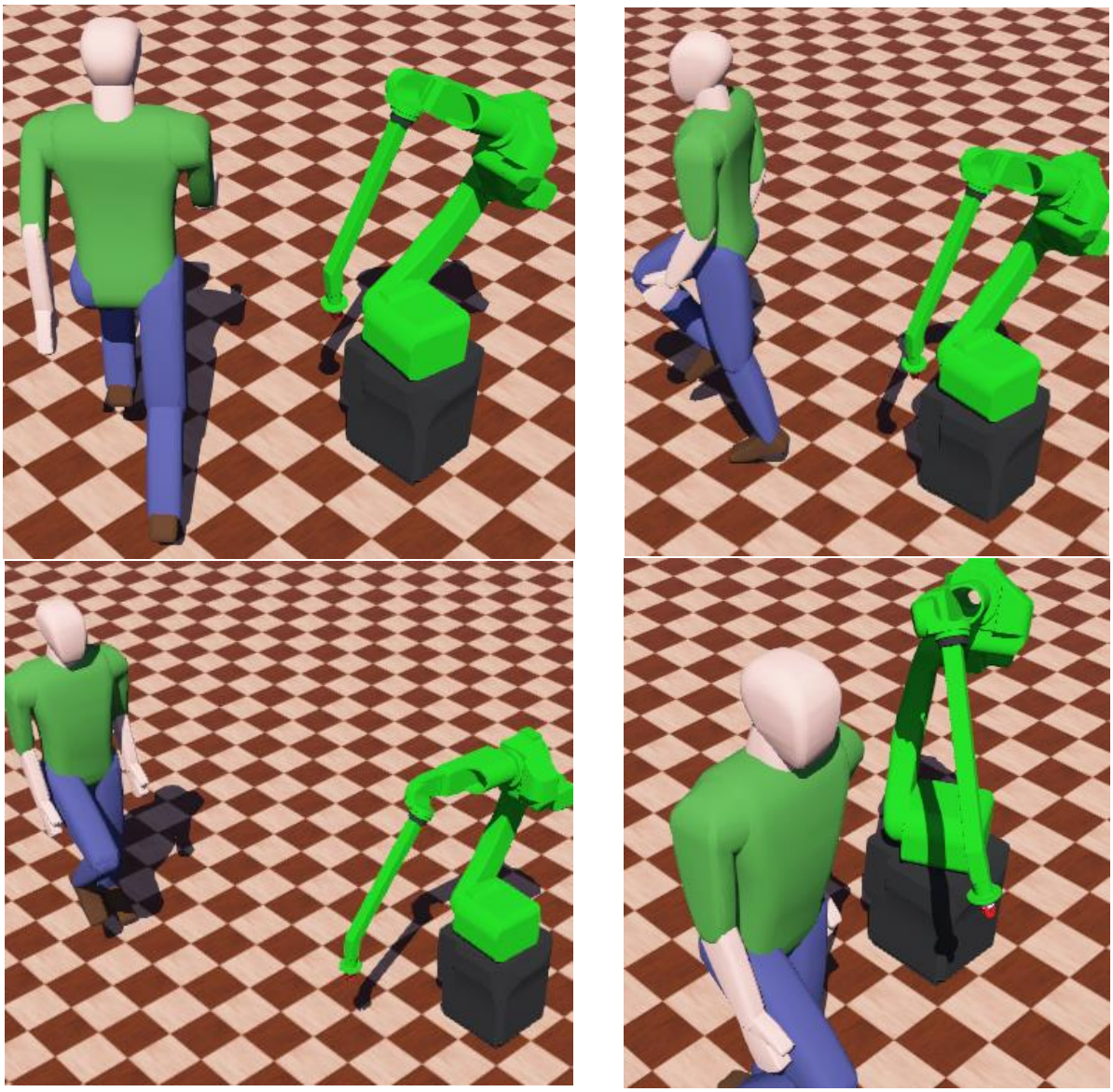


Рис. 10. *Симуляция робототехнической ячейки при проведении 3-го теста*

Fig. 10. *Simulation of the robotic cell during the 3rd test*

Обсуждение

Результаты моделирования показали, что предложенный алгоритм предотвращения столкновений, основанный на методе потенциальных полей и виртуальных сил, продемонстрировал высокую эффективность при работе в динамической среде совместно с человеком-оператором. В процессе выполнения тестов робот успешно адаптировался к изменяющимся условиям окружения, поддерживая безопасное расстояние от подвижных объектов и человека, что подтверждает его надежность в ситуациях, требующих быстрых реакций.

Тем не менее данная работа имеет ряд ограничений. В представленном исследовании не рассматривался вопрос детекции и определения позиции препятствия или человека.

Кроме того, следует учитывать, что использование виртуальных симуляторов, таких как Webots, не всегда способно полностью имитировать реальные условия, особенно в сложных рабочих зонах, где присутствуют другие факторы, влияющие на траекторию робота.

Одним из основных недостатков предложенного алгоритма является отсутствие учета возможного смещения промежуточных звеньев в сторону препятствия при удалении конечного эффектора от приближающегося человека. Для устранения данного недостатка необходимо использовать якобианы, соответствующие промежуточным точкам манипулятора, и вычислять минимальные расстояния между этими точками и препятствиями. Такой подход позволит более точно оценивать риск столкновения и обеспечивать безопасность движения манипулятора.

Заключение

Современные задачи коллаборативной робототехники требуют разработки алгоритмов, обеспечивающих предотвращение столкновений между роботом и оператором, что позволяет повысить безопасность, производительность и адаптивность роботизированных систем при выполнении технологических операций.

В данной работе представлен алгоритм предотвращения столкновений на основе метода искусственных потенциальных полей. Вектор притяжения определяется через разницу между текущей позицией центральной точки инструмента и целевой точкой, что обеспечивает движение робота по номинальной траектории. Вектор отталкивания рассчитывается на основе минимального расстояния до препятствий и корректирует движение робота при приближении оператора. Моделирование алгоритма осуществлялось в имитационной среде Webots.

Проведенные тесты демонстрируют, что предложенная система предотвращения столкновений обладает высокой надежностью. Результаты моделирования показали, что система способна успешно адаптироваться к изменениям в окружении и эффективно избегать столкновений при выполнении задач совместной робототехники. Это делает ее пригодной для применения в промышленных средах, где требуется безопасное взаимодействие роботов и людей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Haddadin S., Croft E. Physical human-robot interaction. *Handbook of Robotics*. Springer. 2016. Pp. 1835–1874. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_69

2. Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C. Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*. 2018. Vol. 55. Pp. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009

3. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*. 1986. Vol. 5(1). Pp. 90–98. DOI: 10.1109/ROBOT.1985.1087247

4. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Force control*. Springer: London. 2009. Pp. 363–405.

5. Rohmer E., Singh S.P.N., Freese M. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework. *2013 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems.* 2013. Pp. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696520

6. Reinstein M., Hoffmann M. Dead reckoning in a dynamic quadruped robot based on multimodal proprioceptive sensory information. *IEEE Transactions on Robotics*. 2012. Vol. 29(2). Pp. 563–571. DOI: 10.1109/TRO.2012.2228309

7. Michel O., Rohrer B. Webots: professional mobile robot simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2009. Vol. 5(3). Pp. 39–42. DOI: 10.5772/5618

8. Dellaert F., Fox D., Burgard W., Thrun S. Monte Carlo localization for mobile robots. *Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation*. 1999. Pp. 1322–1328.

9. Jiang Y., Yang C., Ju Z., Liu J. Obstacle avoidance of a redundant robot using virtual force field and null space projection. *Intelligent Robotics and Applications: XII International Conference, ICIRA*. Springer. 2019. Pp. 728–739. DOI: 10.1007/978-3-030-27526-6_64

10. Kim C.Y., Kim Y.H., Ra W.S. Modified 1D virtual force field approach to moving obstacle avoidance for autonomous ground vehicles. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2019. Vol. 14. Pp. 1367–1374. DOI: 10.1007/s42835-019-00127-8

11. Xu Q., Zhang T., Zhou K. et al. Active collision Aaoidance for robotic Aam based on artificial potential field and deep reinforcement learning. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(11). P. 4936. DOI: 10.3390/app14114936

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Научное исследование было профинансировано образовательными организациями в рамках проекта 2024–2026 годов в рамках гранта FSFS-2024-0012.

Funding. The research was funded by educational organizations within the framework of the 2024–2026 project under grant FSFS-2024-0012.

Информация об авторах

Шереужев Мадин Артурович, кан. тех. наук, мл. науч. сотр. Центра когнитивных технологий и машинного зрения, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1;

старший преподаватель кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2352-992X, SPIN-код: 1734-9056;

Арабаджиев Денис Игоревич, инженер Центра когнитивных технологий и машинного зрения, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1;

аспирант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

denisarabadzhiev13@gmail.com, SPIN-код: 7438-1760

Семянников Иван Владимирович, инженер студенческого бюро робототехники, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1;

магистрант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

semyannikoviv@student.bmstu.ru

Information about the authors

Madin A. Shereuzhev, Candidate of Engineering Sciences, Junior Research at the Center for Cognitive Technologies and Machine Vision of Moscow State University of Technology STANKIN;

127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane;

Senior Teacher at the Department SM7 Robotic systems and mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2352-992X, SPIN-code: 1734-9056;

Denis I. Arabadzhiev, Engineer at the Center for Cognitive Technologies and Machine Vision of Moscow State University of Technology STANKIN;

127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane;

Postgraduate Student at the Department SM7 Robotic systems and mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1;

denisarabadzhiev13@gmail.com, SPIN-code: 7438-1760

Ivan V. Semyannikov, Engineer of Student Robotics Office of Moscow State University of Technology STANKIN;

127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane;

Master Student at the Department SM7 Robotic systems and mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1;

semyannikoviv@student.bmstu.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 519.1:519.853.4:004.94 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-82-97
EDN: DIYRVK

Компьютерное проектирование больших разветвленных трубопроводных систем водоснабжения высокого ранга оптимальности

М. Б. Абазоков✉, В. Ч. Кудаев

Институт прикладной математики и автоматизации –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А

Аннотация. Задача проектирования оптимальных трубопроводных гидравлических систем регионального и межрегионального водоснабжения в настоящее время исключительно актуальна в связи с недостатком водных ресурсов в части регионов России. Для существенно многоэкстремальных задач оптимизации, к которым относится данная задача, локальный экстремум не информативен, а глобальный практически недостижим за экономически оправданное время решения задачи на компьютере. Целью исследования является разработка метода, алгоритмов и программной системы компьютерного проектирования больших разветвленных трубопроводных систем водоснабжения высокого ранга оптимальности. Основа метода состоит в разделении решения задачи синтеза системы, содержащей потоковые и потенциальные переменные (т.е. являющейся сетью Кирхгофа), на две фазы, что существенно снижает ее размерность. На первой фазе определяется структура, на второй – значения гидравлических параметров сети. Разработанные метод, алгоритм и программная система предназначены для компьютерного проектирования разветвленных трубопроводных систем регионального и межрегионального водоснабжения, а также больших трубопроводных оросительных систем.

Ключевые слова: трубопроводная разветвленная гидравлическая сеть Кирхгофа, компьютерное проектирование, ранговая оптимизация сети, снижение размерности задачи, формула Дарси-Вейсбаха, затраты на трубопроводы, энергетические затраты, насосная станция

Поступила 05.10.2024, одобрена после рецензирования 25.11.2024, принята к публикации 28.11.2024

Для цитирования. Абазоков М. Б., Кудаев В. Ч. Компьютерное проектирование больших разветвленных трубопроводных систем водоснабжения высокого ранга оптимальности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 82–97. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-82-97

MSC: 90C26 Original article

Computer modelling of large branched water pipeline systems with higher-order optimality

M.B. Abazokov✉, V.Ch. Kudaev

Institute of Applied Mathematics and Automation –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street

Abstract. Modelling of optimal hydraulic pipeline for regional and interregional water supply systems is highly relevant because of water scarcity in some parts of Russia. For a multi-extreme optimization problem to which this problem relates a local extremum is not sufficient and an absolute extremum is not possible since it would take a massive amount of computing power to solve. The purpose of the research

© Абазоков М. Б. , Кудаев В. Ч., 2024

is to develop a method, algorithms and software system for computer modelling of large branched water pipeline systems with higher-order optimality. The basis of the method is to divide the synthesis problem with flux and potential variables (Kirchhoff's circuit) into two phases; it allows us to significantly reduce the computation time and resource requirements. The first phase determines the network structure while the second one identifies values of hydraulic parameters. The proposed methodology, algorithm and software are designed for computer modelling of branched water pipelines systems of regional and interregional water supply as well as for large-scale irrigation systems.

Keywords: branched hydraulic pipeline Kirchhoff's circuit, computer modelling, rank optimization, dimensionality reduction, Darcy–Weisbach equation, pipeline costs, energy costs, pump station

Submitted 05.10.2024, approved after reviewing 25.11.2024, accepted for publication 28.11.2024

For citation. Abazokov M.B., Kudaev V.Ch. Computer modelling of large branched water pipeline systems with higher-order optimality. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 82–97. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-82-97

Введение

В настоящее время одной из актуальных является проблема снижения дефицита воды в части регионов России. Поэтому метод решения проблемы должен быть ориентирован на создание больших трубопроводных сетей регионального и межрегионального водоснабжения.

Снижение затрат на создание таких сетей является важной задачей, которая может быть решена только на основе математического моделирования и компьютерного проектирования. Недостатком существующих методов решения этой задачи является то, что задача ставится и решается как чисто потоковая. В работах Сибирского энергетического института [1] эта задача решалась уже как потоковая задача Кирхгофа, т.е. с учетом потоковых и потенциальных переменных.

Метод решения, предложенный в [1], модифицирован в данной работе. Модификация метода состоит в разделении процесса оптимизации на две фазы: на первой фазе определяется структура, на второй – значения потенциальных переменных. Разделение процесса оптимизации на две фазы существенно снижает размерность задачи и время ее решения на компьютере. На этой основе разработана компьютерная система проектирования разветвленных трубопроводных сетей водоснабжения высокого ранга оптимальности.

1. Задача синтеза трубопроводной гидравлической сети

Пусть $\Gamma(B, D)$ – заданный избыточный граф возможных соединений вершин сети; B – множество вершин графа; D – множество дуг графа.

Общая постановка задачи синтеза трубопроводной гидравлической сети состоит в следующем:

$$З(x,h) = \frac{\rho \mathrm{H}_{\mathrm{HC}} Q_{\mathrm{HC}} T}{\eta} + \sum_{(ij)\in D}^{n} c_{ij}\left(x_{ij}, h_{ij}\right) l_{ij} \to min \tag{1}$$

$$\sum_{i\in \mathrm{D}_j^+} x_{ij} - \sum_{k\in \mathrm{D}_j^-} x_{jk} = g_j, \quad \forall j \neq 1 \in B, \tag{2}$$

$$\sum_{j\in \mathrm{D}_j^-} x_{1j} = Q_{\mathrm{HC}}, \tag{3}$$

$$x_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in D \tag{4}$$

$$\mathrm{H}_{\mathrm{HC}_i} = \mathrm{H}_i + z_i - z_{\mathrm{HC}} + \sum_{(rs)\in T_i} h_{rs} l_{rs} \tag{5}$$

$$\mathrm{H}_{\mathrm{HC}} = \max_i \{\mathrm{H}_{\mathrm{HC}_i}\}, \tag{6}$$

где $З(x, h)$ – общие затраты на сеть; ρ – цена в рублях за 1 кВт·ч; H_{HC} – напор на насосной станции; Q_{HC} – общий поток в сеть; T – заданное время эксплуатации сети в часах; η – коэффициент полезного действия (КПД); i – номер вершины истока, j – номер вершины стока (ij)-й ветви; x_{ij} – поток по ветви; h_{ij} – удельные потери напора по ветви; l_{ij} – длина ветви; $c_{ij}(x_{ij}, h_{ij})$ – удельная стоимость ветви, которая вычисляется по формуле:

$$c_{ij}(x_{ij}, h_{ij}) = a + b d_{ij}^{\alpha},$$

где b – цена за 1 метр трубы диаметром 1 метр; d_{ij} – диаметр трубы по ветви.

Для различных материалов труб коэффициенты α, β, γ, k определяются из табл. 1 (таблица сформирована нами на основе сведений из [2]).

Таблица 1. Значения гидравлических параметров труб из различных материалов

Table 1. Values of hydraulic parameters of pipes made of different materials

Материал труб	Коэффициенты			
	α	β	γ	k
Сталь	1,4	2	5,3	0,001735
Чугун	1,6	2	5,3	0,001735
Асбестоцемент	1,95	1,85	4,89	0,001180
Пластмасса	**1,95**	**1,774**	**4,774**	**0,001052**

Представим таблицу полиэтиленовых труб, активно использующихся при проектировании больших разветвленных трубопроводных гидравлических сетей[1].

Исходя из табл. 2 были определены следующие значения коэффициентов a, b:

$a = 0, b = 17400$ (руб.).

Диаметр труб вычисляется по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$d_{ij} = \left(\frac{k x_{ij}{}^{\beta}}{h_{ij}}\right)^{\frac{1}{\gamma}}.$$

D_j^+ – множество дуг, входящих в узел j; D_j^- – множество дуг, исходящих из узла j; g_j – заданный расход потока в j-м узле сети; источником является вершина под номером 1; H_i – нормативный напор в i-й вершине; z_i – высота i-й вершины; z_{HC} – высота вершины, в которой находится насосная станция; T_i – траектория, состоящая из ветвей, ведущих из источника в i-ю вершину; (rs) – ветви сети, находящиеся на траектории T_i; $\sum_{(rs)\in T_i} h_{rs} l_{rs}$ – полные потери напора по траектории, ведущей из источника в i-ю вершину; $\mathrm{H}_{\mathrm{HC}_i}$ – необходимый напор на насосной станции, обеспечивающий i-ю вершину ее заданным нормативным напором.

[1]ГОСТ 18599-2001 Трубы водопроводные напорные ПЭ 100. ООО «ПСТ ЮГ»

Таблица 2. Трубы водопроводные напорные ПЭ 100

Table 2. Pressure water pipes PE 100

Диаметры труб (мм)	Цена (руб.)
50	46,20
63	73,20
75	100,20
90	145,35
110	213,00
125	274,50
140	346,50
160	454,50
180	567,00
200	702,00
225	882,00
250	1093,50
280	1363,50
315	1740,00
355	2190,00
400	2790,00
450	3525,00
500	4350,00
560	5445,00
630	6900,00
710	8775,00
800	11115,00
900	14070,00
1000	17400,00
1200	25050,00

Функция $c_{ij}(x_{ij}, h_{ij})$ для $\forall(i,j) \in D$ является гладкой и строго вогнутой по x_{ij} и выпуклой по h_{ij}. Вследствие вогнутости функции по x_{ij} задача (1)–(6) является существенно многоэкстремальной. Ввиду высокой сложности задачи (1)–(6) сначала решается более простая, потоковая задача и уже на основе ее решения находится решение общей задачи.

2. Задача синтеза разветвленной потоковой сети

Задача синтеза разветвленной потоковой сети состоит в следующем:

$$З(x) = \sum_{ij \in D} c_{ij}(x_{ij}) l_{ij} \rightarrow min, \tag{7}$$

$$\sum_{i \in D_j^+} x_{ij} - \sum_{k \in D_j^-} x_{jk} = g_j, \quad \forall j \neq 1 \in B, \tag{8}$$

$$\sum_{j \in D_j^-} x_{1j} = Q, \tag{9}$$

$$x_{ij} \geq 0, \forall(i,j) \in D, \tag{10}$$

где $\Gamma(B, D)$ – заданный избыточный граф возможных соединений вершин сети; B – множество вершин графа; D – множество дуг графа; $З(x)$ – затраты на потоковую сеть; x_{ij} и l_{ij} – значения величины потока и длина (i,j)-й дуги; $c_{ij}(x_{ij})$ – заданная функция удельной

стоимости; Q – заданный поток в сеть; g_j – заданный расход потока в j-м узле сети. D_j^+ – множество дуг, входящих в узел j; D_j^- – множество дуг, исходящих из узла j.

Функция $c_{ij}(x_{ij})$ для $\forall(i,j) \in D$ является гладкой и строго вогнутой. Поэтому задача (7)–(10) является существенно многоэкстремальной, т.к. локальные экстремумы задачи (7)–(10), вообще говоря, достигаются во всех вершинах транспортного многогранника (8)–(10), а глобальный в одной из них.

2.1. Существующие методы решения потоковой задачи и их недостатки

Недостатки существующих методов [3–5] рассмотрены в монографии [1, с. 114–123]. Основной недостаток состоит в том, что уже при $n > 80$ (где n – количество узлов сети) существующие методы поиска глобального минимума не срабатывают.

Метод погружения решения задачи минимизации вогнутой функции на выпуклом многограннике изложен в работе [6]. В работах [3–4] данный метод модифицирован для решения задачи синтеза потоковой сети с целевой функцией (7) на транспортном многограннике (8)–(10).

Метод ветвей и границ, представленный в работе [5], основан на последовательном делении множества допустимых решений с отбрасыванием подмножеств, имеющих высокую нижнюю оценку минимизируемой функции. Теоретически это обеспечивает получение глобального минимума, но с заданной допустимой погрешностью.

Также следует отметить работу авторов Е. Р. Ставровского и Р. А. Трунова «Новые задачи и компьютерные программы оптимизации конфигурации и параметров региональных газораспределительных сетей при их проектировании» (см. [7, с. 97–108]).

2.2. Метод ранговой оптимизации разветвленной потоковой сети

Для существенно многоэкстремальных задач большой размерности локальный экстремум не информативен, а глобальный, вообще говоря, недостижим за экономически оправданное время решения задачи на компьютере. Поэтому в наших работах [8–12] было введено и использовано понятие ранга экстремума решения задачи синтеза потоковой сети.

Определение 1. Точкой экстремума Р-го ранга задачи (7)–(10) назовем такую угловую точку $\{x_{ij}^*\}_{ij\in D}$ транспортного многогранника (8)–(10), которая является точкой глобального минимума на выпуклой линейной комбинации вершин многогранника Р-достижимых из этой точки.

Как известно, любой точке (вершине) транспортного многогранника соответствует базисное решение. Переведем определение 1 на язык теории сетей.

Определение 2. P-фрагментом сети назовем замыкаемые любыми P хордами графа $\Gamma(B,D)$ P контуров на текущем остовном дереве T графа $\Gamma(B,D)$.

Теорема (условие ранговой оптимальности для сетевой задачи).

1) Отличные от нуля компоненты потокораспределения $\{x_{ij}^*\}_{ij\in D}$ сети Р-го ранга выделяют на графе $\Gamma(B,D)$ ориентированное остовное дерево с корнем в источнике сети.

2) Экстремум Р-го ранга является глобальным на выпуклой линейной комбинации вершин транспортного многогранника, имеющих смежность в промежутке $[1,P]$ к точке экстремума.

3) Для того чтобы решение $\{x_{ij}^*\}_{ij\in D}$, где $x_{ij} = 0\ \forall(i,j) \notin T$, задачи (7)-(10) было экстремумом Р-го ранга, необходимо и достаточно, чтобы оно было оптимально по всем фрагментам Р-го ранга на T, т.е.

$$\sum_{(i,j)\in\Phi_{T,P}} c_{ij}(x_{ij}^*)\, l_{ij} \le \sum_{(i,j)\in D} c_{ij}(x_{ij})\, l_{ij},$$

где $\{x_{ij}\}_{ij\in D}$ *– любое допустимое решение задачи, но такое, что* $x_{ij} = x_{ij}^{*}\ \forall(i,j) \notin \Phi_{T,P}$.

Доказательство теоремы приведено в работе [13].

Отметим, что условие ранговой оптимальности является конкретизацией системного принципа оптимальности: «Любая часть оптимальной системы оптимальна (при фиксации граничных условий с остальной сетью)».

Метод ранговой оптимизации сетевых систем, представленный в наших работах [8–13], состоит в сведении оптимизации сети к оптимизации ее фрагментов все более высокого ранга. При этом рассмотрение только связных Р-фрагментов существенно снижает размерность задачи.

Суть метода ранговой оптимизации разветвленной потоковой сети состоит в следующем.

При оптимизации 1-го ранга на очередной итерации выделяется очередная хорда (i,j) и соответствующий ей фрагмент 1-го ранга (контур сети) на Т. Из фрагмента удаляется дуга, встречная хорде. Проведя оптимизацию полученного фрагмента, определяем очередную независимую переменную относительно полученного решения и переходим к оптимизации соответствующего фрагмента. Процесс оптимизации 1-го ранга системы завершается при получении решения, которое не может быть улучшено внесением в оптимизируемое текущее остовное дерево любой из его хорд и соответствующим изменением потоков по образованному при этом контуру.

Далее переходим к оптимизации 2-го ранга. Для этого выделяем на каждой очередной итерации очередную пару хорд и соответствующие им фрагменты 1-го ранга. В том случае, когда эти фрагменты пересекаются, формируем фрагмент 2-го ранга – объединение двух фрагментов 1-го ранга. Решаем задачу оптимизации фрагмента 2-го ранга и переходим к следующей итерации.

Оптимизация системы прекращается при достижении заданного оптимума Р-го ранга либо заданного времени решения задачи на компьютере. *При этом, если фрагменты Р-го ранга не пересекаются, программная система их не рассматривает, т.к. их оптимизация уже была проведена при построении сети (Р-1)-го ранга. Это резко снижает размерность задачи синтеза сети. Таким образом, метод ранговой оптимизации сетевых систем состоит в сведении оптимизации сети к оптимизации только ее связных фрагментов Р-го ранга.*

3. Разбиение решения задачи синтеза разветвленной потоковой сети на две фазы и теорема о согласовании фаз решения

3.1. Метод А. П. Меренкова, В. Я. Хасилева, О. А. Некрасовой

В работе [1] изложены методы оптимального проектирования разветвленных трубопроводных сетей, разработанные в Сибирском энергетическом институте (г. Иркутск). Основу методов составили работы А. П. Меренкова, В. Я. Хасилева и О. А. Некрасовой [14, 2]. В основе метода Меренкова–Хасилева–Некрасовой (метод МХН) лежит зависимость стоимости каждой i-й ветви сети от диаметра трубы на ней, стоимостных коэффициентов a и b и гидравлического коэффициента $0 < \alpha \leq 2$.

$$c_i = a + bd_i^{\alpha}, \tag{11}$$

где a, b и α зависят от материала труб.

На основе формулы типа Дарси–Вейсбаха $h_i = \frac{kx_i^{\beta}}{d_i^{\gamma}}$ получим

$$d_i = \left(\frac{kx_i^{\beta}}{h_i}\right)^{1/\gamma}. \tag{12}$$

Из (11), (12) и с учетом того, что $a = 0$, получим

$$c_i = bk^{\frac{\alpha}{\gamma}} x_i^{\frac{\alpha\beta}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}}.$$

В методе МХН решается задача минимизации капитальных затрат $З(x, h)$ на сеть при заданных энергетических затратах Э и общего потока в сеть Q от источника:

$$З(x,h) = \sum_{i=1}^{n} \left(bk^{\frac{\alpha}{\gamma}} x_i^{\frac{\alpha\beta}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} \right) l_i \to min, \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i h_i l_i = Э, \tag{14}$$

$$Ax = Q, \tag{15}$$

где A – заданная матрица возможных соединений узлов сети друг с другом, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор потоков; x_i, h_i – неизвестный поток и удельная потеря напора по i-й ветви матрицы; α, β, γ – гидравлические параметры, зависящие от материала труб сети; b, k – заданные коэффициенты; l_i – длина i-й ветви сети.

Значения гидравлических и стоимостных данных по трубам из различных материалов представлены в табл. 1, сформированной нами на основе методов определения потерь напора в водопроводных трубах [2, с. 54–55].

Снизить размерность задачи (13)–(15) позволяет разделение решения задачи оптимального проектирования на две фазы: на первой фазе решается задача трассировки сети (определение потоков по ветвям сети), на второй фазе – задача (13)–(15) при известных потоках.

3.2. Метод трассировки сети (1-я фаза)

Общие затраты (капитальные и энергетические) на всю сеть будем оценивать функцией

$$F(x,h) = \sum_{i}^{n} \left(bk^{\frac{\alpha}{\gamma}} x_i^{\frac{\alpha\beta}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} + px_i h_i \right) l_i. \tag{16}$$

Поскольку функция затрат (16) строго выпуклая и гладкая по h_i, то находим производную по h_i, приравниваем ее к нулю, находим значения h_i, подставляем в (16) и после ряда преобразований получим

$$F(x) = \left(\left(\frac{\gamma}{\alpha}\right)^{\frac{\alpha}{\alpha+\gamma}} + \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right)^{\frac{\gamma}{\alpha+\gamma}} \right) b^{\frac{\gamma}{\alpha+\gamma}} (pk)^{\frac{\alpha}{\alpha+\gamma}} \sum_{i} x_i^{\frac{\alpha\beta+\alpha}{\alpha+\gamma}} l_i.$$

Введя обозначения

$$\eta = \left(\left(\frac{\gamma}{\alpha}\right)^{\frac{\alpha}{\alpha+\gamma}} + \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right)^{\frac{\gamma}{\alpha+\gamma}} \right) b^{\frac{\gamma}{\alpha+\gamma}} (pk)^{\frac{\alpha}{\alpha+\gamma}}, \qquad \delta = \frac{\alpha\beta+\alpha}{\alpha+\gamma},$$

окончательно получим

$$F(x) = \eta \sum_{i} x_i^{\delta} l_i. \tag{17}$$

Величины η и δ зависят только от материала труб, используемых для создания сети и не зависят от потоков. **Таким образом, приходим к чисто потоковой задаче, поскольку η и δ являются константами на заданном сортаменте труб**.

Поскольку же $0 < \delta < 1$, то есть потоковая функция x_i^{δ} строго вогнута по потоку x_i. Вследствие этого локальные и глобальные экстремумы функции затрат (17) следует ис-

кать только на остовных деревьях заданного избыточного графа возможных соединений узлов сети друг с другом.

3.3. Метод определения оптимальных параметров разветвленной трубопроводной гидравлической сети при заданных потоках (2-я фаза)

При найденных в ходе решения задачи трассировки потоках $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ задача (13)–(15) переходит в задачу:

$$\begin{cases} З(h) = \sum_{i=1}^{n} \left(bk^{\frac{\alpha}{\gamma}} x_i^{*\frac{\alpha\beta}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} \right) l_i \to min, \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^* h_i l_i = Э. \end{cases}$$

Решая ее методом Лагранжа, получим

$$h_i = \frac{Э x_i^{*\frac{\alpha\beta-\gamma}{\alpha+\gamma}}}{\sum_{j=1}^{n} x_j^{*\frac{\alpha\beta+\alpha}{\alpha+\gamma}} l_j}$$

для любого $i = j$, $x_i^* = x_j^*$.

Поскольку значения $x_i^*, i = \overline{1,n}$ известны, то, вычислив сумму в знаменателе дроби и обозначив ее M

$$M = \sum_{j=1}^{n} x_j^{*\frac{\alpha\beta+\alpha}{\alpha+\gamma}} l_j,$$

определим h_i^*

$$h_i^* = \frac{Э x_i^{*\frac{\alpha\beta-\gamma}{\alpha+\gamma}}}{M}, i = \overline{1,n}$$

Подставив найденные значения h_i^* и x_i^* в (12), получим диаметры d_i, а подставляя d_i в (11), получим удельную стоимость трубопроводов водопроводной сети.

Теорема (о коммутации фаз решения задачи синтеза потоковой сети).

С ростом ранга оптимальности решения задачи трассировки (1-я фаза) уменьшаются и затраты на создание гидравлической трубопроводной сети при заданных фиксированных энергетических затратах (2-я фаза), т.е. если $З_{Ф_1}^P$ *и* $З_{Ф_1}^{P+1}$ *– соответственно оценки затрат на создание сетей P-го и* $(P+1)$*-го рангов оптимальности на первой фазе оптимизации,* $З_{Ф_2}^P$ *и* $З_{Ф_2}^{P+1}$ *– оценки затрат на второй фазе,* x_i^*, x_i^{**}, $i = \overline{1,n}$ *– потоки на сети i-го и* $(P+1)$*-го рангов, тогда*

$$\frac{З_{Ф_1}^{P+1}(x^{**})}{З_{Ф_1}^{P}(x^{*})} = r < 1 \quad \Longrightarrow \quad \frac{З_{Ф_2}^{P+1}(x^{**})}{З_{Ф_2}^{P}(x^{*})} = r^{\frac{\alpha}{\gamma}+1} < 1.$$

Доказательство этой теоремы приведено в нашей работе [11].

4. Вычислительный эксперимент по оптимизации структуры (1-я фаза)

Был проведен вычислительный эксперимент на плотном базовом графе (см. рис. 1а). За основу взята одна из подсетей крупнейшей на Юге России (Ставропольский край) Лево-Егорлыкской трубопроводной оросительной системы. Была запущена 5-оптимизация с остовного дерева сети со структурой, приведенной на рис. 1б.

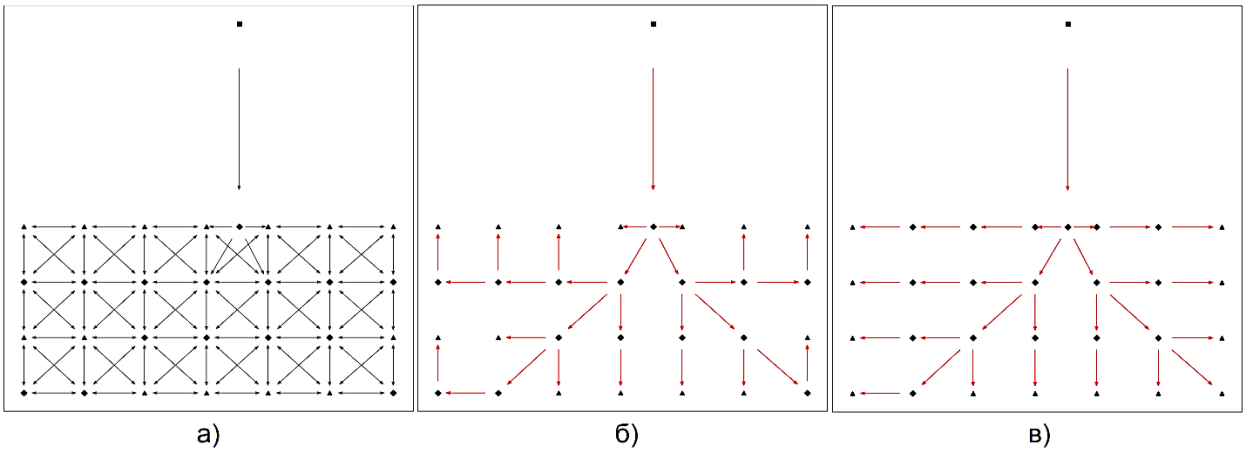


Рис. 1. *Базовый граф, структура начального остовного дерева, структура 5-оптимальной сети*

Fig. 1. *Basic graph, structure of the initial spanning tree, structure of the 5-optimal network*

В процессе 5-оптимизации структура исходной сети была преобразована в структуру, приведенную на рис. 1в. Краткая информация по оптимизации представлена в табл. 3.

Таблица 3. Информация по оптимизации

Table 3. Optimization information

Показатель	Начало	Конец
Структура	Рис. 1б	Рис. 1в
Время	13:55	22:23
Стоимость (потоковая)	9093,770 у.е.	8643,053 у.е.
Процент оптимизации	≈ 4,96 %	

Дальнейшая оптимизация потерь напора, диаметров труб и общей стоимости сети будет проводиться на структуре, приведенной на рис. 1в, что следует из теоремы о коммутации фаз решения задачи синтеза потоковой сети.

5. Суть алгоритма оптимизации общей стоимости сети

После того как структура определена и потоки по ней известны, переходим к оптимизации потерь напора, диаметров труб и общей стоимости сети (т.е. затрат на создание и эксплуатацию сети).

Для начала следует найти начальное значение энергии, которое будет затрачиваться на работу сети («Алгоритм подсчета начальной энергии»). Далее находится такой напор на насосной станции (НС), который сможет обеспечить каждый узел сети требуемым напором воды («Алгоритм подсчета напора на насосной станции»). Далее находится общая стоимость всей сети с учетом энергии, напора на НС, времени работы, КПД НС, длин и стоимости каждой ветви сети, зависящей от диаметров труб, которые, в свою очередь, зависят от напоров и потока на каждой ветви сети («Алгоритм подсчета полных затрат»).

Однако данная общая стоимость сети, являющаяся оптимальной по затратам на трубы, не является оптимальной по энергетическим затратам. Поэтому для решения задачи (1)–(6) следует постепенно снижать значение энергии (например, на 1 %) и высчитывать общую стоимость сети до тех пор, пока снижается общая стоимость всей сети («Алгоритм оптимизации полных затрат на сеть»).

Далее приведены все указанные алгоритмы.

6. Алгоритмы

6.1. Вводные данные

Задана структура (дерево) сети, т. е. заданы:

• вершины дерева (соответственно их координаты и потребление в них, а также нормативный напор, т.е. это тот напор, который нужно предоставить/поставить в каждую вершину);

• дуги дерева (а значит, уже посчитаны потоки по трубам).

Насосная станция ставится в вершине-источнике.

6.2. Алгоритм подсчета начальной энергии ($Э_0$)

1) **Считаем удельные потери напора** h_i по каждой ветви дерева по формуле

$$h_i = \left(\frac{\alpha b}{\gamma p}\right)^{\frac{\gamma}{\alpha+\gamma}} k^{\frac{\alpha}{\alpha+\gamma}} x_i^{\frac{\alpha\beta-\gamma}{\alpha+\gamma}},$$

где $b = 17400$ – цена в рублях за 1 метр трубы диаметра 1 метр; $p = 5{,}68$ – цена за 1 киловатт-час; i – номер ветви; x_i – поток по ветви; α, β, γ, k – коэффициенты из табл. 1.

2) **Считаем начальную энергию** $Э_0$ по формуле

$$Э_0 = \sum_{i=0}^{n} x_i h_i l_i,$$

где i – номер ветви дерева; x_i – поток по ветви; l_i – длина ветви; h_i – удельные потери напора по ветви.

6.3. Алгоритм подсчета напора на насосной станции ($Н_{НС}$)

1) Вычисляем величину M по формуле

$$M = \sum_{i=1}^{n} x_i^{\frac{\alpha(\beta+1)}{\alpha+\gamma}} l_i$$

2) Для каждой ветви j вычисляется h_j (удельная потеря напора по *j*-й ветви) по формуле

$$h_j = \frac{Э_0 x_j^{\frac{\alpha\beta-\gamma}{\alpha+\gamma}}}{M}.$$

3) Для каждой вершины i находим T_i – траекторию из веток, ведущую из источника в *i*-ю вершину.

4) Для каждой вершины i находим $Н_{НС_i}$ (т.е. напор на насосной станции, который требуется для обеспечения этой вершины i требуемым ей напором) по формуле

$$Н_{НС_i} = Н_i + z_i - z_{НС} + \sum_{j \in T_i} h_j l_j,$$

где $Н_i$ – нормативный напор в *i*-й вершине, z_i – высота *i*-й вершины, $z_{НС}$ – высота насосной станции (точнее высота вершины, где находится насосная станция), $\sum_{j \in T_i} h_j l_j$ – полные потери напора по *j*-й дуге, *j* – номер дуг дерева (ветви).

5) Находим $Н_{НС}$ как максимум из всех $Н_{НС_i}$, т. е.

$$Н_{НС} = \max_i \{Н_{НС_i}\}.$$

6.4. Алгоритм подсчета полных затрат ($З_0$)

Найти $З_0$ ($З_0$ – полные затраты на сеть).

$$З_0 = З_{\text{энергетические}} + З_{\text{труб}},$$

$$З_{\text{энергетические}} = \frac{\rho Н_{НС} Q_{НС} T}{\eta},$$

где $З_{энергетические}$ – энергетические затраты на эксплуатацию сети в рублях;

$\rho = 5{,}68$ – это цена за 1 киловатт-час; $Н_{НС}$ – напор на насосной станции; $Q_{НС}$ – общий поток в сеть (его можно найти как сумму потреблений во всех вершинах или сумму потоков всех ветвей, выходящих из вершины-источника); $T = 365 * 24 = 8670$ ч. – время эксплуатации сети в часах; $\eta = 0{,}7(70\%)$ – коэффициент полезного действия.

$$З_{труб} = \sum_{i=1}^{n} c_i l_i,$$

где $З_{труб}$ – затраты на трубы в рублях; i – номер ветви; l_i – длина i-й ветви; c_i – удельная цена i-й ветви. Вычисляется она так:

$$c_i = b d_i^{\alpha},$$

где $b = 17400$ – цена за 1 метр трубы диаметра 1 метр; d_i – диаметр i-й ветви. Вычисляется диаметр по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$d_i = \left(\frac{k {x_i}^{\beta}}{h_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}},$$

где β, γ, k – это коэффициенты из табл. 1 (для пластмассы); x_i – поток по ветви; h_i – удельные потери напора по ветви.

6.5. Алгоритм оптимизации полных затрат на сеть

1. Находится $Э_0$ и $З_0$.
2. Уменьшается $Э_0$ на 1 %, и это значение присваивается в $Э_1$, т.е. $Э_1 = Э_0 * 0{,}99$.
3. Находится $З_1$ по двум последним алгоритмам («Алгоритм подсчета напора на насосной станции» и «Алгоритм подсчета полных затрат»), только вместо $Э_0$ используется $Э_1$.
4. Переменной i присваивается значение 1.
5. Пока $З_{i-1} > З_i$, выполняются следующие операции:
   5.1. Увеличивается i на единицу.
   5.2. $Э_i = Э_{i-1} * 0{,}99$.
   5.3. Находится $З_i$ по двум последним алгоритмам, используя в качестве значения энергии значение $Э_i$.
6. Так как $З_{i-1} \leq З_i$, это значит, что $З_{i-1}$ и есть оптимальные общие затраты на сеть.

7. Вычислительный эксперимент по оптимизации параметров сети (2-я фаза)

Результаты вычислительного эксперимента по оптимизации общей стоимости сети представлены в табл. 4.

Таблица 4. Оптимизация общей стоимости сети

Table 4. Optimization of the total network cost

Итерация	Энергия ($м^5/с$)	Общая стоимость сети (руб.)
0	187126,94	19152897659,27
1	185255,67	18961541384,83
2	183403,11	18772098822,23
…	…	…
690	182,15	76433358,13
691	180,32	76428941,50
692	**178,52**	**76427135,69**
693	176,74	76427925,16

Жирным выделена оптимальная общая стоимость сети.

Ниже идут таблицы с информацией о вершинах (табл. 5) и дугах (ветвях) сети (табл. 6).

Вершины под номерами 1 и 33 особенные (выделены жирным). Вершина 1 является вершиной-источником, а значит, она обеспечивает все вершины требуемым им напором. Вершина 33 не является потребителем потока. Ввиду этого вершины 1 и 33 не требуется обеспечивать напором. В остальных вершинах требуемый напор равен 64,40.

Таблица 5. Информация о вершинах

Table 5. Information about the peaks

№ вершины	Высота вершины (метр)	Требуемый напор на насосной станции для этой вершины (метр)	Реальный напор, поставляемый в эту вершину (метр)
1	**156**	**262,38**	**(исходящий напор) 262,38**
2	203,6	262,38	64,4
3	204,2	237,28	89,5
4	204,7	231,74	95,03
5	207,6	231,13	95,65
6	211	235,09	91,68
7	210,4	240,09	86,68
8	208,9	250,21	76,57
9	190,2	239,68	87,1
10	192,5	216,29	110,49
11	195,3	196,65	130,13
12	199,3	197,13	129,65
13	202,2	200,6	126,18
14	206,6	210,6	116,18
15	198,7	229,75	97,02
16	183	227,83	98,95
17	186,3	205,43	121,34
18	188,5	185,19	141,58
19	192,8	168,19	158,59
20	192,7	168,66	158,12
21	184,9	183,83	142,95
22	177,5	203,48	123,3
23	178,5	215,94	110,83
24	182	193,75	133,03
25	183,4	172,71	154,07
26	177,7	145,71	181,07
27	173,2	140,52	186,25
28	165,4	155,69	171,09
29	164,4	181,74	145,03
33	**172,5**	**65,52**	**196,86**

Используются пластмассовые (полиэтиленовые) трубы. Соответствующие им коэффициенты α, β, γ, k определяются из табл. 1 (выделено жирным).

Напор на насосной станции (в метрах): 262,376.

Общий поток в сеть (в кубометрах): 1.708.

Общее время работы сети (в часах): 8760.

КПД: 0.7 (70%).

Цена 1 киловатт-час (в рублях): 5,68.

Таблица 6. Информация о дугах (ветвях) сети

Table 6. Information about network arcs (branches)

№ дуги	Вершины		Поток ($м^3/с$)	Удельные потери напора (метр)	Диаметр трубы (метр)	Удельная стоимость (руб.)	Длина (метр)
	Исток	Сток					
12	14	15	0,061	0,036	0,169	543,539	758,041
17	20	21	0,122	0,031	0,225	949,297	737,041
18	21	22	0,061	0,036	0,169	543,539	758,036
22	27	28	0,122	0,031	0,225	949,297	737,041
23	28	29	0,061	0,036	0,169	543,539	758,001
24	3	2	0,061	0,036	0,169	543,539	720
30	10	9	0,061	0,036	0,169	543,539	720,004
31	11	10	0,122	0,031	0,225	949,297	720,005
36	17	16	0,061	0,036	0,169	543,539	720,008
37	18	17	0,122	0,031	0,225	949,297	720,003
38	19	18	0,183	0,029	0,266	1315,42	740,012
42	24	23	0,061	0,036	0,169	543,539	720,009
43	25	24	0,122	0,031	0,225	949,297	720,001
44	26	25	0,183	0,029	0,266	1315,42	740,022
70	11	4	0,061	0,036	0,169	543,539	720,061
71	12	5	0,061	0,036	0,169	543,539	720,048
72	13	6	0,061	0,036	0,169	543,539	720,054
73	14	7	0,061	0,036	0,169	543,539	720,01
78	19	12	0,122	0,031	0,225	949,297	720,029
79	20	13	0,122	0,031	0,225	949,297	720,063
108	11	3	0,122	0,031	0,225	949,297	1018,27
115	19	11	0,366	0,025	0,354	2297,39	1032,48
148	14	8	0,061	0,036	0,169	543,539	1045,45
153	20	14	0,244	0,027	0,3	1657,96	1030,42
161	33	19	0,732	0,022	0,471	4012,42	818,617
162	33	20	0,549	0,023	0,419	3183,44	798,213
163	33	26	0,244	0,027	0,3	1657,96	389,035
164	33	27	0,183	0,029	0,266	1315,42	344,001
165	1	33	1,708	0,019	0,668	7932,95	2635,05

Энергетические затраты: 31 854 212 руб.

Затраты на трубы: 44 572 923 руб.

Общая стоимость сети: 76 427 135 руб.

Заключение

1. Разработаны метод и алгоритмы компьютерного проектирования больших разветвленных трубопроводных гидравлических сетей высокого ранга оптимальности.

2. В отличие от методов, используемых в проектировании потоковых гидравлических трубопроводных сетей, данный метод предназначен для решения сетевой задачи Кирхгофа, т. е. задачи, содержащей и потоковые, и потенциальные переменные.

3. Разработана программа для проектирования больших разветвленных трубопроводных гидравлических сетей высокого ранга оптимальности.

4. Метод, алгоритм и программа для ЭВМ предназначены для решения актуальной в настоящее время задачи компьютерного проектирования сетей регионального и межрегионального водоснабжения, а также больших трубопроводных оросительных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Меренков А. П., Сеннова Е. В., Сумароков С. В. и др.* Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.

2. *Абрамов Н. Н., Поспелова М. М., Сомов М. А. и др.* Расчет водопроводных сетей. М.: Стройиздат, 1983. 278 с.

3. *Булатов В. П., Кассинская Л. И.* Некоторые методы минимизации вогнутой функции на выпуклом многограннике // В кн. Методы оптимизации и их приложения. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1987. С. 151–172.

4. *Анциферов Е. Г., Ащепков Л. Т., Булатов В. П.* Методы оптимизации и их приложения. Ч. 1. Математическое программирование. Новосибирск: Наука, 1990. 158 с. ISBN: 5-02-029658-9

5. *Трубин В. А., Михалевич В. С., Шор Н. З.* Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования. М.: Наука, 1986. 260 с.

6. *Туй Х.* Вогнутое программирование при линейных ограничениях // Доклады АН СССР. 1964. Т. 159. № 1. С. 32–35.

7. *Ставровский Е. Р., Трунов Р. А.* Новые задачи и компьютерные программы оптимизации конфигурации и параметров региональных газораспределительных сетей при их проектировании // Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 2007. С. 97–108. ISBN: 978-5-02-023193-1

8. *Кудаев В. Ч., Абазоков М. Б.* Ранговая оптимизация потоковых сетей // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 4(24). С. 178–185. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-178-185

9. *Кудаев В. Ч., Абазоков М. Б.* Компьютерное проектирование потоковых сетей Р-го ранга оптимальности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 6(92). С. 122–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-6-92-122-131

10. *Кудаев В. Ч., Абазоков М. Б.* Кустовая оптимизация высокого ранга оптимальности потоковых сетей // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 37. № 4. С. 104–118. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-104-118

11. *Абазоков М. Б., Багов М. А., Кудаев В. Ч.* Компьютерное проектирование больших трубопроводных сетей высокого ранга оптимальности // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2022. Т. 22. № 4. С. 39–56. DOI: 10.47928/1726-9946-2022-22-4-39-56

12. *Абазоков М. Б., Кудаев В. Ч.* Трассировка больших разветвленных трубопроводных гидравлических сетей высокого ранга оптимальности на динамическом базовом графе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 4(114). С. 39–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-4-114-39-54

13. *Кудаев В. Ч.* Ранги экстремумов и структурная оптимизация больших сетевых систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 4(72). С. 15–24. EDN: WKDXXX

14. *Некрасова О. А., Хасилев В. Я.* Оптимальное дерево трубопроводной системы // Экономика и математические методы. 1970. Т. 4. № 3. С. 427–432.

REFERENCES

1. Merenkov A.P., Sennova E.V., Sumarokov S.V. et al. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya sistem teplo-, vodo-, nefte- i gazosnabzheniya* [Mathematical modeling and optimization of heat, water, oil and gas supply systems]. Novosibirsk: Nauka, 1992. 407 p. (In Russian)

2. Abramov N.N., Pospelova M.M., Somov M.A. et al. *Raschet vodoprovodnykh setey* [Calculation of water supply networks]. Moscow: Stroyizdat, 1983. 278 p. (In Russian)

3. Bulatov V.P., Kassinskaya L.I. Some methods for minimizing a concave function on a convex polyhedron. *Metody optimizatsii i ikh prilozheniya* [Optimization Methods and Applications]. Irkutsk: SEI SO AN USSR, 1987. Pp. 151–172. (In Russian)

4. Antsiferov E.G., Ashchepkov L.T., Bulatov V.P. *Metody optimizatsii i ikh prilozheniya. Ch. 1. Matematicheskoye programmirovaniye* [Methods of optimization and their applications. Part 1. Mathematical programming]. Novosibirsk: Nauka, 1990. 158 p. ISBN: 5-02-029658-9. (In Russian)

5. Trubin V.A., Mikhalevich V.S., Shor N.Z. *Optimizatsionnyye zadachi proizvodstvenno-transportnogo planirovaniya* [Optimization problems of production and transport planning]. Moscow: Nauka, 1986. 260 p. (In Russian)

6. Tui H. Concave programming under linear constraints. *Doklady AN SSSR.* 1964. Vol. 159. No. 1. Pp. 32–35. (In Russian)

7. Stavrovskiy E. R., Trunov R. A. *Novye zadachi i komp'yuternye programmy optimizatsii konfiguratsii i parametrov regional'nykh gazoraspredelitel'nykh setey pri ikh proektirovanii* [New tasks and computer programs for optimizing the configuration and parameters of regional gas distribution networks and their design]. *Truboprovodnye sistemy energetiki. Metody matematicheskogo modelirovaniya i optimizatsii*: *sb. nauch. tr*. Novosibirsk: Nauka, 2007. Pp. 97–108. ISBN: 978-5-02-023193-1. (In Russian)

8. Kudaev V.Ch., Abazokov M.B. Rank optimization of streaming networks. *Vestnik KRAUNC.* Phys.-Math. Sciences. 2018. No. 4(24). Pp. 178–185. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-178-185. (In Russian)

9. Kudaev V.Ch., Abazokov M.B. Computer design of flow networks of P-th rank of optimality. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2019. No. 6(92). Pp. 122–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-6-92-122-131. (In Russian)

10. Kudaev V.Ch., Abazokov M.B. Cluster optimization of high-rank optimality of flow networks. *Vestnik KRAUNC*. Phys.-Math. Sciences. 2021. Vol. 37. No. 4. Pp. 104–118. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-104-118. (In Russian)

11. Abazokov M.B., Bagov M.A., Kudaev V.Ch. Computer design of large pipeline networks of high optimality rank. *Adyghe International Scientific Journal*. 2022. No. 4. Vol. 22. Pp. 39–56. DOI: 10.47928/1726-9946-2022-22-4-39-56. (In Russian)

12. Abazokov M.B., Kudaev V.Ch. Tracing of large branched pipeline hydraulic networks of high optimality rank with graph presentation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 4(114). Pp. 39–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-4-114-39-54. (In Russian)

13. Kudaev V.Ch. Ranks of extremums and structural optimization of large network systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2016. No. 4(72). Pp. 15–24. EDN: WKDXXX. (In Russian)

14. Nekrasova O.A., Khasilev V.Ya. Optimal tree of a pipeline system. *Ekonomika i matematicheskiye metody* [Economics and Mathematical Methods]. 1970. Vol. 4. No. 3. Pp. 427–432. (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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Абазоков Мухаммед Борисович, мл. науч. сотр., отдел вычислительных методов, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;
Abazokov.Mukhammed@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6847-403X, SPIN-код: 3343-5679
Кудаев Валерий Черимович, канд. ф.-м. наук, вед. науч. сотр., отдел вычислительных методов, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;
valeriy.kudayev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4199, SPIN-код: 9931-1060

Information about the authors

Mukhammed B. Abazokov, Junior Researcher, Department of Computational Methods, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;
Abazokov.Mukhammed@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6847-403X, SPIN-code: 3343-5679
Valery Ch. Kudaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lead Researcher, Department of Computational Methods, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;
valeriy.kudayev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4199, SPIN-code: 9931-1060

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 519.1:519.853.4:004.94 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-98-114
EDN: DKZOAA

Математическое моделирование и компьютерное проектирование больших разветвленных трубопроводных сетей водоснабжения Кирхгофа–Штейнера

М. А. Багов

Институт прикладной математики и автоматизации –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А

Аннотация. Задача создания систем компьютерного проектирования сетей водоснабжения в настоящее время исключительно актуальна в связи с недостатком водных ресурсов в части регионов России. В статье представлен метод преобразования заданного решения проектной организации, содержащего структуру сети, в 2-оптимальную сеть Кирхгофа–Штейнера, т.е. в такую сеть, которую нельзя улучшить никаким изменением структуры и координат точек Штейнера ее любой подсети, состоящей из 2-достижимых из любой вершины графа сети. Разработаны алгоритмы и программная система компьютерного проектирования потоковой сети Кирхгофа–Штейнера для регионального и межрегионального водоснабжения и больших оросительных систем. Проведенный вычислительный эксперимент подтвердил эффективность системы компьютерного проектирования.

Ключевые слова: трубопроводная разветвленная сеть водоснабжения, преобразование, сеть Кирхгофа–Штейнера, математическое моделирование и компьютерное проектирование, оптимизация 2-го ранга, целевая функция, затраты на трубопроводы, энергетические затраты, насосная станция

Поступила 15.10.2024, одобрена после рецензирования 05.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Багов М. А. Математическое моделирование и компьютерное проектирование больших разветвленных трубопроводных сетей водоснабжения Кирхгофа–Штейнера // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 98–114. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-98-114

MSC: 90C26 Original article

Mathematical modeling and computer design for water distribution system based on Kirchhoff-Steiner large branched network

M.A. Bagov

Institute of Applied Mathematics and Automation –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street

Abstract. A design of optimal hydraulic pipeline for regional and interregional water supply systems is highly relevant due to water scarcity in part of Russian regions. The article presents a method for transforming a network structure into a 2-optimal Kirchhoff–Steiner network, i.e. such a network that cannot be improved by any change in the structure and coordinates of Steiner points of any subnet consisting of 2-reachable points from any vertex in the graph. Algorithms and a software system for computer-aided design of a Kirchhoff–Steiner flow network for regional and interregional water supply

© Багов М. А., 2024

and large irrigation systems have been developed. The computational experiments verified a high efficiency of the computer-aided approach proposed.

Keywords: branched pipeline water supply network, transformation, Kirchhoff-Steiner network, mathematical modeling and computer design, rank 2 optimization, objective function, pipeline costs, energy costs, pumping station

Submitted 15.10.2024, approved after reviewing 05.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Bagov M.A. Mathematical modeling and computer design for water distribution system based on Kirchhoff-Steiner large branched network. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 98–114. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-98-114

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем является снижение дефицита воды в части регионов России. Отметим основные цели представляемой работы:

1. Преобразование заданной проектной организацией структуры распределительной сети водоснабжения в оптимальную трубопроводную сеть Кирхгофа–Штейнера.

2. Расчет общих затрат на создание и эксплуатацию сети водоснабжения, заданной на начальном этапе проектирования проектной организацией, в оптимальную трубопроводную сеть Кирхгофа–Штейнера. В общие затраты при этом входят: стоимость труб сети, энергетические затраты насосной станции на прокачку необходимого количества воды через трубопроводы, обеспечивающего в каждом узле потребления заданный расход воды и необходимый напор. Точки Штейнера не являются при этом узлами потребления, а являются лишь точками ветвления потоков.

3. Сравнение общих затрат на создание и эксплуатацию сети, структура которой представлена проектной организацией, и сопоставляемой ей сети Кирхгофа– Штейнера.

4. Разработка программной системы.

Метод решения проблемы должен быть ориентирован на создание больших трубопроводных сетей регионального и межрегионального водоснабжения. Снижение затрат на создание таких сетей является важной задачей, которая может быть решена только на основе компьютерного проектирования и математического моделирования.

Недостатком существующих методов решения этой задачи является то, что задача ставится и решается как чисто потоковая. В работах Сибирского энергетического института эта задача решалась уже как потоковая задача Кирхгофа, т. е. с учетом потоковых и потенциальных переменных. Дальнейшее снижение затрат на создание и эксплуатацию сети может быть достигнуто на пути создания потоковых сетей Кирхгофа–Штейнера.

В сетевой задаче Штейнера (СЗШ), в отличие от классической задачи Штейнера [1, 2], следует минимизировать не суммарную длину коммуникаций, а их общую стоимость.

В СЗШ величины весов ребер зависят от потока по ним. Для этих задач центральное свойство классической задачи Штейнера, состоящее в том, что ребра сети, инцидентные точке Штейнера, образуют друг с другом углы в 120°, не выполняется, и поэтому разработанные алгоритмы декомпозиции неприменимы.

В работе E.N. Gilbert [3] впервые была дана формула вычисления углов, образуемых смежными ребрами, инцидентными точке Штейнера в случае, когда эти дуги имеют различные веса. В работах [4, 5] был представлен подход к решению СЗШ. Сетевая задача Штейнера является существенно многоэкстремальной, поэтому в работе [6] было введено понятие и дано определение ранга оптимальности решения сетевой задачи Штейнера. В свою очередь задача построения разветвленной потоковой сети Кирхгофа–Штейнера требует существенно большего времени компьютерного проектирования.

1. Потоковая сетевая задача Кирхгофа–Штейнера

1.1. Постановка сетевой задачи Кирхгофа–Штейнера (СЗКШ)

Задача *(СЗКШ) На плоскости задан полный двухзвенный ориентированный геометрический граф Г(B,D), n вершин которого $(x_i, y_i), i = 1, \dots, n$ фиксированы, а $(n-2)$ вершин $(x_i, y_i), i = n+1, \dots, 2n-2$ не фиксированы, $|\mathrm{B_ф}| = n, |\mathrm{B_Ш}| = n-2, C_{ij}(\upsilon_{ij}, h_{ij})$ – удельная стоимость ij ветви, являющаяся вогнутой непрерывно возрастающей по потоку υ_{ij} и выпуклой непрерывно убывающей по удельной потере напора h_{ij}; $c_{ij}(0) = 0$; $q_j > 0, j \in \mathrm{B_ф}$ и $q_j = 0, j \in \mathrm{B_Ш}$; q_j – поток, потребляемый в j-м узле (вершине) сети.*

Следует так определить координаты точек Штейнера и значения υ_{ij}, h_{ij} по каждой ветви ij, что

$$З(\upsilon, h, \mathrm{H_{НС}}) = \frac{\rho \mathrm{H_{НС}} Q_{\mathrm{НС}} T}{\eta} + \sum_{(ij)\in D} c_{ij}(\upsilon_{ij}, h_{ij}) \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \to min \qquad (1)$$

$$\sum_{i \in D_j^+} \upsilon_{ij} - \sum_{k \in D_j^-} \upsilon_{jk} = g_j, \quad \forall\, j \in B, \quad j \neq 1 \qquad (2)$$

$$\sum_{j \in D_j^-} \upsilon_{1j} = Q_{\mathrm{НС}}, \qquad (3)$$

$$\upsilon_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in D \qquad (4)$$

$$\mathrm{H_{НС}}_i = \mathrm{H}_i + z_i - z_{\mathrm{НС}} + \sum_{(rs)\in T_i} h_{rs} l_{rs} \qquad (5)$$

$$\mathrm{H_{НС}} = \max_i \{\mathrm{H_{НС}}_i\}, \qquad (6)$$

где $З(x,h)$ – общие затраты на сеть; ρ – цена в рублях за 1 кВт·ч; $\mathrm{H_{НС}}$ – напор на насосной станции; $Q_{\mathrm{НС}}$ – общий поток в сети; T – заданное время эксплуатации сети в часах; η – коэффициент полезного действия (КПД); i – номер вершины истока, j – номер вершины стока (ij)-й ветви.

Поскольку возможных остовных деревьев графа Г(В, Д), построенных на *n* фиксированных точках и $(n-2)$ точках Штейнера, конечное число, и на каждом остовном дереве сети целевая функция непрерывна, то задача (1)–(6) имеет оптимальное решение.

1.2. Математическое моделирование задачи оптимального проектирования трубопроводной сети Кирхгофа–Штейнера

Функционирование сетей по переносу сетевого продукта (электричество, вода, газ, нефть) зависит не только от величин потоков $\upsilon_{\mathrm{ij}}, \mathrm{ij} \in \mathcal{D}$ по ветвям сети, но и от потерь потенциала $h_{ij}, ij \in \mathcal{D}$ потока по ветвям. Затраты на создание и функционирование сети при этом складываются из стоимости коммуникаций трубопроводов сети и энергетических затрат на прохождение сетевого продукта по коммуникациям от источника к потребителям – в нашем случае к фиксированным n вершинам.

Как известно [4, 5], затраты на коммуникацию могут быть рассчитаны по формуле $З_{ij} = \left(k \upsilon_{ij}^{\alpha} h_{ij}^{\beta} + \upsilon_{ij} h_{ij}\right) l_{ij}$, где $0 < \alpha < 1, \beta < 0, l_{ij}$ – длина коммуникации. Первое слагаемое характеризует стоимость коммуникации, второе – энергетические затраты на транспорт сетевого продукта по коммуникации. В таком случае получим

$$З(\upsilon, h) = \sum_{ij\in\mathcal{D}}\left(k\upsilon_{ij}^{\alpha}h_{ij}^{\beta} + \upsilon_{ij}h_{ij}\right)\sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2} \to min. \quad (7)$$

Поскольку целевая функция выпукла и непрерывна по h_{ij}, то на оптимальном решении получим

$$\frac{\partial З}{\partial h_{ij}} = \left(k\beta\upsilon_{ij}^{\alpha}h_{ij}^{\beta-1} + \upsilon_{ij}\right)\sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2} = 0,\ ij \in \mathcal{D},\ mo$$

$$h_{ij}^{\beta-1} = \frac{\upsilon_{ij}^{1-\alpha}}{-k\beta}, h_{ij} = (-k\beta)^{\frac{1}{1-\beta}}\upsilon_{ij}^{\frac{1-\alpha}{\beta-1}}.$$

Отсюда получим

$$З(\upsilon) = \sum_{ij\in\mathcal{D}}(-k\beta)^{\frac{1}{1-\beta}}\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)\upsilon_{ij}^{\frac{\beta-\alpha}{\beta-1}}\sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2}.$$

Поскольку $(-k\beta)^{\frac{1}{1-\beta}}\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right) - const$, то целевая функция (7) примет вид

$$\sum_{ij\in\mathcal{D}}\upsilon_{ij}^{\frac{\beta-\alpha}{\beta-1}}\sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2} \to min. \quad (8)$$

Отсюда следует формула перехода от $c_{ij}(\upsilon_{ij}, h_{ij})$ к $f_{ij}(\upsilon_{ij})$: $f_{ij}(\upsilon_{ij}) = \upsilon_{ij}^{\frac{\beta-\alpha}{\beta-1}}$. Значения α, β, *k* зависят от материала труб [7, с. 53–55]. Например, для полиэтиленовых труб, наиболее часто используемых в проектировании больших сетей водоснабжения, α =1,95, β =1,774, γ =4,774, k = 0,001052.

2. Решение сетевой задачи Штейнера на основе динамической декомпозиции и ранговой оптимизации

Задача минимизации вогнутой возрастающей функции на транспортном многограннике, к которой относится и задача оптимизации разветвленной потоковой сети, рассматриваемая в работах [8–10], является существенно многоэкстремальной. В работах Сибирского энергетического института (СЭИ, г. Иркутск) [11–13], а также [14] был разработан общий метод решения задачи минимизации затрат на создание потоковых сетей.

Для задач структурно-параметрической оптимизации большой размерности локальный экстремум не информативен, а глобальный, как правило, недостижим за экономически оправданное время решения задачи на компьютере. В связи с этим необходима более тонкая градация экстремумов для сравнения эффективности различных методов решения такого рода задач. В работах [6, 13] было введено понятие и дано определение ранга экстремума решения потоковой сетевой задачи.

Для потоковой сетевой задачи Штейнера оно состоит в следующем. Назовем фрагментом *P-го* ранга вершины *i* сети Штейнера ее подсеть P_i, стягивающую множество вершин *P*-достижимых из вершины *i* сети (без учета направления дуг), а сетью Штейнера *P-го* ранга – такую сеть, любой из фрагментов *P-го* ранга которой оптимален.

Для построения метода декомпозиции потребуется формализация это понятия. Пусть $\left\{\upsilon_{ij}^{*}\right\}_{ij\in D}, \{x_i^{*}, y_i^{*}\}_{B_{\text{ш}}}$ – некоторое допустимое решение задачи. Ту часть множества дуг, поток по которой отличен от нуля, и ту часть множества точек Штейнера, поток из которых отличен от нуля, обозначим соответственно D^{*} и $B_{\text{ш}}^{*}$. Сформируем множество $B^{*} = B_{\text{ф}} \cup B_{\text{Ш}}^{*}$. Обозначим граф, включающий B^{*}, D^{*} через $\Gamma^{*}(B^{*}, D^{*})$. Выделим любую вершину *i*

графа и обозначим множество его вершин, не более чем Р-достижимых из i, M_i^P, а P_i^* – подграф графа $\Gamma^*(B^*, D^*)$, построенный на этих точках.

Определение: *назовем сеть Штейнера* $\left\{\Gamma^*(B^*, D^*), \{v_{ij}^*\}_{ij\in D}, \{x_i^*, y_i^*\}_{B_{\text{Ш}}{}^*}\right\}$ *Р оптимальной, если выполнено условие минимума:*

$$min \sum_{ij\in\mathcal{D}} f_{ij}(v_{ij})\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} = \sum_{ij\in\mathcal{D}^*} f_i(v_{ij}{}^*)\sqrt{(x_i{}^* - x_j{}^*)^2 + (y_i{}^* - y_j{}^*)^2}, \quad (9)$$

где $v_{ij} = v_{ij}^*, \forall ij \notin P_i{}^*; \quad x_i = x_i^*, y_i = y_i^* \; \forall i \notin P_i{}^*$

Метод динамической декомпозиции построения Р-оптимальной сети Штейнера состоит из следующих этапов:

1. В связи с экспоненциальным ростом структур Штейнера при поиске Р-оптимального решения следует стартовать с решения, достаточно близкого по значению целевого функционала к оптимуму в задаче (5)–(9). В качестве такового берется *Р*-оптимальное решение сетевой задачи построения терминальной сети, т.е. сети без точек Штейнера, а также сетей, представленных проектными организациями.

2. Преобразование полученного терминального сетевого остовного дерева в сеть Штейнера на основе развертывания узлов терминальной сети в альтернативные элементарные узловые структуры Штейнера с оптимизацией координат точек Штейнера и выделением из альтернативных структур наилучшей.

3. Глобальное решение сетевых задач Штейнера на каждом из множеств вершин Р-достижимых из каждой вершины сети при соблюдении граничных условий с остальной сетью, т.е. решение задачи построения такой сети Штейнера, любая подсеть Р-го ранга которой оптимальна.

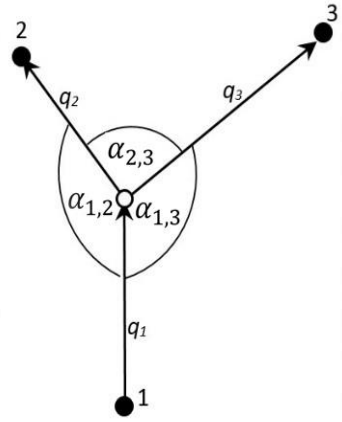


Рис. 1. *Схема элементарной потоковой сети Штейнера*

Fig. 1. *Schematic diagram of the elementary Steiner flow network*

3. Преобразование терминальной сети в сеть Штейнера

3.1. Элементарные узловые структуры сети Штейнера

Решением задачи (1)–(6) является остовное дерево заданного графа возможных соединений узлов сети. Преобразование терминального остовного дерева в сеть Штейнера осуществляется путем развертывания его узлов в структуры Штейнера. Каждый такой узел содержит вершину, из которой поступает поток в узел (исток), и вершины, в которые доставляется поток из узла (стоки). В сетевых системах, как правило, могут быть узлы с одним, двумя и тремя выходными потоками. Все эти структуры назовем элементарными узловыми структурами.

Развертывание элементарных узловых структур в узловые структуры Штейнера осуществляется в соответствии с фундаментальными свойствами точек Штейнера:

1. Степени точек Штейнера равны 3, а степени фиксированных (терминальных) точек не превосходят 3.

2. Дуги остовного дерева, инцидентные каждой точке Штейнера, образуют смежные друг с другом углы, которые определяются по формуле

$$cos(\alpha_{i,j}) = \frac{f_k^2(v_k) - f_i^2(v_i) - f_j^2(v_j)}{2f_i(v_i)f_j(v_j)},$$

где $cos(\alpha_{i,j})$ – косинус угла между отрезками, соединяющими точку (x, y) с точками (x_i, y_i) и (x_j, y_j) (рис. 1).

3. Число точек Штейнера не превосходит $(n-2)$, где n – количество вершин сети.

4. Дуги дерева сети пересекаются только в вершинах дерева.

Узловые структуры Штейнера, построенные в соответствии с этими фундаментальными свойствами, представлены на рис. 2. Узловая структура (а) развертывается в структуру Штейнера единственным образом, т.к. имеется только одно соответствующее ей остовное дерево Штейнера. Элементарная узловая структура (б) может развертываться в два альтернативных остовных дерева, получающихся одно из другого, как зеркальное отображение при удалении нумерации вершин. Наконец, наиболее сложная элементарная узловая структура (в), содержащая 5 терминальных точек, развертывается в 8 остовных деревьев, которые получаются из пары зеркальных деревьев поворотами в плоскости с наложением вершин – всего по 4 поворота каждого из взаимозеркальных остовных деревьев. По каждой из структур построены соответствующие матрицы переходов от элементарных узловых структур в элементарные альтернативные структуры Штейнера, в которых указаны и преобразования потоков исходя из заданных потоков по ветвям элементарных узловых структур (рис. 2 *а, б, в*).

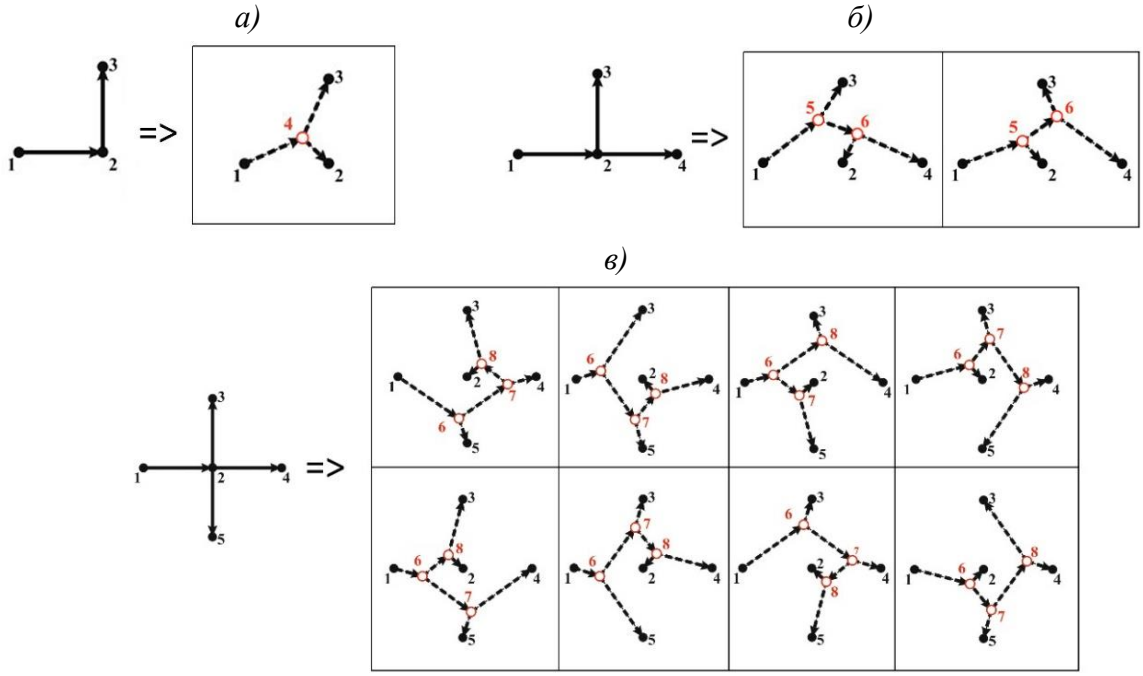


Рис. 2. *Развертка исходных структур сети в узловые структуры Штейнера*

Fig. 2. *Decomposition of the original network structures into Steiner nodal structures*

3.2. Оптимизация параметров на каждой из альтернативных узловых структур сети Штейнера

Оптимизация параметров на каждой из альтернативных узловых структур формируемой сети Штейнера проводится на основе последовательного решения на каждой структуре элементарных (3-точечных) сетевых задач Штейнера (ЭСЗШ)

$$З = \sum_{i=1}^{3} f(q_i)\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \to min,$$

$$q_1 = q_2 + q_3.$$

градиентным методом:

$$\begin{cases} x^{j+1} = x^j - \frac{\partial 3}{\partial x}\left(x^j, y^j\right)\alpha^j = x^j + \sum_{i=1}^{3} f(q_i)\frac{x_i - x^j}{\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2}}\alpha^j \\ y^{j+1} = y^j - \frac{\partial 3}{\partial x}\left(x^j, y^j\right)\alpha^j = y^j + \sum_{i=1}^{3} f(q_i)\frac{y_i - y^j}{\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2}}\alpha^j \end{cases}$$

Дробление шага α^{j} проводится при нарушении условия

$$3\left(x^{j+1}, y^{j+1}\right) - 3\left(x^{j}, y^{j}\right) \le \varepsilon\alpha^{j}\left\|3'(x^{j}, y^{j})\right\|^2, \varepsilon = 0{,}5.$$

Решение задачи прекращается при достижении заданной точности: $0 \le \frac{3^{j}-3^{j+1}}{3^{j}} \le 0{,}001$.

Для построения оптимальной узловой структуры следует определить ту из альтернативных узловых структур Штейнера, на которой решение будет наилучшим. Эта задача решается оптимизацией координат точек Штейнера на каждой из структур и выделением из полученных решений наилучшего.

3.3. Построение сети Штейнера 2-го ранга оптимальности с оптимальным количеством точек Штейнера

Целью этого этапа оптимизации является построение такой сети Штейнера, любая подсеть *P*-й размерности которой оптимальна. Задача решается методом динамической декомпозиции. Пусть *i* – текущая вершина сети Штейнера в процессе оптимизации структуры сети. Обозначим:

- P_i – подсеть сети Штейнера, стягивающая множество M_i^P вершин не более чем P-достижимых из *i*;
- M_i^{P-1} – множество вершин *(P-1)*-достижимых из вершины *i*;
- $\overline{M}_i^P$ – *P*-достижимых, но не *(P-1)*-достижимых вершин – внутренний контур сети;
- $\overline{M}_i^{P+1}$ – *(P+1)*-достижимых, но не *P*-достижимых вершин – внешний контур сети;

Схема алгоритма построения сети:

1. Выделяется текущая вершина *i* сети Штейнера.
2. Определяются P_i – подсеть и множества M_i^{P-1}, $\overline{M}_i^P$, $\overline{M}_i^{P+1}$.
3. Устраняются все дуги между вершинами из M_i^P P_i-й подсети.
4. Решается задача оптимизации координат точек Штейнера сформированной подсети и определяется ее стоимость. При этом точки Штейнера множества вершин M_i^{P-1} подвижны и могут менять структуру подсети, точки множества $\overline{M}_i^P$, составляющие внешний контур, могут изменять координаты, но не структуру подсети, точки множества $\overline{M}_i^{P+1}$, образующие внешний контур подсети, фиксированы для соблюдения граничных условий подсети с остальной сетью Штейнера.
5. Пункт 4 повторяется для всех генерируемых альтернативных подсетей Штейнера текущей вершины *i* с отбором оптимальной по стоимости коммуникаций. Далее переходим к оптимизации P_{i+1}-й подсети сети Штейнера.

Процесс оптимизации структуры сети завершается при построении такой сети Штейнера, любая подсеть P-го ранга которой оптимальна.

Переходим к удалению из полученной 2-оптимальной сети Штейнера неэффективных точек Штейнера

6. Удаление из полученной 2-оптимальной потоковой сети Штейнера тех точек Штейнера, которые расположены достаточно близко к узлам потоковой сети, т.е.

$$\sqrt{\left(x_i - x_{j\text{Ш}}\right)^2 + \left(y_i - y_{j\text{Ш}}\right)^2} \le r,$$

где (x_i, y_i) – координаты узловой точки i, $(x_{j\text{Ш}}, y_{j\text{Ш}})$ – координаты точки Штейнера, связанной ветвью ij с вершиной i, r – заданная величина.

7. Слияние точек Штейнера, связанных ветвью и находящихся на расстоянии

$$\sqrt{\left(x_{i\text{Ш}} - x_{j\text{Ш}}\right)^2 + \left(y_{i\text{Ш}} - y_{j\text{Ш}}\right)^2} \le r.$$

8. Оптимизация координат оставшихся k точек Штейнера градиентным методом по отношению к 2-достижимым вершинам сети.

9. Оценка значения $(З_k + kC)$, где $З_k$ – стоимость сети Штейнера с k вершинами Штейнера, C – стоимость одного узла соединения трубопроводов сети в точке Штейнера.

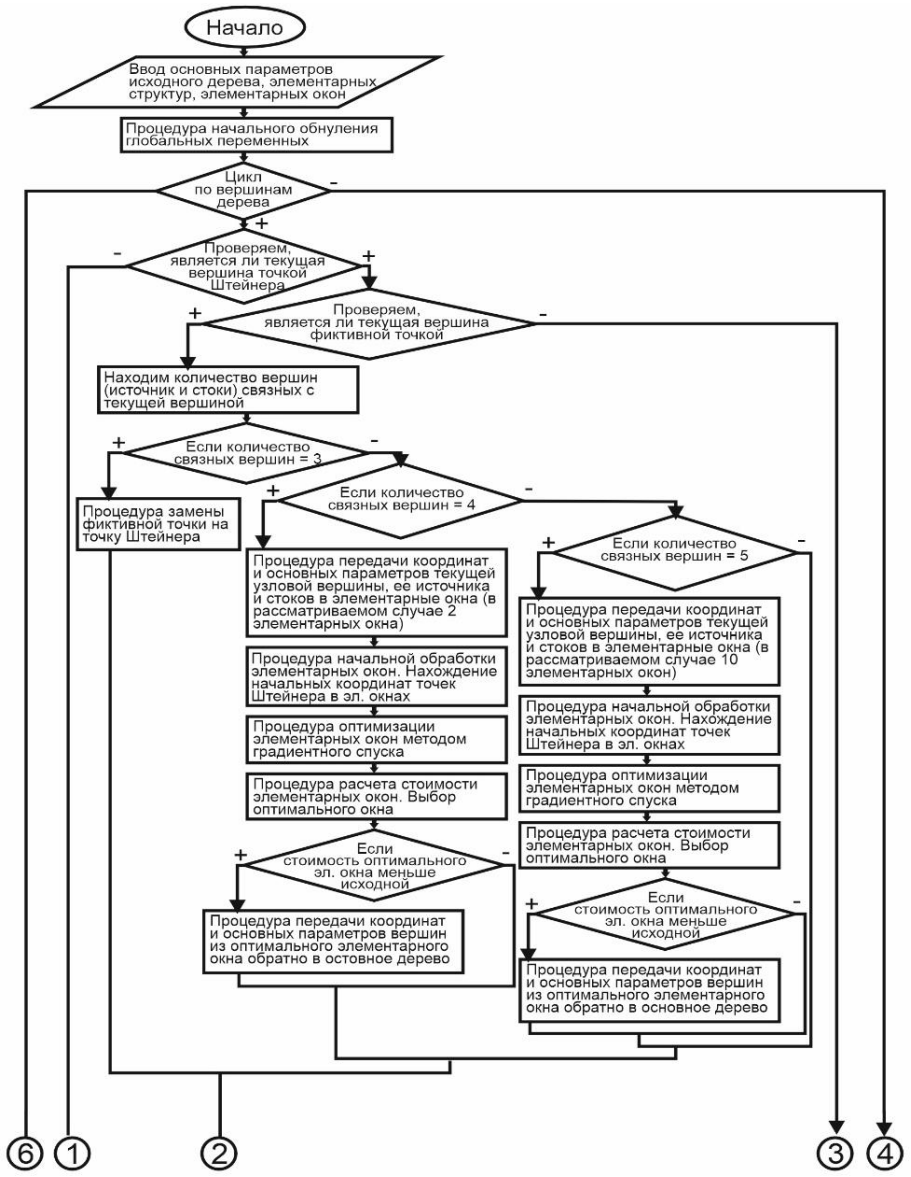
10. Оценка разности значений $\Delta_{\overline{k},k} = \left(З_{\overline{k}} + \overline{k}C\right) - (З_k + kC)$, где $\overline{k}$ – количество точек Штейнера на предыдущем цикле оптимизации i-й подсети, k – на данном цикле.

11. Если $\Delta_{\overline{k}}^{k} \ge 0$, то $r := r_0 + \tau$, $\tau = \frac{1}{10} r_0$, где r_0 – значение r на начальном цикле оптимизации количества точек Штейнера, то переходим на 6.

В противном случае завершается процедура оптимизации количества точек Штейнера в сети.

3.4. Алгоритм построения трубопроводной сети Кирхгофа–Штейнера 2-го ранга оптимальности

Блок-схема алгоритма построения 2-оптимальной потоковой сети Кирхгофа–Штейнера.



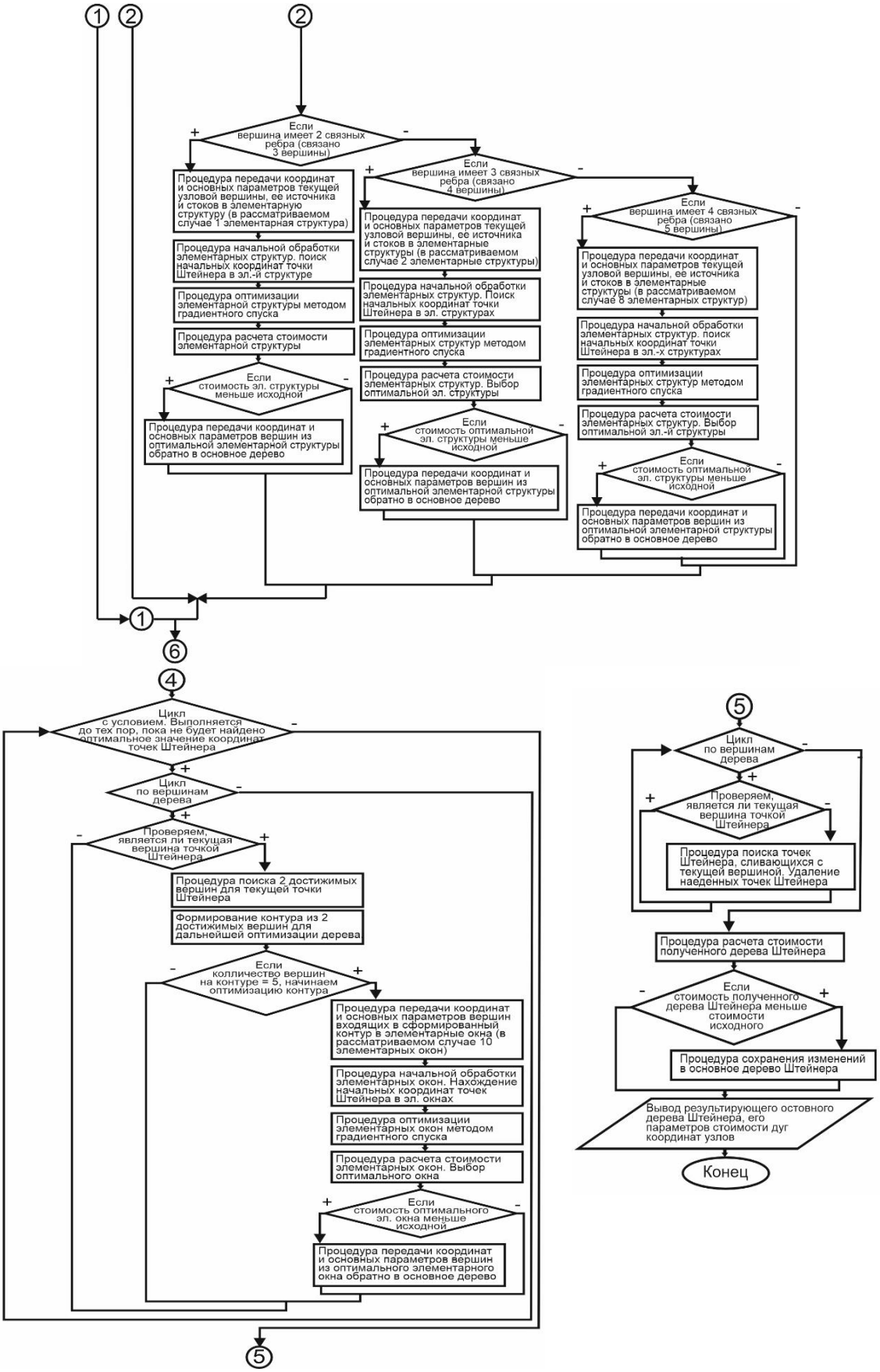


Рис. 3. *Блок-схема алгоритма построения потоковой сети Кирхгофа–Штейнера 2-го ранга оптимальности*

Fig. 3. *Block diagram of the algorithm for constructing the Kirchhoff-Steiner flow network of the 2nd rank of optimality*

4. Минимизация общих затрат на сеть

После определения оптимальной структуры сети решается задача по минимизации общих затрат на сеть – т.е. задача минимизации функции (1) при заданных потоках, так как структура распределительной сети определяет потоки по ее ветвям.

Задача состоит в определении такого напора на насосной станции и таких диаметров труб трубопроводов, что сумма энергетических затрат и стоимости труб трубопроводов минимальна.

Задача решается методом направленного перебора. Суть его состоит в том, что определяется такой напор насосной станции, что любая его вариация приводит к увеличению суммарных затрат.

4.1. Определение начальной энергии $Э_0$

Считаем удельные потери напора h_i по каждой ветви дерева по формуле

$$h_i = \left(\frac{\alpha b}{\gamma p}\right)^{\frac{\gamma}{\alpha+\gamma}} k^{\frac{\alpha}{\alpha+\gamma}} x_i^{\frac{\alpha\beta-\gamma}{\alpha+\gamma}},$$

где коэффициенты $\alpha, \beta, \gamma, b, p, k$ зависят от материала труб [7]. Например, для полиэтиленовых труб, активно применяющихся для проектирования распределительных трубопроводных сетей, $b = 17400$ – цена в рублях за 1 метр трубы диаметром 1 метр; $p = 5{,}68$ – цена за 1 киловатт час; i – номер ветви; x_i – поток по ветви.

Считаем $Э_0$ по формуле

$$Э_0 = \sum_{i=0}^{n} x_i h_i l_i,$$

где i – номер ветви дерева; x_i – поток по ветви; l_i – длина ветви; h_i – удельные потери напора по ветви.

4.2. Алгоритм подсчета напора на насосной станции ($Н_{НС}$)

1) Вычисляем величину M по формуле

$$M = \sum_{i=1}^{n} x_i^{\frac{\alpha(\beta+1)}{\alpha+\gamma}} l_i.$$

2) Для каждой ветви j вычисляется h_j (удельная потеря напора по j-й ветви) по формуле

$$h_j = \frac{Э_0 x_j^{\frac{\alpha\beta-\gamma}{\alpha+\gamma}}}{M}.$$

3) Для каждой вершины i находим T_i – траекторию из веток, ведущую из источника в i-ю вершину.

4) Для каждой вершины i находим $Н_{НС_i}$ (т.е. напор на насосной станции, который требуется для обеспечения этой вершины i требуемым ей напором) по формуле

$$Н_{НС_i} = Н_i + z_i - z_{НС} + \sum_{j \in T_i} h_j l_j,$$

где $Н_i$ – нормативный напор в i-й вершине, z_i – высота i-й вершины, $z_{НС}$ – высота насосной станции (точнее, высота вершины, где находится насосная станция), $\sum_{j \in T_i} h_j l_j$ – полные потери напора по j-й дуге, j – номер дуг дерева (ветви).

5) Находим $Н_{НС}$ как максимум из всех $Н_{НС_i}$, т. е.

$$Н_{НС} = \max_i \{Н_{НС_i}\}.$$

4.3. Алгоритм подсчета полных затрат ($З_0$)

Следует определить $З_0$ – полные затраты на сеть, то есть

$$З_0 = З_{энерг.} + З_{труб},$$

где $З_{энерг.} = \frac{\rho Н_{НС} Q_{НС} T}{\eta}$ – энергетические затраты на эксплуатацию сети в течение заданного времени T; $\rho = 5{,}68$ – это цена за 1 киловатт час; $Н_{НС}$ – напор на насосной станции; $Q_{НС}$ – общий поток в сеть (его можно найти как сумму потреблений во всех вершинах или сумму потоков всех ветвей, выходящих из вершины-источника); $T = 365 * 24 = 8670$ ч. – время эксплуатации сети в часах; $\eta = 0{,}7(70\ \%)$ – коэффициент полезного действия.

$$З_{труб} = \sum_{i=1}^{n} c_i l_i,$$

где $З_{труб}$ – затраты на трубы в рублях; i – номер ветви; l_i – длина i-й ветви; c_i – удельная цена i-й ветви. Вычисляется она так:

$$c_i = b d_i^{\alpha},$$

где b– цена за 1 метр трубы диаметром 1 метр; d_i – диаметр i-й ветви. Вычисляется диаметр по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$d_i = \left(\frac{k {x_i}^{\beta}}{h_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}},$$

где β, γ, k – это коэффициенты из таблицы (для пластмассы); x_i – поток по ветви; h_i – удельные потери напора по ветви.

Для полиэтиленовых труб, используемых активно при проектировании распределительных сетей, $b = 17400$.

4.4. Алгоритм оптимизации полных затрат на сеть

1) Находится $Э_0$ и $З_0$.
2) Уменьшается $Э_0$ на 1 %, и это значение присваивается в $Э_1$, т. е. $Э_1 = Э_0 * 0{,}99$.
3) Находится $З_1$ по двум последним алгоритмам («Алгоритм подсчета напора на насосной станции» и «Алгоритм подсчета полных затрат»), только вместо $Э_0$ используется $Э_1$.
4) Переменной i присваивается значение 1.
5) Пока $З_{i-1} > З_i$, выполняются следующие операции:

5.1. Увеличивается i на единицу.

5.2. $Э_i = Э_{i-1} * 0{,}99$.

5.3. Находится $З_i$ по двум последним алгоритмам, используя в качестве значения энергии значение $Э_i$.

6) Так как $З_{i-1} \leq З_i$, то $З_{i-1}$ и есть оптимальные общие затраты на сеть.

5. Результаты вычислительного эксперимента компьютерного моделирования сети Кирхгофа–Штейнера

Эксперимент – преобразование разветвленной потоковой сети, представленной проектной организацией, в сеть Кирхгофа–Штейнера:

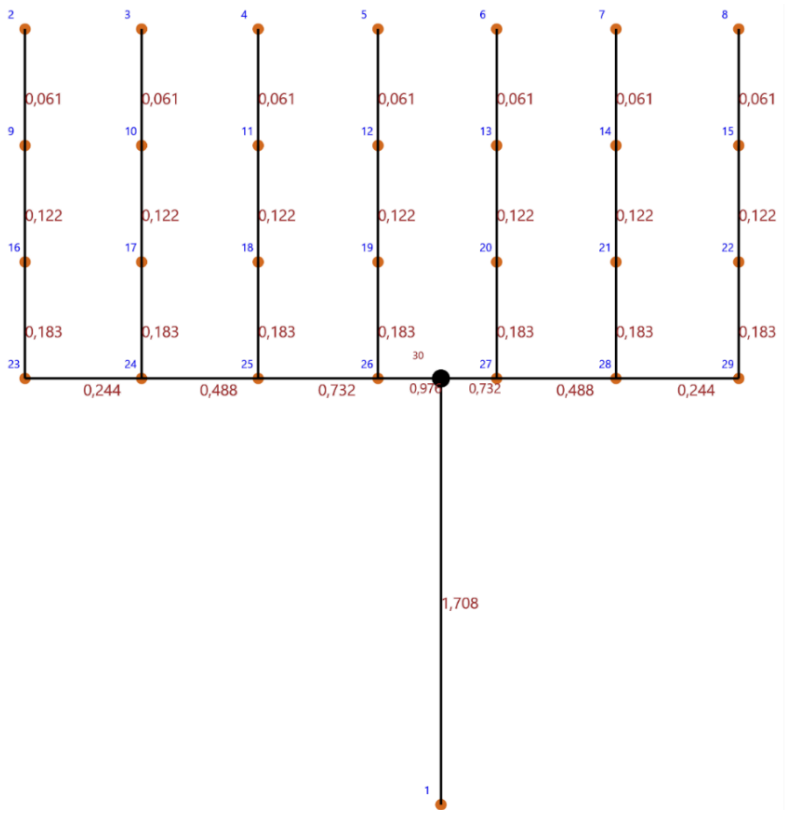


Рис. 4. *Исходная схема структуры потоковой сети, заданная проектной организацией*

Fig. 4. *Initial diagram of the flow network structure specified by the design organization*

Таблица 1. Информация по оптимизации исходной потоковой сети

Table 1. Information on optimization of the original streaming network

Ветвь	Поток по ветви ($м^3$/сек)	Удельная потеря напора по ветви (м)	Диаметр труб по ветви (м)	Удельная стоимость труб ветви (руб.)	Длина ветви (м)	Стоимость ветви сети (руб.)
27–28	0,488	0,0221509	0,404588	2980,06	737,041	2196427,30
28–29	0,244	0,0253659	0,303964	1706,29	758,001	1293370,79
24–23	0,244	0,0253659	0,303964	1706,29	720,009	1228545,07
25–24	0,488	0,0221509	0,404588	2980,06	720,001	2145647,33
26–25	0,732	0,0204626	0,478256	4129,39	740,022	3055842,08
9–2	0,061	0,0332634	0,17157	559,38	720,125	402826,51
10–3	0,061	0,0332634	0,17157	559,38	720,095	402809,94
11–4	0,061	0,0332634	0,17157	559,38	720,061	402791,09
12–5	0,061	0,0332634	0,17157	559,38	720,048	402783,53
13–6	0,061	0,0332634	0,17157	559,38	720,054	402786,85
14–7	0,061	0,0332634	0,17157	559,38	720,01	402762,38
15–8	0,061	0,0332634	0,17157	559,38	720,072	402797,18
16–9	0,122	0,0290475	0,228366	976,97	720,036	703454,67
17–10	0,122	0,0290475	0,228366	976,97	720,027	703445,58
18–11	0,122	0,0290475	0,228366	976,97	720,032	703450,87
19–12	0,122	0,0290475	0,228366	976,97	720,029	703448,16
20–13	0,122	0,0290475	0,228366	976,97	720,063	703480,73
21–14	0,122	0,0290475	0,228366	976,97	720,327	703738,90

22–15	0,122	0,0290475	0,228366	976,97	720,312	703724,36
23–16	0,183	0,0268336	0,269947	1353,76	720,014	974729,63
24–17	0,183	0,0268336	0,269947	1353,76	720,013	974727,97
25–18	0,183	0,0268336	0,269947	1353,76	720,018	974735,04
26–19	0,183	0,0268336	0,269947	1353,76	720,158	974924,92
27–20	0,183	0,0268336	0,269947	1353,76	720,264	975068,00
28–21	0,183	0,0268336	0,269947	1353,76	720,264	975068,00
29–22	0,183	0,0268336	0,269947	1353,76	720,119	974871,91
33–26	0,976	0,0193434	0,538522	5204,71	389,035	2024813,29
33–27	0,732	0,0204626	0,478256	4129,39	344,001	1420514,42
1–33	1,708	0,0173386	0,678375	8164,23	2635,05	21513155,42

Итоговая информация по оптимизации сети:

Затраты на трубы = 49446741,91 руб.
Энергетические затраты = 33843055,19 руб.
Напор на насосной станции = 278,75 м.
Полные затраты = 83289797,11 руб.

Далее следует информация по спроектированному компьютерной системой преобразованию исходной сети (рис. 4) в сеть Кирхгофа–Штейнера.

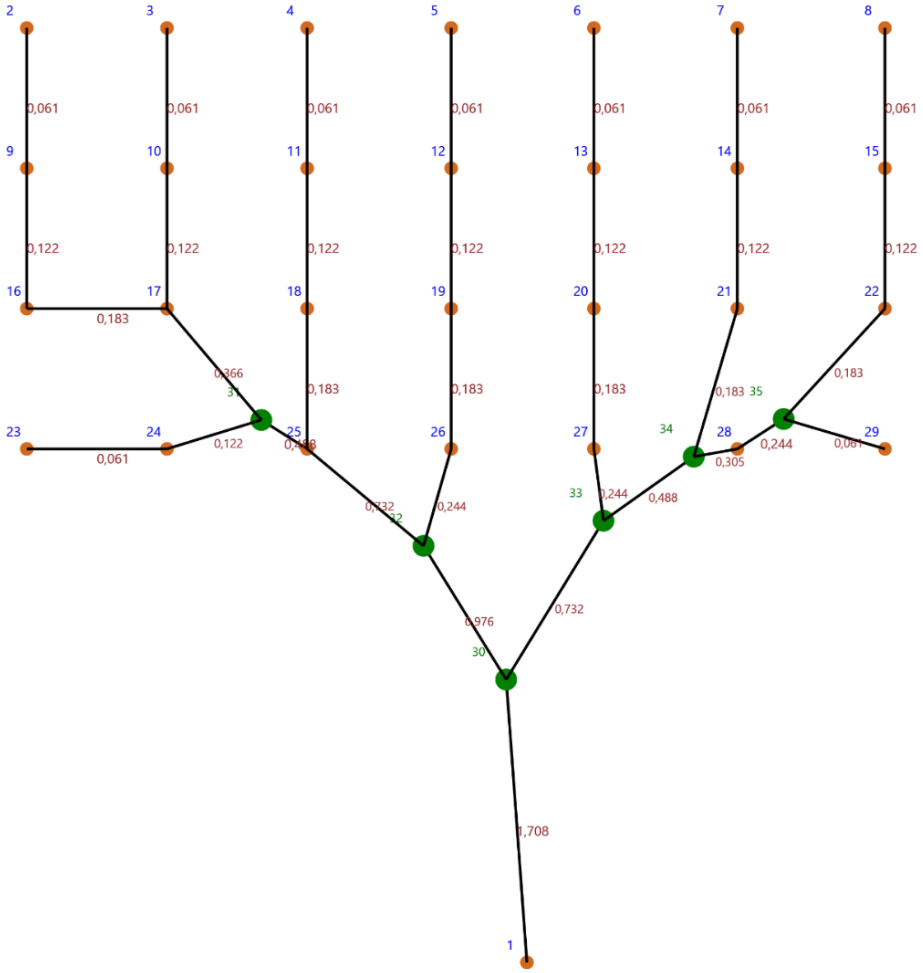


Рис. 5. *Структура потоковой сети Кирхгофа–Штейнера*

Fig. 5. *Structure of the Kirchhoff-Steiner flow network*

Таблица 2. Информация по оптимизации потоковой сети Кирхгофа–Штейнера

Table 2. Information on the optimization of the Kirchhoff-Steiner flow network

Ветвь	Поток по ветви ($м^3$/сек)	Удельная потеря напора по ветви (м)	Диаметр труб по ветви (м)	Удельная стоимость труб ветви (руб.)	Длина ветви (м)	Стоимость ветви сети (руб.)
1–30	1,708	0,017869308	0,674103754	8064,29	1496,10826	12065058,26
9–2	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
10–3	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
11–4	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
12–5	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
13–6	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
14–7	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
15–8	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
16–9	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	720	694809,62
17–10	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	720	694809,62
18–11	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	720	694809,62
19–12	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	720	694809,62
20–13	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	720	694809,62
21–14	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	720	694809,62
22–15	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	720	694809,62
24–23	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	720	397827,01
25–31	0,488	0,022828944	0,402041012	2943,58	278,50	819796,12
26–19	0,183	0,02765494	0,268247747	1337,19	720	962780,10
27–20	0,183	0,02765494	0,268247747	1337,19	720	962780,10
30–35	0,732	0,021088993	0,475244575	4078,84	925,25	3773988,82
30–34	0,976	0,019935511	0,535131973	5141,00	768,23	3949483,79
31–24	0,122	0,029936615	0,22692862	965,01	496,41	479051,68
31–32	0,366	0,024149841	0,357048017	2335,42	620,04	1448079,60
32–16	0,183	0,02765494	0,268247747	1337,19	770,73	1030619,37
32–17	0,183	0,02765494	0,268247747	1337,19	151,78	202971,15
33–18	0,183	0,02765494	0,268247747	1337,19	770,94	1030904,23
33–25	0,549	0,022309215	0,422059262	3236,14	110,55	357775,32
34–26	0,244	0,026142328	0,302050678	1685,40	502,33	846642,43
34–33	0,732	0,021088993	0,475244575	4078,84	683,84	2789303,69
35–27	0,244	0,026142328	0,302050678	1685,40	351,87	593053,29
35–36	0,488	0,022828944	0,402041012	2943,58	609,35	1793696,92
36–21	0,183	0,02765494	0,268247747	1337,19	740,46	990148,73
36–37	0,305	0,025026267	0,331177055	2016,81	152,09	306744,51
37–38	0,244	0,026142328	0,302050678	1685,40	314,27	529673,82
37–28	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	83,73	46264,39
38–29	0,061	0,034281604	0,170489929	552,53	586,46	324042,48
38–22	0,183	0,02765494	0,268247747	1337,19	760,62	1017109,75

Итоговая информация по оптимизации сети:

Затраты на трубы = 44366252,1032027 руб.
Энергетические затраты = 31219929,76 руб.
Напор на насосной станции = 259,82 м.
Полные затраты = 75586181,86 руб.

Ниже в табл. 3 представлены итоговые результаты по преобразованию сети, представленной проектной организацией, в сеть Кирхгофа–Штейнера.

6. Общие результаты вычислительного эксперимента

Таблица 3. Сравнительный анализ по результатам оптимизации

Table 3. Comparative analysis of optimization results

Затраты на трубы (руб.)		
Исходная сеть	Потоковая сеть Кирхгофа–Штейнера 2-го ранга оптимальности	% оптимизации
49446741,91	44366252,1	10,27
Энергетические затраты (Кв.ч.)		
Исходная сеть	Сеть Кирхгофа–Штейнера	% оптимизации
33843055,19	31219929,76	7,75
Напор на насосной станции (м)		
Исходная сеть	Сеть Кирхгофа–Штейнера	% оптимизации
278,75	259,82	6,79103139
Полные затраты (руб.)		
Исходная сеть	Сеть Кирхгофа–Штейнера	% оптимизации
83289797,11	75586181,86	9,24

1. Наилучшей потоковой сетью Кирхгофа–Штейнера является сеть со схемой, изображенной на рис. 5.

2. В зависимости от структуры рассматриваемых сетей разность затрат на заданную своей структурой потоковую сеть Кирхгофа и Кирхгофа–Штейнера различается примерно на 9,4 %.

Заключение

Отметим основные научные и научно-практические результаты представленной работы:

1. Разработан метод преобразования заданного проектной организацией проекта структуры распределительной сети водоснабжения в оптимальную трубопроводную сеть Кирхгофа–Штейнера.

2. Разработан метод расчета общих затрат на создание и эксплуатацию сети водоснабжения, заданной на начальном этапе проектирования проектной организацией, в оптимальную трубопроводную сеть Кирхгофа–Штейнера. В общие затраты при этом входят: стоимость труб сети, энергетические затраты насосной станции на прокачку необходимого количества воды через трубопроводы, обеспечивающего в каждом узле потребления заданный расход воды и необходимый напор. Точки Штейнера не являются при этом узлами потребления, а являются лишь точками ветвления потоков.

3. Разработана программная система проведения расчетов параметров сети, общих затрат на создание и эксплуатацию сети, структура которой задана проектной организацией, и сопоставляемой ей сети Кирхгофа–Штейнера.

Метод и компьютерная система предназначены для проектирования больших разветвленных трубопроводных сетей регионального и межрегионального водоснабжения. Потоковые сети Кирхгофа–Штейнера обеспечивают экономический эффект порядка 6% от затрат на создание и эксплуатацию потоковых сетей водоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гилберт Э. Н., Поллак Г. О.* Минимальные деревья Штейнера // Кибернетический сборник. Новая серия. Вып. 8. 1971. С. 19–49.

2. *Гордеев Э. Н., Тарасцов О. Г.* Задача Штейнера. Обзор // Дискретная математика. Т. 5. № 2. 1993. С. 3–28.

3. *Gilbert E. N.* Minimal Cost Communication Networks // Bell System technological Journal. 1967. No. 9. Pp. 48–50.

4. *Boyce W. M.* An improved program for the full Steiner tree problem // ACM Trans. J Math. Software. 1977. Vol. 3. Pp. 359–385.

5. *Boyce W. M., Seery J. B.* STEINER 72: An improved version of the minimal network problem // Rech. Rep. No. 35. Comp. Sci. Res. CTR. Bell. Lab., Murray Hill, N.-Y., (undated)

6. *Багов М. А.* Метод компьютерного проектирования разветвленных трубопроводных гидравлических сетей с оптимальным количеством точек Штейнера // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 55–64. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-55-64

7. *Абрамов Н. Н., Поспелова М. М., Сомов М. А. и др.* Расчет водопроводных сетей. М.: Стройиздат, 1983. 278 с.

8. *Туй Х.* Вогнутое программирование при линейных ограничениях // Доклады АН СССР. 1964. Т. 159. № 1. С. 32–35.

9. *Трубин В. А.* Свойства и методы решения задач оптимального синтеза сетей. Киев: Знание, 1982. 23 с.

10. *Михалевич В. С., Трубин В. А., Шор Н. З.* Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования. М.: Наука, 1986. 260 с.

11. *Меренков А. П., Сеннова Е. В., Сумароков С. В. и др.* Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.

12. *Булатов В. П., Кассинская Л. И.* Некоторые методы минимизации вогнутой функции на выпуклом многограннике // Методы оптимизации и их приложения. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1987. С. 151–172.

13. *Абазоков М. Б., Багов М. А., Кудаев В. Ч.* Компьютерное проектирование больших трубопроводных сетей высокого ранга оптимальности // Доклады Адыгской (Черкесской) международной академии наук. 2022. Т. 22. № 4. С. 39–56. DOI: 10.47928/1726-9946-2022-22-4-39-56

14. *Ставровский Е. Р., Трунов Р. А.* Новые задачи и компьютерные программы оптимизации конфигурации и параметров региональных газораспределительных сетей при их проектировании // Сборник научных трудов «Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации», Новосибирск: Наука. 2007. 258 с.

REFERENCES

1. Gilbert E.N., Pollack G.O. Steiner minimal trees. *Kiberneticheskiy sbornik. Novaya seriya*. [Cybernetic Collection. New Series]. No. 8. 1971. Pp. 19–49. (In Russian)

2. Gordeev E.N., Tarastsov O.G. Steiner Problem. Review. *Diskretnaya matematika* [Discrete Mathematics]. Vol. 5. No. 2. 1993. Pp. 3–28. (In Russian)

3. Gilbert E.N. Minimal cost communication networks. *Bell System technological Journal*. 1967. No. 9. Pp. 48–50.

4. Boyce W.M. An improved program for the full Steiner tree problem. *ACM Trans. J Math. Software*. 1977. Vol. 3. Pp. 359–385.

5. Boyce W.M., Seery J.B. STEINER 72: An improved version of the minimal network problem. *Rech. Rep.* Vol. 35. *Comp. Sci. Res.* CTR. Bell. Lab., Murray Hill, N.-Y., (undated)

6. Bagov M.A. Method of computer design of branched hydraulic pipeline networks with an optimal number of Steiner points. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6 (116). Pp. 55–64. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-55-64. (In Russian)

7. Abramov N.N., Pospelova M.M., Somov M.A. et al. *Raschet vodoprovodnykh setey* [Calculation of water supply networks]. Moscow: Stroyizdat, 1983. 278 p. (In Russian)

8. Tui H. Concave programming under linear constraints. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1964. Vol. 159. No. 1. Pp. 32–35. (In Russian)

9. Trubin V.A. *Svoystva i metody resheniya zadach optimal'nogo sinteza setey* [Properties and methods for solving problems of optimal network synthesis]. Kyiv: Znanie, 1982. 23 p. (In Russian)

10. Mikhalevich V.S., Trubin V.A., Shor N.Z. *Optimizatsionnyye zadachi proizvodstvenno-transportnogo planirovaniya* [Optimization problems of production and transport planning]. Moscow: Nauka, 1986. 260 p. (In Russian)

11. Merenkov A.P., Sennova E.V., Sumarokov S.V. et al. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya sistem teplo-, vodo-, nefte- i gazosnobzheniya* [Mathematical modeling and optimization of heat, water, oil and gas supply systems]. Novosibirsk: Nauka, 1992. 407 p. (In Russian)

12. Bulatov V.P., Kassinskaya L.I. Some methods for minimizing a concave function on a convex polyhedron. *Metody optimizatsii i ikh prilozheniya* [Optimization methods and their applications]. Irkutsk: SEI SB RAS USSR. 1987. Pp. 151–172. (In Russian)

13. Abazokov M.B., Bagov M.A., Kudayev V.Ch. Computer design of large pipeline networks of high optimality rank. *Adyghe International Scientific Journal*. 2022. Vol. 22. No. 4. Pp. 39–56. DOI: 10.47928/1726-9946-2022-22-4-39-56. (In Russian)

14. Stavrovsky E.R., Trunov R.A. New problems and computer programs for optimizing the configuration and parameters of regional gas distribution networks during their design. *Sbornik nauchnykh trudov "Truboprovodnyye sistemy energetiki. Metody matematicheskogo modelirovaniya i optimizatsii".* [Collection of scientific papers "Pipeline systems of energy. Methods of mathematical modeling and optimization"]. Novosibirsk: Nauka, 2007. 258 p. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Багов Марат Алиевич, науч. сотр., отдел вычислительных методов, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;

maratniipma@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0899-898X, SPIN-код: 6145-5129

Information about the author

Marat A. Bagov, Researcher, Department of Computational Methods, Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;

maratniipma@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0899-898X, SPIN-code: 6145-5129

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.94:519.87
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-115-128
EDN: FAHNBD

Оптимизация режимов работы светофора на двухполосном по каждой трассе перекрестке города

В. Ч. Кудаев, А. К. Буздов✉

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

Аннотация. Одной из актуальных задач оптимизации транспортной системы города является задача о режиме работы светофора на перекрестках города. В работе представлено решение задачи о светофоре на основе математического моделирования и компьютерного проектирования, работающем в двухфазном и трехфазном режимах. В основе представленного метода лежит известное условие Лайтхилла–Уизема. Рассмотрение именно двухполосных по каждой из двух трасс перекрестков связано с тем, что такие перекрестки составляют значительную часть в системе перекрестков города. В настоящее время в основе подходов к решению задачи лежит рассмотрение усредненных показателей транспортной системы на перекрестках городских дорог. Преимущество представляемого метода решения задачи, основанного на методе Лайтхилла–Уизема, состоит в аналитическом решении задачи оптимизации при учете параметров движения автотранспортных средств через перекресток в пиковый (наиболее напряженный) период суток.

Ключевые слова: двухполосный перекресток, оптимизация режимов работы светофора, поток автотранспортных средств, двухфазный режим, трехфазный режим, трассы перекрестка, пропускная способность, нагрузка автотранспортных средств, условие блокировки перекрестка

Поступила 10.11.2024, одобрена после рецензирования 18.11.2024, принята к публикации 03.12.2024

Для цитирования. Кудаев В. Ч., Буздов А. К. Оптимизация режимов работы светофора на двухполосном по каждой трассе перекрестке города // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 115–128. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-115-128

MSC: 90C26 Original article

Optimization of traffic light operation at urban intersections made of roads with two lanes

V.Ch. Kudaev, A.K. Buzdov✉

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Abstract. One of the current challenges in optimizing city traffic flow is the intersection traffic light control. The paper presents a solution to the traffic light control problem using mathematical modeling and computer design, operating in two- and three-phase modes. In our study we base on the well-known Lighthill-Whitham condition. Our interest in intersections with two-lane roads is due to the fact that they make up a significant part of the urban road network. Modern approaches to solving the problem are based on the analysis of the dataset that contains road intersection average data. The advantage of the

© Кудаев В. Ч., Буздов А. К., 2024

presented approach, which is based on the Lighthill-Whitham condition, is related to the analytical solution of the optimization problem with consideration of the parameters of traffic flows at signalized intersections during the peak periods.

Keywords: two-lane intersection, optimization of traffic light operation modes, flow of motor vehicles, two-phase mode, three-phase mode, intersection lanes, traffic capacity, vehicle load, intersection blocking condition

Submitted 10.11.2024, approved after reviewing 18.11.2024, accepted for publication 03.12.2024

For citation. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. Optimization of traffic light operation at urban intersections made of roads with two lanes. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 115–128. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-115-128

Введение

Задача о светофорном управлении движением автотранспортных средств (АТС) через перекресток является одной из главных задач математического моделирования движения транспортных потоков в городе [1].

Задача светофорного управления движением АТС через перекресток состоит в построении такого периодического режима работы светофора, который при условии ненакопления АТС перед перекрестком от цикла к циклу его работы обеспечивает наименьшее суммарное время прохода перекрестка всеми АТС, вошедшими в перекресток.

В основе представленного метода лежит доказанное М. Лайтхиллом и Дж. Уиземом [2–4] условие ненакопления АТС перед светофором по трассе перекрестка с течением времени.

В настоящее время в основе подходов к решению задач моделирования транспортных потоков лежит рассмотрение усредненных показателей транспортной системы на перекрестках городских дорог [5–12]. При этом для оценки работы светофора используются индивидуальный подход, имитационное и компьютерное моделирование потоков на перекрестке.

Условие Лайтхилла–Уизема позволяет построить аналитический метод оптимизации двухфазного режима работы светофора на перекрестке в целом.

1. Условие Лайтхилла–Уизема и его интерпретация ненакопления (АТС) перед перекрестком с течением времени

В работах [2–4] была предложена гидродинамическая модель однополосного транспортного потока, названная впоследствии моделью Лайтхилла–Уизема–Ричардса (LWR), в которой поток АТС рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости. В работах [2, 3] М. Лайтхиллом и Дж. Уиземом была поставлена на основе LWR следующая

Задача. *Найти такое число $k>0$, что перед светофором (работающем в двух режимах: зеленый, красный) не будет скапливаться очередь с течением времени, если*

$$\frac{T_{\text{зел}}}{T_{\text{кр}}} \geq k.$$

Считать, что транспортный поток вдали от светофора имеет плотность $\rho < \rho_m$, где ρ – плотность потока q, ρ_m – плотность, при которой значение потока максимально – q_m.

Решение М. Лайтхилла и Дж. Уизема таково: перед светофором не будет скапливаться очередь, если

$$(q_m - q)T_{\text{зел}} \geq qT_{\text{кр}}, \qquad \text{т. е.} \qquad \frac{T_{\text{зел}}}{T_{\text{кр}}} \geq \frac{q}{q_m - q}. \tag{1}$$

На рис. 1 представлена схема двухполосного перекрестка.

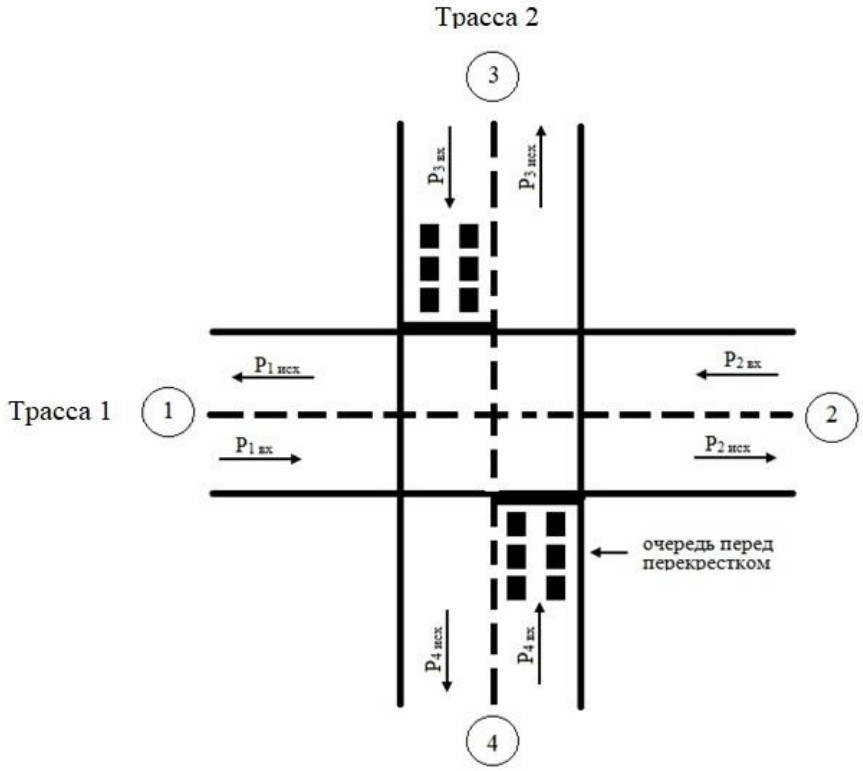


Рис. 1. *По трассам 1 и 2 горят соответственно зеленый и красный цвета светофора*

Fig. 1. *On lanes 1 and 2, the green and red traffic lights are on, respectively*

Целью представленной работы является разработка на основе условия Лайтхилла–Уизема аналитических методов решения задач:

1) оптимизация режима работы светофора на перекрестке в целом, а не на отдельной трассе (как в работах [2,3]);

2) оценка возможности вывода перекрестка из зоны блокировки переходом от двухфазного режима работы светофора на перекрестке к трехфазному режиму;

3) определение значений основных характеристик и параметров перекрестка с двухфазным и трехфазным светофорным управлением.

2. Возможный интервал отношения времен горения зеленого цвета по каждой из трасс перекрестка и условие неблокировки перекрестка

Оценка Лайтхилла–Уизема $\frac{T_{зел}}{T_{кр}} \geq \frac{q}{q_m - q}$ при рассмотрении обеих трасс, т.е. перекрестка в целом (рис. 1), приводит к следующим неравенствам:

$$\frac{T^1_{зел}}{T^1_{кр}} = \frac{T^1_{зел}}{T^2_{зел}} \geq \frac{q^1}{q^1_m - q^1}, \tag{2}$$

$$\frac{T^2_{зел}}{T^2_{кр}} = \frac{T^2_{зел}}{T^1_{зел}} \geq \frac{q^2}{q^2_m - q^2}, \tag{3}$$

где верхними индексами обозначены номера трасс.

Ниже представлены кратко два важных утверждения из нашей работы [14, стр. 67–69].

Утверждение 1. *На перекрестке в целом не будет происходить накопления АТС от цикла к циклу работы светофора, только если*

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \le 1. \tag{4}$$

При этом возможные режимы работы светофора определяются следующим образом:

$$\begin{gathered}\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}\right], \text{если } \frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \ge \frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \\ \frac{T_{\text{зел}}^2}{T_{\text{зел}}^1} \in \left[\frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \frac{q_m^1 - q^1}{q^1}\right], \text{если } \frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \ge \frac{q^1}{q_m^1 - q^1}.\end{gathered} \tag{5}$$

Доказательство. Пусть $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \ge \frac{q^2}{q_m^2 - q^2}$. Из (2) и (3) следует

$$\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \le \frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} \le \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}. \tag{6}$$

Неравенство имеет решение, только если $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \le \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}$. Получим

$$q^1 q^2 \le q_m^1 q_m^2 - q_m^1 q^2 - q^1 q_m^2 + q^1 q^2 \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \le 1.$$

Причем из условия $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \ge \frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} \ge \frac{q^2}{q_m^2}$. Утверждение доказано.

Отметим также, что условие

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1 \tag{7}$$

есть условие нахождения перекрестка в зоне блокировки АТС.

3. Оптимальный двухфазный режим работы светофора на перекрестке

Обычно считают, что оптимальным является следующий режим горения зеленого по трассам:

$$\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} = \frac{q^1}{q^2},$$

но в этом случае не учитываются пропускные способности трасс перекрестка q_m^1, q_m^2.

Утверждение 2. *Если перекресток не находится в зоне блокировки, то оптимальным режимом работы светофора является режим*

$$\begin{gathered}\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} = \frac{q^1 / q_m^1}{q^2 / q_m^2} = \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} \quad \text{при } \frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \ge \frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \\ \text{и } \frac{T_{\text{зел}}^2}{T_{\text{зел}}^1} = \frac{q^2 / q_m^2}{q^1 / q_m^1} = \frac{q^2 q_m^1}{q_m^2 q^1} \quad \text{при } \frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \ge \frac{q^1}{q_m^1 - q^1}\end{gathered} \tag{8}$$

Доказательство.

Целью светофорного управления перекрестком является построение такого периодического режима работы светофора (времен горения красного, зеленого цветов), которое обеспечивает наименьшее суммарное время прохода перекрестка всеми АТС, вошедшими в перекресток, при условии ненакопления АТС перед перекрестком с течением времени [2, 3].

Это условие (см. утверждение 1) имеет вид: $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \le 1$.

Вследствие этого оптимальным является режим, соотносящий величины $\frac{q^1}{q_m^1}$ и $\frac{q^2}{q_m^2}$ при выполнении условий (5). Покажем, что

$$\frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}\right].$$

Предположим

$$\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} > \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} \Rightarrow q^1 q_m^1 q^2 > q_m^1 q^1 q_m^2 - (q^1)^2 q_m^2 \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1.$$

Но рассматривается случай неблокировки перекрестка, т.е. $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \le 1$, т.е. получено противоречие. Аналогично, если

$$\frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} > \frac{q_m^2 - q^2}{q^2} \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} > \frac{q_m^2 - q^2}{q_m^2} \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} > 1 - \frac{q^2}{q_m^2} \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1,$$

т.е. противоречие с условием утверждения. *Утверждение доказано*.

Полученное оптимальное решение запишем относительно общего времени цикла работы светофора. Пусть T – цикл работы светофора в двухфазном режиме. Тогда $\frac{T^{q^1}/_{q_m^1}}{q^1/_{q_m^1} + q^2/_{q_m^2}}$ – время горения зеленого цвета светофора для АТС, въезжающих в перекресток по трассе 1, $\frac{T^{q^2}/_{q_m^2}}{q^1/_{q_m^1} + q^2/_{q_m^2}}$ – время горения зеленого цвета светофора для АТС, въезжающих в перекресток по трассе 2.

4. Запас устойчивости оптимального режима работы светофора

Пусть интервал возможных режимов работы светофора на $\left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}\right]$ не пуст.

В **утверждении 2** было показано, что оптимальный режим работы светофора, т.е.

$$\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} = \frac{q^1/_{q_m^1}}{q^2/_{q_m^2}},$$

входит в этот интервал.

Теперь покажем, как он относится со средней точкой интервала. Для этого представим крайние точки интервала через нагрузки $\frac{q^1}{q_m^1}$ и $\frac{q^2}{q_m^2}$. Получим:

$$\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} = \frac{q^1/_{q_m^1}}{1 - q^1/_{q_m^1}},$$

$$\frac{q_m^2 - q^2}{q^2} = \frac{1 - q^2/_{q_m^2}}{q^2/_{q_m^2}}.$$

Тогда средняя точка интервала определяется следующим образом:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{q^1/q_m^1}{1-q^1/q_m^1}+\frac{1-q^2/q_m^2}{q^2/q_m^2}\right)=\frac{1}{2}\frac{\left(\frac{2q^1q^2}{q_m^1q_m^2}+1-\frac{q^1}{q_m^1}-\frac{q^2}{q_m^2}\right)}{\frac{q^2}{q_m^2}-\frac{q^1q^2}{q_m^1q_m^2}}$$
$$=\frac{\left[\frac{2q^1q^2}{q_m^1q_m^2}-\left(\frac{q^1}{q_m^1}+\frac{q^2}{q_m^2}-1\right)\right]}{2\frac{q^2}{q_m^2}\left(1-\frac{q^1}{q_m^1}\right)} \quad (9)$$

Пусть перекресток не находится в зоне блокировки, т.е.

$$\frac{q^1}{q_m^1}+\frac{q^2}{q_m^2}=1-\alpha,\quad 0\le\alpha<1.$$

Тогда (9) перепишется в виде

$$\frac{\frac{q^1q^2}{q_m^1q_m^2}+\alpha}{\frac{q^2}{q_m^2}\left(1-\frac{q^1}{q_m^1}\right)}.$$

В том случае, когда интервал возможных значений горения зеленого по трассе 1 и по трассе 2 стягивается в точку, т.е. когда $\frac{q^1}{q_m^1}+\frac{q^2}{q_m^2}=1$, а $\alpha=0$, получим, что режим работы светофора таков:

$$\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2}=\frac{q^1/q_m^1}{q^2/q_m^2}.$$

Определим соотношение длин интервалов возможных значений оптимальной работы светофора на двухполостном перекрестке через точки 1, 2, 3, т.е.

$$\frac{q^1}{q_m^1-q^1},\quad \frac{q^1q_m^2}{q_m^1q^2},\quad \frac{q_m^2-q^2}{q^2}.$$

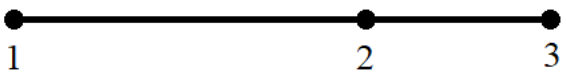


Рис. 2. *Геометрическое представление основных точек интервала возможных режимов работы светофора*

Fig. 2. *Geometric representation of the main points of the interval of possible traffic light operating modes*

Тогда

$$\text{интервал } (1-3) \text{ есть } \frac{q_m^2-q^2}{q^2}-\frac{q^1}{q_m^1-q^1},$$

$$\text{интервал } (2-3) \text{ есть } \frac{q_m^2-q^2}{q^2}-\frac{q^1q_m^2}{q_m^1q^2}.$$

Найдем соотношение между длинами интервалов (1–3) и (2–3).

$$\frac{q_m^2 - q^2}{q^2} - \frac{q^1}{q_m^1 - q^1} = \frac{q_m^1 q_m^2 - q_m^1 q^2 - q^1 q_m^2}{q^2(q_m^1 - q^1)}.$$

Разделив числитель и знаменатель дроби на $q_m^1 q_m^2$, получим

$$\frac{1 - \frac{q^2}{q_m^2} - \frac{q^1}{q_m^1}}{\frac{q^2}{q_m^2} - \frac{q^1}{q_m^1}\frac{q^2}{q_m^2}}$$

Аналогично интервал (2–3) есть

$$\frac{q_m^2 - q^2}{q^2} - \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} = \frac{1 - \frac{q^2}{q_m^2} - \frac{q^1}{q_m^1}}{\frac{q^2}{q_m^2}}.$$

Разделив (1–3) на (2–3), получим:

$$\frac{\frac{1 - \frac{q^2}{q_m^2} - \frac{q^1}{q_m^1}}{\frac{q^2}{q_m^2} - \frac{q^1}{q_m^1}\frac{q^2}{q_m^2}}}{\frac{1 - \frac{q^2}{q_m^2} - \frac{q^1}{q_m^1}}{\frac{q^2}{q_m^2}}} = \frac{\frac{q^2}{q_m^2}}{\frac{q^2}{q_m^2}\left(1 - \frac{q^1}{q_m^1}\right)} = \frac{1}{1 - \frac{q^1}{q_m^1}}. \quad (10)$$

Таким образом, получены следующие основные характеристики и параметры перекрестка с двухфазным светофорным управлением:

– q_m^1, q_m^2 – пропускные способности трасс перекрестка относительно потоков по трассе 1 и по трассе 2;

– $\frac{q^1}{q_m^1}, \frac{q^2}{q_m^2}$ – нагрузки АТС на перекресток по трассе 1 и по трассе 2;

– $\left(\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}\right)$ – общая нагрузка АТС на перекресток;

– $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1$ – условие работы светофора в нормальном режиме;

– $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1$ – условие блокировки перекрестка;

– $\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}\right]$, если $\frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$ и перекресток не блокирован – возможный интервал работы светофора

– $\frac{T_{зел}^2}{T_{зел}^1} \in \left[\frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \frac{q_m^1 - q^1}{q^1}\right]$, если $\frac{q^2}{q_m^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1}$ и перекресток не блокирован – возможный интервал работы светофора.

Следует иметь в виду, что параметры каждой трассы определяются через параметры полутрасс каждой трассы следующим образом:

$$q^1 = q^{11} + q^{12}, q_m^1 = q_m^{11} + q_m^{12}$$

$$q^2 = q^{21} + q^{22}, q_m^2 = q_m^{21} + q_m^{22}$$

т.е. в подробной записи:

$$\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \quad \text{есть} \quad \frac{(q^{11} + q^{12})}{(q_m^{11} + q_m^{12}) - (q^{11} + q^{12})};$$

$$\frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \quad \text{есть} \quad \frac{(q^{21} + q^{22})}{(q_m^{21} + q_m^{22}) - (q^{21} + q^{22})};$$

$$\frac{q^1}{q_m^1} \quad \text{есть} \quad \frac{(q^{11} + q^{12})}{(q_m^{11} + q_m^{12})};$$

$$\frac{q^2}{q_m^2} \quad \text{есть} \quad \frac{(q^{21} + q^{22})}{(q_m^{21} + q_m^{22})},$$

где q^{11}, q^{12} – потоки АТС по полутрассам 1-й трассы; q^{21}, q^{22} – потоки АТС по полутрассам 2-й трассы; q_m^{11}, q_m^{12} – пропускные способности полутрасс 1-й трассы; q_m^{21}, q_m^{22}– пропускные способности полутрасс 2-й трассы.

5. Алгоритм определения основных характеристик перекрестка

1. Задать значения потоков по полутрассам трасс 1 и 2: $q^{11}, q^{12}, q^{21}, q^{22}$ и пропускных способностей по полутрассам каждой трассы: $q_m^{11}, q_m^{12}, q_m^{21}, q_m^{22}$.
2. Вычисляются величины $\frac{q_1^1}{q_{m,1}^1 - q_1^1}$, $\frac{q_2^1}{q_{m,2}^1 - q_2^1}$; $\frac{q_1^2}{q_{m,1}^2 - q_1^2}$, $\frac{q_2^2}{q_{m,2}^2 - q_2^2}$ и из каждой из этих пар значений выбирается наибольшее. Пусть это соответственно $\frac{q_1^1}{q_{m,1}^1 - q_1^1}$ и $\frac{q_2^2}{q_{m,2}^2 - q_2^2}$. Тогда $q^1 := q_1^1$, $q_m^1 := q_{m,1}^1$; $q^2 := q_2^2$, $q_m^2 := q_{m,2}^2$.
3. Определяется наибольшее из значений $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}$ и $\frac{q^2}{q_m^2 - q^2}$. Пусть это $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}$.
4. Вычисляется величина нагрузки АТС на перекресток:

$$B = \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}.$$

5. Если $B \leq 1$, то на 7).
6. Выдается значение B и фраза «Перекресток находится в зоне блокировки». На 9).
7. Определяется интервал возможных рабочих режимов работы светофора $\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}\right]$.
8. Определяется оптимальный режим работы светофора на перекрестке $\left(\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2}\right)_{opt} = \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2}$, если $\frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$ и $\left(\frac{T_{зел}^2}{T_{зел}^1}\right)_{opt} = \frac{q^2 q_m^1}{q_m^2 q^1}$, если $\frac{q^2}{q_m^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1}$ и возможный интервал работы светофора.
9. Конец.

Ниже представлены таблица значений потоков по трассам перекрестка и оптимальные соотношения времен горения зеленого цвета светофора по трассам при $q_m^1 = 50 \frac{\text{атс}}{\text{мин}}$, $q_m^2 = 40 \frac{\text{атс}}{\text{мин}}$.

Таблица 1. Оптимальные соотношения времен горения зеленого цвета по трассам 1 и 2 при различных нагрузках АТС на трассы

Table 1. Optimal ratios of green light times on lanes 1 and 2 for different vehicle loads on the lanes

Значения потоков по трассе 2	Значения потоков по трассе 1: 10	15	20	25	30	35	40
10	44,4 55,6	54,6 45,4	61,6 38,4	66,7 33,3	70,6 29,4	73,7 26,3	
15	34,8 65,2	44,4 55,6	51,6 48,4	57,1 42,9	61,6 38,4		
20	28,6 71,4	37,5 62,5	44,4 55,6	50,0 50,0			
25	24,2 75,8	32,4 67,6					
30	21,0 79,0						
35							

Зона блокировки перекрестка

Таблица получена программной системой (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024613897 «Расчет возможных и оптимального режимов работы светофора на двухполостных по каждой из трасс перекрестках города». Буздов А. К., Кудаев В. Ч., дата гос. регистрации 16 февраля 2024 г.).

6. Трехфазный режим работы светофора на перекрестке города

1. Пусть перекресток находится в зоне блокировки при двухфазном режиме работы, т.е.

$$\frac{q^1}{q_m^1}+\frac{q^2}{q_m^2}>1.$$

Запишем условие блокировки более конкретно:

$$\frac{q^1}{q_m^1}+\frac{q^2}{q_m^2}=1+\alpha, \qquad 0<\alpha<1\,. \tag{11}$$

2. Можно ли за счет более сложной работы светофора, а именно при трехфазной его работе, вывести перекресток из зоны блокировки?

3. Рассмотрим следующий трехфазный режим. Пусть

$$\frac{q^1}{q_m^1}\geq\frac{q^2}{q_m^2}$$

и доля АТС, въезжающих в перекресток по полутрассам (1,1) и (1,2) 1-й трассы и проезжающих его без поворота налево в единицу времени, составляет p от общего потока по трассе q_1.

Как было показано ранее, при двухфазной работе светофора оптимальным является следующий режим:

$$\frac{T_3^1}{T_3^2}=\frac{q^1/q_m^1}{q^2/q_m^2}, \tag{12}$$

т.е. времена горения зеленого по трассам соотносятся в соответствии с нагрузками АТС по трассам. Поэтому выделим часть времени от T_3^1 на движение АТС по полутрассам (1,1) и (1,2), потокам АТС, не сворачивающим налево. Обозначим это время t_3^1 .

Тогда получим:

время $(T_3^1 - t_3^1)$ – нагрузка на 1-ю трассу равна $\frac{q^1}{q_m^1}$;

время t_3^1 – нагрузка на 1-ю трассу равна $p\frac{q^1}{q_m^*}$, где q_m^* составляет около 60 атс/мин., потоки по полутрассам (1,1) и (1,2) не мешают друг другу;

время T_3^2 – нагрузка на 2-ю трассу равна $\frac{q^2}{q_m^2}$.

Тогда общая нагрузка АТС на перекресток для его вывода из зоны блокировки должна удовлетворять условию

$$\left(\frac{q^1}{q_m^1} - p\frac{q^1}{q_m^*}\right) + \frac{q^2}{q_m^2} \le 1. \qquad (13)$$

Теперь следует связать это условие с условием, что в двухфазном режиме перекресток находится в зоне блокировки, т.е. с условием

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} = 1 + \alpha, \qquad \text{т. е.}$$

$$\frac{q^1}{q_m^1} = 1 + \alpha - \frac{q^2}{q_m^2}.$$

Подставив это в (13), получим следующее ***условие возможности вывода перекрестка из зоны блокировки на основе представленного трехфазного режима работы светофора***:

$$\alpha \le \frac{pq^1}{q_m^*}. \qquad (14)$$

7. Определение величины пропускной способности перекрестка

Измерения проводятся во время пиковой нагрузки на перекресток. Значение величины q_m на двухполосных перекрестках города при двухфазной работе светофора (т.е. $T_{\text{кр}}^1 = T_{\text{зел}}^2, T_{\text{кр}}^2 = T_{\text{зел}}^1$) определяется усреднено:

1. Определяется время цикла работы светофора – часто это двухминутный цикл, т.е. 120 сек.

2. Определяется количество АТС на двух однонаправленных полосах трассы, накопившихся за время горения красного цвета светофора по трассе.

3. Засекаются и фиксируются последние в очереди из них по каждой полосе.

4. Характеризацией максимального по плотности потока является то, что эти АТС стоят плотно друг относительно друга на расстоянии около 2 м, и после включения зеленого цвета светофора по трассе эти АТС с интервалом примерно 1 с начинают вдвигаться в перекресток, увеличивая скорость так, что расстояние между i-м и $(i+1)$-м слоем АТС больше, чем между $(i+1)$-м и $(i+2)$-м.

5. Определяется, за какое время t_{m_j} зафиксированных m_j машин, стоящих в очереди на прохождение перекрестка, при j-ом измерении прошли перекресток за время горения зеленого $T_{\text{зел}}$. Тогда

$$(q_m)_j = m_j \frac{T_{\text{зел}}}{t_{m_j}}.$$

6. Эксперимент проводится несколько раз во время пиковой нагрузки, т.е. во время наибольшего потока q по каждой из трасс перекрестка по времени суток, и усредняется, т.е.

$$q_m = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(q_m)_{j.} \tag{15}$$

Заключение

В результате научных исследований по задаче о режиме работы светофора на двухполосном перекрестке города получены следующие результаты:

1. На основе условия Лайтхилла–Уизема о режиме работы светофора (зеленый, красный), обеспечивающем ненакопление АТС перед светофором по трассе перекрестка, доказано общее условие (необходимое и достаточное) ненакопления транспортных средств перед светофором на перекрестке в целом.

2. Выделены основные параметры и характеристики перекрестка с двухфазным светофорным управлением.

3. Представлено оптимальное решение задачи о светофоре.

4. Определен запас устойчивости оптимального режима работы светофора.

5. Представлен укрупненный алгоритм определения основных характеристик перекрестка и разработана программа для ЭВМ, реализующая алгоритм.

6. Представлено геометрическое истолкование оптимального режима работы светофора в двухфазном режиме.

7. Представлены трехфазный режим работы светофора и условие возможности вывода перекрестка из зоны блокировки переходом от двухфазного режима работы светофора к трехфазному.

Рассмотрение двухполосных перекрестков связано не только с тем, что для них условие ненакопления АТС является интервальным (закрытый интервал), но и с тем, что такие перекрестки составляют значительную часть перекрестков городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гасников А. В.* Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: МФТИ, 2010. 417 с. ISBN: 978-5-7417-0334-2

2. *Lighthill M.J., Whitham G.B.* On kinematic waves: II Theory of traffic flow on long crowded roads // Proc. R. Soc. London. Ser. A. 1955. Vol. 229. Pp. 281–345.

3. *Уизем Дж.* Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

4. *Richards P.I.* Shock Waves on the Highway // Oper. Res., 1956. Vol. 4. Pp. 42–51.

5. *Шец С. П., Справцева Е. В., Калмыков А. А.* Применение имитационного моделирования при совершенствовании организации дорожного движения на перекрестке города Брянска // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 3(56). С. 67–72. DOI: 10.12737/article_59b11cbf31cbf2.58347936

6. *Новиков А. Н., Еремин С. В., Шевцова А. Г.* Основные принципы расчета программы светофорного регулирования на основе управляемых сетей и потока насыщения // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 6(70). С. 680–691. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-6-680-691

7. *Новиков И. А., Шевцова А. Г., Кравченко А. А., Бурлуцкая А. Г.* Разработка методики адаптации модели регулируемого пересечения // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17. № 6(76). С. 726–735. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735

8. *Калинин И. Н., Глухарев К. К.* Исследование интегральных характеристик перекрестков при помощи микроскопических моделей транспортных потоков // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 4. С. 523–534.

9. *Долгушин Д. Ю., Мызников Т. А.* Имитационное моделирование автотранспортных потоков для оценки альтернативных схем организации дорожного движения в городских условиях // Вестник СибАДИ. 2011. Т. 2(20). С. 47–52.

10. *Гаряев Н. А., Шаталина В. А.* Оптимизация пропускной способности перекрестка на базе многовариантного имитационного моделирования // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 12. С. 26–29. EDN: WCTOIL

11. *Лихачев Д. В., Дорохин С. В., Артемов А. Ю.* Анализ основных методов, применяемых в зарубежных методиках расчета светофорного цикла // В сб.: Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки. Материалы Национальной научно-практической конференции. Воронеж, 2022. С. 53–58. DOI: 10.34220/CIPDMS2022_53-58

12. *Минина Д. Н.* Моделирование в MATLAB движения автомашин на регулируемом перекрестке // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 2(67).

DOI: 10.18698/2541-8009-2022-2-774

13. *Кудаев В. Ч., Буздов А. К.* Полная система условий ненакопления автотранспортных средств перед светофором на симметричном двухполосном перекрестке // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 40. № 3. С. 103–112. DOI: 10.26117/2079- 6641-2022-40-3-103-112

14. *Кудаев В. Ч., Буздов А. К.* Возможные режимы и оптимизация работы светофора на двухполосном перекрестке города // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 65–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-65-73

REFERENCES

1. Gasnikov A.V. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov* [Introduction to Mathematical Modeling of Transport Flows] Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology, 2010. 417 p. ISBN: 978-5-7417-0334-2. (In Russian)

2. Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinematic waves: II Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. London. Ser. A.* 1955. Vol. 229. Pp. 281–345.

3. Uizem Dzh. *Lineynyye i nelineynyye volny* [Linear and nonlinear waves]. Moscow: Mir, 1977. (In Russian)

4. Richards P.I. Shock Waves on the Highway. *Oper. Res.*, 1956. Vol. 4. Pp. 42–51.

5. Shets S.P., Spravtseva E.V., Kalmykov A.A. Application of simulation modeling in improving traffic organization at an intersection in Bryansk. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2017. No. 3(56). Pp. 67–72. DOI: 10.12737/article_59b11cbf31cbf2.58347936. (In Russian)

6. Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G. Basic principles of calculating a traffic light control program based on controlled networks and saturation flow. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. 2019. Vol. 16. No. 6(70). Pp. 680–691. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-6-680-691. (In Russian)

7. Novikov I.A., Shevtsova A.G., Kravchenko A.A., Burlutskaya A. G. Development of a methodology for adapting a controlled intersection model. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. 2020. Vol. 17. No. 6(76). Pp. 726–735. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735. (In Russian)

8. Kalinin I.N., Glukharev K.K. Study of integral characteristics of intersections using microscopic models of traffic flows. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer research and modeling]. 2014. Vol. 6. No. 4. Pp. 523–534. (In Russian)

9. Dolgushin D.Yu., Myznikov T.A. Simulation modeling of road traffic flows to assess alternative traffic management schemes in urban conditions. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. 2011. Vol. 2(20). Pp. 47–52. (In Russian)

10. Gariaev N.A., Shatalina V.A. Optimization of intersection capacity based on multivariate simulation modeling. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. 2022. No. 12. Pp. 26–29. EDN: WCTOIL. (In Russian)

11. Likhachev D.V., Dorokhin S.V., Artemov A.Yu. Analysis of the main methods used in foreign methods for calculating the traffic light cycle. V sbornike: *Aktual'nyye voprosy i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki. Materialy Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual issues and prospects for the development of modern science. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference. Responsible]. Voronezh, 2022. Pp. 53–58. DOI: 10.34220/CIPDMS2022_53-58. (In Russian)

12. Minina D.N. Modeling in MATLAB of car traffic at a regulated intersection. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Polytechnical youth journal]. 2022. No. 2(67). DOI: 10.18698/2541-8009-2022-2-774. (In Russian)

13. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. Complete system of conditions for non-accumulation of vehicles in front of a traffic light at a symmetrical two-lane intersection. *Vestnik KRAUNTS* [Bulletin of KRAUNC]. Phys.-math. sciences. 2022. Vol. 40. No. 3. Pp. 103–112. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-103-112. (In Russian)

14. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. Possible modes and optimization of traffic lights at a two-lane intersection of the city. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6 (116). Pp. 65–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-65-73. (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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Кудаев Валерий Черимович, канд. физ.-мат. наук, вед. 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;

vchkudaev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4199, SPIN-код: 9931-1060

Буздов Аслан Каральбиевич, канд. физ.-мат. наук, стар. 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;

abuzdov@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9097-3348, SPIN-код: 6808-6669

Information about the authors

Valery Ch. Kudaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

vchkudaev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4199, SPIN-code: 9931-1060

Aslan K. Buzdov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

abuzdov@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9097-3348, SPIN-code: 6808-6669

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 004.89:528.8 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-129-138
EDN: FBKOLC

Система интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов

М. А. Абазоков[1, 2], К. Ч. Бжихатлов[✉1]

[1]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2
[2]Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН
117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65

Аннотация. В статье представлена система сбора и анализа распределенных геофизических данных с сенсорной сети полиландшафтных полигонов. Приведены архитектура и особенности программной реализации системы сбора и интеллектуального анализа данных с сенсоров с учетом отсутствия стабильного доступа в сеть интернет на территории полигонов. Представлены принципы реализации системы интеллектуального анализа данных с сенсоров, рассчитанной на использование различных подходов к созданию систем искусственного интеллекта. В частности, описан процесс обмена данными с программами для моделирования интеллектуальных систем на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Кроме того, представлена структура веб-сайта и базы данных сервиса, разработанного для сбора и обработки данных.

Ключевые слова: распределенная сеть сенсоров, интеллектуальная обработка данных, мультиагентные системы, нейрокогнитивные архитектуры, прогнозирование данных, беспроводные сенсорные сети, полиландшафтные полигоны, геофизические данные

Поступила 21.10.2024, одобрена после рецензирования 08.11.2024, принята к публикации 22.11.2024

Для цитирования. Абазоков М. А., Бжихатлов К. Ч. Система интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 129–138. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-129-138

MSC: 68T01; 93C65 Original article

Intelligent system to analyse distributed geophysical data for a network of test ranges with multiple landscapes

M.A. Abazokov[1,2], K.Ch. Bzhikhatlov[✉1]

[1]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street
[2]V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS
117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street

Abstract. The article presents a system for collecting and analysing distributed geophysical data from a sensor network of test ranges with multiple landscapes. The paper presents an architecture and features of a software for collecting data from sensors and for their intelligent analysis, taking into account the lack of stable access to the Internet on the territory of the test ranges. The article shows principles of intelligent system analysis of sensor data designed to use various approaches to create

© Абазоков М. А., Бжихатлов К. Ч., 2024

artificial intelligence systems. Moreover, the process of data exchanging with programs to model intelligent systems based on multi-agent neurocognitive architectures is described. In addition, the structure of a website and database of a service for collecting and processing data are presented.

Keywords: distributed sensor network, intelligent data processing, multi-agent systems, neurocognitive architectures, test ranges with multiple landscapes, data forecasting, wireless sensor networks, geophysical data

Submitted 21.10.2024, approved after reviewing 08.11.2024, accepted for publication 22.11.2024

For citation. Abazokov M.A., Bzhikhatlov K.Ch. Intelligent system to analyse distributed geophysical data for a network of test ranges with multiple landscapes. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 129–138. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-129-138

Введение

Для обеспечения отработки сценариев применения различных транспортных средств с электроприводом ИПУ РАН в рамках коллаборации с рядом организаций (КБНЦ РАН, КНЦ РАН и САО РАН) разработана сеть полиландшафтных испытательных полигонов (полигонов, расположенных на территориях с различными климатическими условиями и ландшафтом) [1]. Сеть подобных полигонов позволит оптимизировать процесс тестирования разрабатываемых автономных роботов и транспортных средств, например, оценить применимость автономной транспортной платформы сельскохозяйственного назначения [2] для горного садоводства. Учитывая географический разброс и расположение в сложных условиях, ставится задача сбора и обработки данных о состоянии внешней среды для сети полиландшафтных полигонов.

Современные системы сбора данных чаще всего используют распределенную сеть отдельных сенсоров с системой сбора и обработки данных. Подобный подход, особенно с применением беспроводных систем связи, позволит обеспечить своевременный сбор и анализ данных в широком спектре областей – от медицинских носимых устройств [3] до мониторинга образовательного процесса [4]. Распределенные сенсорные сети на основе беспроводных протоколов передачи данных могут быть использованы и в условиях, где использование классических проводных датчиков или прямого наблюдения крайне затруднено (например, при мониторинге подземных объектов [5]).

Разработка подобных систем связана с вопросами балансировки вычислительной нагрузки и объемом сетевого трафика. Для этого можно использовать систему отслеживания триггерных событий, направленную на фиксацию и передачу только важных изменений в потоке данных [6]. В работе [7] предложен вариант оптимизации сетевого трафика для систем интернета вещей, расположенных в областях с ограниченным доступом к сети интернет, за счет использования интеллектуальной обработки данных. Авторы отмечают, что предложенная методика позволяет достичь значительного снижения сетевого трафика при сохранении достаточной точности. Кроме того, в условиях ограниченного доступа к глобальной сети применимы автономные мобильные системы сбора данных, например, беспилотные летательные аппараты с бортовой системой связи [8]. Стоит отметить, что кроме данных, в сенсорных сетях используются подходы для беспроводной передачи энергии, необходимой для обеспечения работоспособности сенсоров [9]. В подобной системе необходима реализация накопления и компрессии передаваемых данных для минимизации расходов энергии БПЛА. Подобные подходы интересны для полигонов, расположенных в условиях Крайнего Севера или в высокогорных районах (например, полигон у подножия горы Эльбрус).

Как отмечалось выше, одним из подходов к оптимизации сенсорной сети является использование узлов для интеллектуальной обработки данных. Например, в работе [10] авторы предлагают парадигму AIoT (Artificial intelligence Internet of things – интернет вещей с искусственным интеллектом), основанную на интеграции интернета вещей и современных решений в области искусственного интеллекта. В этом случае обработка и предварительный анализ большого объема собранных данных ложится на искусственные нейронные сети, что позволит автоматизировать анализ данных и принятие решений в реальном времени. Большинство рассмотренных систем интеллектуальной обработки данных с сенсорных сетей используют искусственные нейронные сети или методы анализа больших данных [3, 4, 7, 10] и не предполагают реализацию набора независимых систем анализа данных.

Целью данной работы является разработка системы анализа распределенных геофизических данных на основе распределенной сети сенсоров и использования системы обработки данных на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, которая в перспективе позволит обеспечить интеллектуальную обработку получаемых данных. В качестве примера источника данных рассматривается метеостанция на высокогорном полигоне.

Архитектура системы интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов

Основной задачей разрабатываемой системы сбора и анализа распределенных геофизических данных является агрегирование данных с набора разномодальных датчиков, расположенных в разных точках на исследуемой территории. В частности, для обеспечения работы полиландшафтных полигонов стоит задача сбора и обработки метеоданных на разных участках, расположенных в предгорной и горной зонах Кабардино-Балкарской Республики (в г. Нальчике и у подножия горы Эльбрус). Схема архитектуры подобной системы показана на рис. 1.

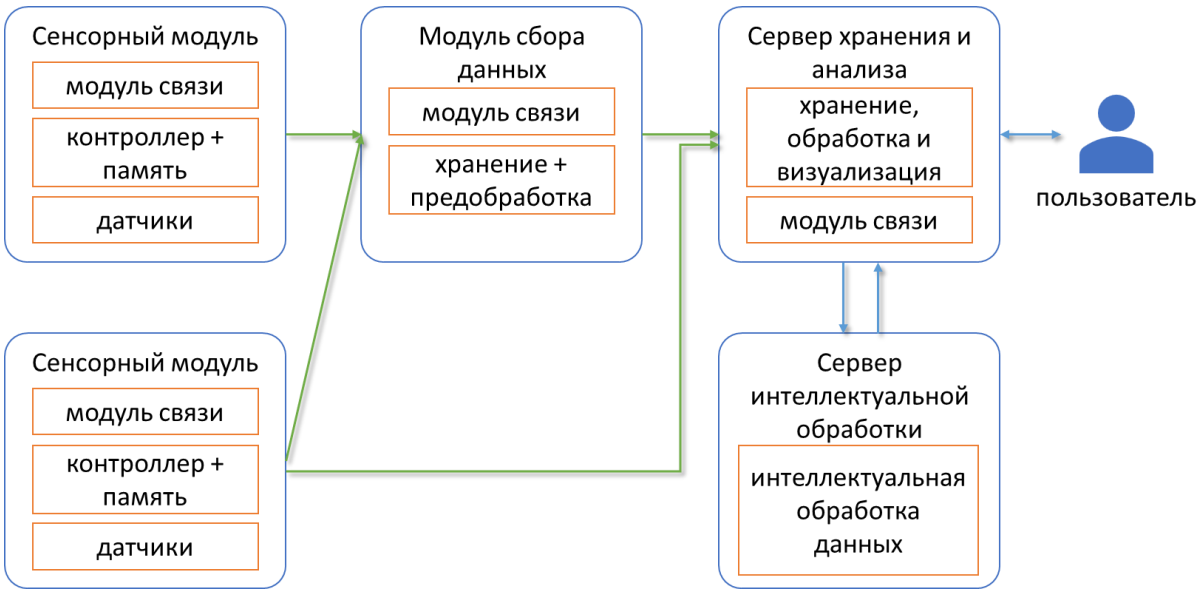


Рис. 1. *Архитектура системы интеллектуального анализа распределенных данных*

Fig. 1. *Architecture of the intelligent system to analyse distributed data*

Основным источником данных в подобной системе является сенсорный модуль, состоящий из микроконтроллера, модуля связи и расширяемого набора датчиков, причем состав и количество датчиков на модуле не ограничены, что позволяет достаточно просто масштабировать сенсорную систему. Все сенсорные модули занимаются сбором данных,

их временным хранением (при отсутствии связи) и отправкой на ближайший доступный модуль сбора данных. Эти модули в свою очередь также могут собирать данные, проводить базовую предобработку и пересылать их к основному серверу. Сервер хранения и анализа данных представляет собой классических веб-сервер, где все полученные данные обрабатываются и хранятся в базе данных. При этом для обеспечения интеллектуальной обработки данных на сервере реализована возможность отправки полученных данных на отдельные системы интеллектуальной обработки (как в рамках локальной сети, так и по сети интернет) за счет набора соответствующих программных протоколов. То есть после сбора определенного набора данных с сенсорной сети сервер принимает решение о необходимости их обработки (например, прогнозирования следующих значений) и отправляет запрос на отдельный сервис, а полученный ответ также записывает в свою базу данных. Кроме того, сервер отвечает за визуализацию данных и взаимодействие с пользователями и администраторами системы.

Использование набора программных протоколов (API) позволяет использовать различные подходы в интеллектуальной обработке многомодальных данных, включая как классические нейронные сети, сверточные нейронные сети, большие языковые модели, так и более специфические формализмы обработки данных. Например, для прогнозирования новых показаний датчиков предполагается использование сервиса, в рамках которого реализована полносвязанная нейронная сеть с возможностью дообучения и прогнозирования по запросу в виде json-сообщения. Схема подобного взаимодействия показана на рис. 2.

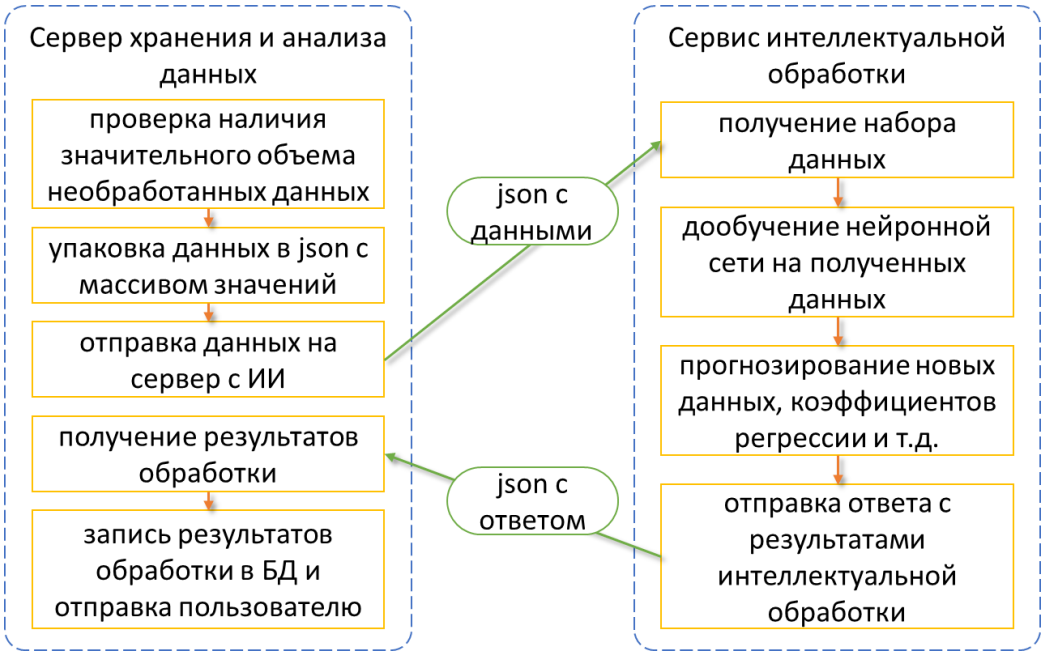


Рис. 2. *Схема взаимодействия сервера хранения и сервиса обработки с помощью искусственных нейронных сетей*

Fig. 2. *Interaction scheme of the storage server and the processing service by artificial neural networks*

В этом случае основной сервер отслеживает получаемые данные и при наличии значительного массива принимает решение о дообучении нейронной сети, используемой для прогнозирования показаний датчиков. В этом случае все необработанные данные собираются в виде единого json-сообщения и отправляются на сервер интеллектуальной обработки. На нем в свою очередь этот запрос запускает процесс дообучения нейронной сети

(на полученных данных). Затем нейронная сеть используется для прогнозирования будущих показаний датчиков (в том числе прогнозирования коэффициентов линейной или полиноминальной регрессии, текстовые ответы от большой языковой модели и т.д.). Результаты работы отправляются обработано на сервер (в виде json сообщения с указанием номера запроса). Результаты записываются в базу данных и используются для дальнейшей оценки состояния внешней среды на полигоне. При этом запрос на сервис интеллектуальной обработки может быть инициирован не только наличием новых данных, но и прошествием определенного промежутка времени без новых прогнозов.

Схожим образом реализована работа с другими формализмами искусственного интеллекта. В частности, основным подходом, который предполагается использовать для анализа данных с распределенной сенсорной сети, является моделирование процесса принятия решений на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур [11]. Данный формализм предполагает моделирование головного мозга человека с помощью мультиагентной модели, где каждый агент-нейрон обеспечивает свое проактивное поведение за счет собственной продукционной базы знаний и целевой функции максимизации внутренней энергии. Совместная работа группы подобных агентов-нейронов (интеллектуального агента) позволит обеспечить интеллектуальное поведение системы в целом. Программная реализация системы моделирования подобных архитектур описана в [12]. Работа с программой моделирования мультиагентных нейрокогнитивных систем осуществляется по протоколу WebSocket. Схема взаимодействия сервера хранения и анализа данных с интеллектуальным агентом показана на рис. 3.

Рис. 3. *Схема взаимодействия сервера хранения и анализа данных и интеллектуального агента для их обработки*

Fig. 3. *Interaction scheme of the data storage and analysis server, and the intelligent agent to process them*

В этом случае сервер отслеживает появление новых модулей в системе и для каждого из них определяет набор входящих в него сенсоров, после чего отправляет соответствующее сообщение в мультиагентную нейрокогнитивную архитектуру. В результате в данной архитектуре должны быть созданы новые агенты, отвечающие за репрезентацию реальных сенсоров, установленных в модуле. Кроме этого, интеллектуальному агенту от-

правляется информация о месте расположения и условиях работы модуля. Затем все полученные с реальных сенсоров данные и запросы от пользователей пересылаются в виде сообщений соответствующим агентам-сенсорам. А результат работы мультиагентной архитектуры в виде сообщений агентам-эффекторам отправляется обратно на сервер, где они также записываются в базу данных и отправляются пользователям. При этом стоит отметить, что, кроме данных с сенсоров, интеллектуальному агенту отправляются данные о времени и месте фиксации, параметрах сенсоров (точность, скорость измерения показаний и др.), а также информация об условиях в месте расположения сенсорного модуля (координаты, расстояние до ближайшего модуля сбора данных, высота над уровнем моря, климатическая зона и т.д.). Это позволит составить более полную картину условий на полигоне.

Алгоритмы и программное обеспечение для сбора, хранения, визуализации и обработки данных

Для тестирования описанной системы была разработана программа для сбора и обработки данных с распределенной сети полиландшафтных полигонов. Программа реализована в виде веб-сервера, отвечающего за сбор данных с различных модулей сбора и сенсорных модулей. В этой же программе реализован протокол для обмена информацией с различными системами интеллектуального анализа данных, а также пользовательский интерфейс (в виде веб-сайта). Структура веб-сайта системы интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов приведена на рис. 4.

Рис. 4. *Структура веб-сайта системы интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов*

Fig. 4. *The website structure of the intelligent system to analyse distributed geophysical data for a network of test ranges with multiple landscapes*

При входе пользователь попадает на страницу авторизации (login), где можно войти в свою учетную запись или создать новую. Стоит отметить также наличие перехода на страницу администратора (admin), который имеет возможность управлять списком пользователей и организаций, зарегистрированных на сервере. После входа пользователи пе-

ренаправляются на страницу со списком доступных полигонов (my_polygons), где пользователь может создавать, редактировать и удалять полигоны или перейти на страницу конкретного полигона (polygon). Здесь пользователь уже работает со списком сенсорных модулей, установленных на полигоне. В частности, можно добавить или удалить модуль, а также перейти на страницу управления модулем (module) или на страницу просмотра данных с датчиков полигона (data). На странице просмотра данных сервер выводит графики всех сенсоров, используемых в полигоне, карту распределения показаний, а также результаты взаимодействия с интеллектуальными системами обработки данных – прогнозируемые значения показаний и рекомендации по реагированию на условия на полигоне. Редактирование модуля позволяет изменять список сенсоров, менять протоколы обмена данными и корректировать параметры используемых датчиков.

Все данные системы хранятся в реляционной базе данных (в проекте используется SQLite). Структура базы данных показана на рис. 5.

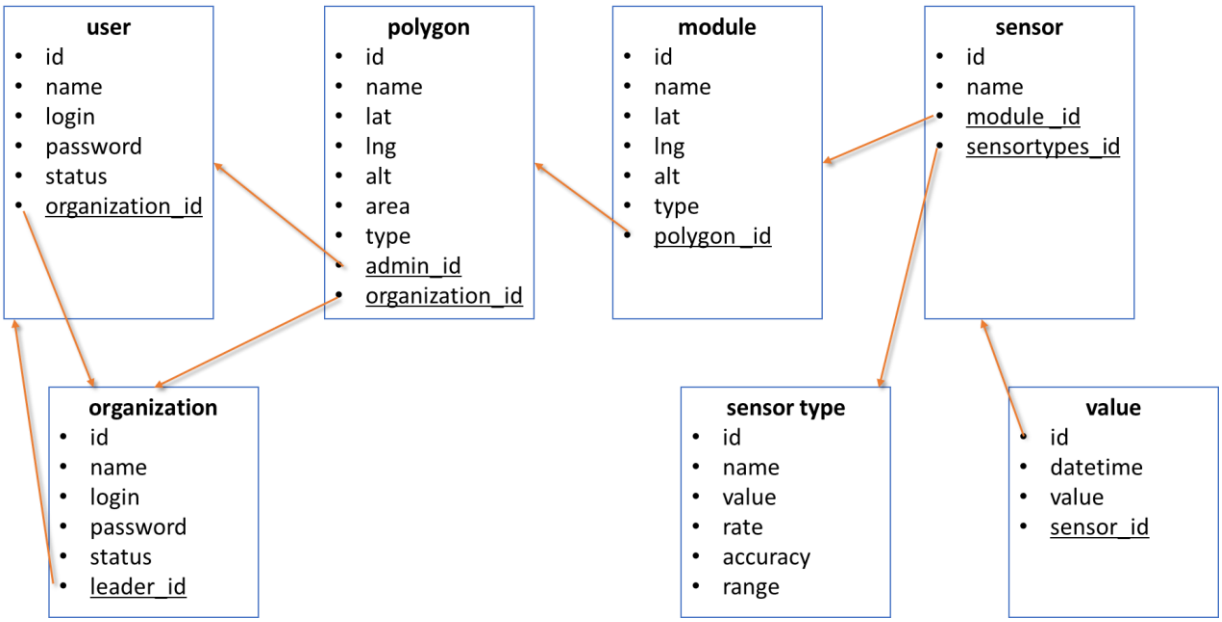


Рис. 5. *Структура базы данных системы интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов*

Fig. 5. *Database structure of the intelligent system to analyse distributed geophysical data for a network of test ranges with multiple landscapes*

В базе данных используются таблицы с данными пользователей (user), организаций (organization), полигонов (polygon), модулей (module), сенсоров (sensor), типов сенсоров (sensor type) и таблица с данными датчиков (value). В таблице полигона и модуля указываются координаты и высота над уровнем моря, а уже в таблице с данными – время, когда был произведен замер. Измеряемая величина, единица измерения, точность и допустимый диапазон хранятся в таблице sensor type.

Наличие данных о координатах позволяет построить карту распределения параметров, причем и на территории одного полигона. Для этого положение датчиков пересчитывается в расстояние от центра полигона по двум осям по формулам:

$$d_x = \left(lat_p - lat_s\right) \cdot \frac{\pi \cdot R_z}{180},$$

$$d_y = \left(lng_p - lng_s\right) \cdot cos\left(\frac{\pi \cdot lat}{180}\right) \cdot \frac{\pi \cdot R_z}{180},$$

а расстояние между точками рассчитывается с учетом перепада по высоте:

$$r = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + (alt_c - alt_i)^2}.$$

Это позволяет строить трехмерные карты распределения измеряемых параметров, что может быть актуально при проведении испытаний летательных аппаратов на полиландшафтном полигоне. Стоит отметить, что все полученные и рассчитанные данные отправляются в системы принятия решений за счет использования HTTP-запросов или соединений через web socket в виде json-сообщений. На данный момент реализовано взаимодействие с программой моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур, куда отправляются запросы двух типов: на создание агентов (Add agent) и отправку сообщений на них (New message). Полученные ответы также сохраняются в виде полей в таблице value.

На данном этапе ведется доработка программного и аппаратного обеспечения разрабатываемой системы интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов.

Заключение

В работе представлены архитектура и программная реализация системы интеллектуального анализа распределенных геофизических данных для сети полиландшафтных полигонов. Представленная система основана на наборе сенсорных модулей, работающих с многомодальным набором датчиков, распределенной системе сбора данных и наборе сервисов для их хранения и интеллектуальной обработки. В отличие от представленных в открытом доступе систем обработки данных с сенсорных сетей предполагается использование набора интеллектуальных систем анализа, использующих различные формализмы искусственного интеллекта. В частности, для обеспечения анализа собранных на полигоне данных используется разработанная программа для моделирования процесса принятия решений на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Подобная реализация позволит отслеживать все необходимые данные об условиях на каждом полигоне и строить карты распределения параметров на территории полигона. При этом архитектура передачи данных учитывает сложность обеспечения постоянного доступа в сеть интернет. Дальнейшая работа предполагает изготовление набора сенсорных модулей и тестирование системы сбора данных совместно с мультиагентной системой принятия решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Коргин Н. А., Мещеряков Р. В.* Концепция проекта по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях: текущее состояние и перспективы развития // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. 2024. С. 1247–1251. URL: https://vspu2024.ipu.ru/node/17868

Korgin N.A., Meshcheryakov R.V. Concept of the project for the creation of a distributed network of testing grounds for testing scenarios for the use of heterogeneous groups of electric vehicles in difficult climatic and landscape conditions: current condition and development prospects. *XIV Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya* [XIV Russian Conference on Management Problems]. 2024. Pp. 1247–1251. URL: https://vspu2024.ipu.ru/node/17868. (In Russian)

2. *Ксалов А. М., Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А., Заммоев А. У.* Разработка транспортной подсистемы автономного робота для системы активной защиты растений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 2(106). С. 31–40. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-2-106-31-40

Ksalov A.M., Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Zammoev A.U. Development of a transport subsystem for autonomous robots for plant protection system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2022. No. 2(106). Pp. 31–40. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-2-106-31-40. (In Russian)

3. Tu J. Application of wireless sensor network model based on big data ecosystem in intelligent health monitoring system. *Journal of Function Spaces*. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2022/3179915

4. Zhang Y., Huang W. Design of intelligent diagnosis system for teaching quality based on wireless sensor network and data mining. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking.* 2021. Vol. 2021. No. 1. DOI: 10.1186/s13638-021-01902-w

5. LI F., Valero M., Cheng Y. et al. Distributed sensor networks based shallow subsurface imaging and infrastructure monitoring. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*. 2020. Vol. 6. Pp. 241–250. DOI: 10.1109/tsipn.2020.2975349

6. Ge X., Han Q., Zhang X. et al. Distributed event-triggered estimation over sensor networks: A survey. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2020. Vol. 50. No. 3. Pp. 1306–1320. DOI: 10.1109/tcyb.2019.2917179

7. Hou C., Zhao Q., Basar T. Optimization of web service-based data-collection system with smart sensor nodes for balance between network traffic and sensing accuracy. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021. Vol. 18. No. 4. Pp. 2022–2034. DOI: 10.1109/tase.2020.3030835

8. Lin C., Han G., Qi X. et al. Energy-optimal data collection for unmanned aerial vehicle-aided industrial wireless sensor network-based agricultural monitoring system: A clustering compressed sampling approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17. No. 6. Pp. 4411–4420. DOI: 10.1109/ tii.2020.3027840

9. Ijemaru G.K., Ang L., Seng K.P. Wireless power transfer and energy harvesting in distributed sensor networks: Survey, opportunities, and challenges. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2022. Vol. 18. No. 3. P. 155014772110677. DOI: 10.1177/15501477211067740

10. Seng K.P., Ang L., Ngharamike E. Artificial intelligence internet of things: A new paradigm of distributed sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2022. Vol. 18. No. 3. P. 155014772110628. DOI: 10.1177/15501477211062835

11. Nagoev Z.V., Pshenokova I.A., Nagoeva O.V., Sundukov Z.A. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures. *Cognitive Systems Research*. 2021. Vol. 66. Pp. 82–88. DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.10.015

12. Nagoev Z.V., Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Unagasov A.A. Algorithms and software for simulation of intelligent systems of autonomous robots based on multi-agent neurocognitive architectures. *Interactive Collaborative Robotics. Lecture Notes in Computer Science*. 2024. Vol. 14898. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_29

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 23-29-00681, https://rscf.ru/project/23-29-00681/?CODE=23-29-00681).

Financing. The study was conducted with financial support from the Russian Science Foundation (RSF grant No. 23-29-00681, https://rscf.ru/project/23-29-00681/?CODE=23-29-00681).

Информация об авторах

Абазоков Мухамед Адмирович, мл. науч. сотр. лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

гл. науч. сотр. лаборатории 57, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65;

abazokov1997@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8710-1562, SPIN-код: 5167-5962

Бжихатлов Кантемир Чамалович, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

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

Information about authors

Mukhamed A. Abazokov, Junior Researcher, Laboratory of Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

Chief Researcher of Laboratory 57, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences;

117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street;

abazokov1997@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8710-1562, SPIN-code: 5167-5962

Kantemir Ch. Bzhikhatlov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

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

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 519.7 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-139-145
EDN: FIUPQE

Применение метода машинного обучения для анализа неполных данных

Л. А. Лютикова

Институт прикладной математики и автоматизации –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А

Аннотация. В данной работе представлен комплексный подход к анализу неполных и неточных данных, проиллюстрированный на примере прогнозирования селей. Целью исследования является демонстрация того, как сочетание различных методов позволяет не только получать адекватные прогнозы, но и глубоко понимать логику принятия решений моделью, выявляя ключевые факторы, влияющие на прогноз. Ключевым моментом работы является использование категоризации числовых данных для повышения устойчивости моделей к выбросам и шуму, а также для учета нелинейных зависимостей. Комплексный подход основан на сочетании ассоциативного анализа данных и построения логического классификатора, который выступает в роли интерпретатора полученных решений. Такое сочетание позволило выявлять критически важные входные признаки и понимать, как модель использует информацию для формирования прогноза, выделять факторы, оказывающие наибольшее влияние на результат прогнозирования, обеспечивать точность и устойчивость прогнозов с учетом специфики и сложности данных о селевых потоках. Полученные в ходе исследования правила, являющиеся ключевыми принципами изучаемой области, способствуют более глубокому пониманию природы селей.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, кластерный анализ, ассоциативные правила

Поступила 15.10.2024, одобрена после рецензирования 04.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Лютикова Л. А. Применение метода машинного обучения для анализа неполных данных // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 139–145. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-139-145

MSC: 68T027 Original article

Application of machine learning method to analyse incomplete data

L.A. Lyutikova

Institute of Applied Mathematics and Automation –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street

Abstract. This paper presents an integrated approach to the analysis of incomplete and inaccurate data, illustrated by the example of mudflow forecasting. The aim of the study is to demonstrate how a combination of different methods allows not only to obtain adequate forecasts, but also to deeply understand the logic of decision-making by the model, identifying the key factors influencing the forecast. The key point of the work is the use of categorization of numerical data to increase the stability of models to outliers and noise, as well as to take into account nonlinear dependencies. The integrated approach

© Лютикова Л. А., 2024

is based on a combination of associative data analysis and the construction of a logical classifier, which acts as an interpreter of the obtained decisions. This combination made it possible to identify critical input features and understand how the model uses information to form a forecast, identify factors that have the greatest impact on the forecast result, ensure the accuracy and stability of forecasts taking into account the specificity and complexity of mudflow data. The rules obtained during the study, which are the key principles of the studied area, contribute to a deeper understanding of the nature of mudflows.

Keywords: machine learning, neural networks, cluster analysis, associative rules

Submitted 15.10.2024, approved after reviewing 04.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Lyutikova L.A. Application of machine learning method to analyse incomplete data. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 139–145. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-139-145

Введение

Несмотря на разнообразие подходов и методов обработки данных логический анализ позволяет выявить причинно-следственные связи и зависимости между различными переменными в данных, найти скрытые закономерности и тенденции в данных, которые могут быть незаметны при другом анализе.

Объединение различных методов логического анализа позволяет учесть больше аспектов данных, снизить влияние шума и выбросов и получить более точные прогнозы. Различные методы, используемые в комплексном анализе, могут выявлять как линейные, так и нелинейные взаимосвязи между переменными, что важно для сложных систем [1].

Исследование применяет машинное обучение для анализа характеристик селевых потоков на Северном Кавказе, используя имеющийся кадастр селей [2] с данными о генезисе, типе селя, площади бассейна, уклоне русла, длине реки, высоте истока и объеме выноса (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики селевых потоков

Table 1. Mudflow characteristics

№	Название водотока	Генезис селя	Тип селя	Площадь бассейна, S, км^2	Средний уклон русла, α, ‰	Длина реки, L, км	Высота истока, H, м абс.	Объем максимального единовременного выноса, W, м^3	Максимальный объем твердых отложений селя, W, м^3 (аналитическим методом)	Повторяемость 1 раз в n лет/ даты схода
1	Кичмалка	Д*	ВК	152,7	30	36	1909	10000	147240	1–2/ 31.05.93
2	Рхыкол	Д	ВК	9,8	52	10	1440	100000	81946	1–2/–
3	Кызылкол	Д	ВК	14,1	220	4,5	1520	50000	52140	1–5/–
4	Тазакол	Д	ВК	11,3	150	5	1525	50000	43200	1–5/–
5	Лахран	Д	ВК	22,2	102	5	1629	20000	35712	1–5/–
6	Большой Лахран	Д	ВК	21,8	190	6	1642	50000	53400	1–5/–

Примечание: Д – дождевой, ВК – водокаменный

Работа направлена на демонстрацию способности машинного обучения выявлять закономерности и создавать эффективные модели для классификации и прогнозирования селей. Анализ позволит углубить понимание процессов формирования селей, определить ключевые факторы риска и в конечном счете создать прогнозные модели для оценки последствий и управления селеопасными территориями. Полученные результаты имеют практическую ценность для инженерной и научной деятельности [3, 4].

Анализ данных

Задача состоит в разработке модели прогнозирования и классификации селей, основанной на логическом анализе данных. Цель анализа – выявление общих правил, порождающих эти зависимости, отбор наиболее информативных переменных и классификация типов селей.

Анализ кластеризации выявил слабую структуру в данных, разделив их на три группы, характеризующиеся различными физическими свойствами и типами селевых потоков.

Эти группы демонстрируют некоторые интересные закономерности.

Группа 1 отличается большими бассейнами и низким уклоном, что нетипично для селевых потоков. Это может свидетельствовать о более медленных и постепенных процессах формирования селей в этой группе.

Группы 0 и 2 различаются по высоте источника селей и объему селевых масс, но имеют схожий генезис и тип селей. Возможно, эти группы связаны с определенными географическими условиями, например, с особым рельефом или климатом.

Модель многопараметрической регрессии, построенная для прогнозирования целевой переменной, оказалась неэффективной. Высокое значение MSE (92477727488,7331) свидетельствует о значительных ошибках прогнозирования, а низкое значение R-квадрата (0,1235) указывает на крайне низкую объясняющую способность модели [5, 6].

Линейная модель неадекватно описывает нелинейные взаимосвязи между предикторами и целевой переменной, что является основной причиной неудовлетворительных результатов. В качестве меры по преодолению этой проблемы была применена категоризация числовых данных [2, 7, 8].

Категориальные данные

Преобразование непрерывных данных в категориальные позволяет учитывать нелинейные зависимости путем разбиения данных на интервалы, в которых взаимосвязи могут быть аппроксимированы линейными. Такой подход повышает устойчивость моделей к выбросам и шуму, упрощая интерпретацию результатов (табл. 2). Вместо анализа непрерывного спектра значений модель оперирует более компактным набором дискретных категорий, что упрощает сравнение и анализ.

Таблица 2. Диапазон значений для дискретизации

Table 2. Range of values for discretization

Группа	Площадь бассейна, S, км^2	Средний уклон русла, α, ‰	Длина реки, L, км	Высота истока, H, м абс.	M1, м^3	M2, м^3
Малый (0)	0 – 12,64	0 – 44,52	0 – 1492,8	0 – 1492,8	0 – 8300	0 – 71811,96
Средний (1)	12,64 – 58,45	44,52 – 105,76	1492,80 – 1644,48	1492,80 – 1644,48	8300 – 38800	71811,96 – 102840,08
Большой (2)	58,45 – +∞	105,76 – +∞	1644,48 –+∞	1644,48 – +∞	38800 – +∞	102840,08 –+∞

Теперь задача регрессии, описанная в предыдущем разделе, сводится к задаче классификации, поскольку целевая переменная становится категориальной. И задача может быть описана следующим образом [2, 9]:

$$X = \{x_1, x_2, ..., x_n\},\ \ x_i \in \{0, 1, ..., k_i - 1\}.$$

В нашей системе входными данными будут являться n=6, а выходными m=387:

$$\begin{pmatrix} x_1(y_1) & x_2(y_1) & \dots & x_n(y_1) \\ x_1(y_2) & x_2(y_2) & \dots & x_n(y_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1(y_m) & x_2(y_m) & \dots & x_n(y_m) \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_m \end{pmatrix} \quad (1)$$

Методы решения

Вместо того, чтобы предсказывать непрерывное значение объема максимального единовременного выноса «M1», мы теперь предсказываем, к какой из трех категорий (50, 51 или 52) относится «M1». После построения модели классификации с использованием дерева решений мы получили впечатляющие результаты, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Результат классификации объема максимального единовременного выноса

Table 3. Result of classification of the maximum one-time removal volume

Метрика / Объем выноса ($м^3$)	Recall (чувствительность)	Precision (точность)	Accuracy (правильность)	F1-мера
Малый (50)	1	1	1	1
Средний (51)	1	1	1	1
Большой (52)	1	1	1	1

Логические методы анализа – это построение ассоциативных правил и логического классификатора [10, 11].

Метод построения ассоциативных правил – это метод обнаружения скрытых взаимосвязей и закономерностей в больших объемах данных. Он фокусируется на поиске наборов элементов, которые часто встречаются вместе в данных. Этот метод обычно используется для анализа данных о транзакциях, где каждая запись представляет собой отдельную транзакцию.

В данной работе использовался алгоритм FP-Growth – это эффективный алгоритм для поиска ассоциативных правил в больших объемах данных. Он основан на построении специального дерева (FP-дерева), которое содержит часто встречающиеся элементы и их взаимосвязи. Алгоритм FP-Growth обходит это дерево, а не все данные целиком, что значительно ускоряет процесс поиска правил с высокой поддержкой. В итоге он находит все правила, удовлетворяющие заданным порогам поддержки и достоверности, значительно быстрее и эффективнее, чем другие алгоритмы, такие как Apriori [12].

После работы алгоритма самые важные ассоциативные правила представлены в табл. 4.

Таблица 4. Самые важные ассоциативные правила

Table 4. The most important association rules

№	Antecedents (причина)	Consequents (следствие)
232619	(D, GK, 11, 62)	(40, 32, 51, 22)
200538	(40, 11, 62)	(D, 32, 22, GK)
200510	(40, GK, 11, 62)	(D, 32, 22)
230187	(40, 32, 61, 51, 11, VK)	(C-D, 20)
230216	(40, 32, 61, 11, VK)	(C-D, 51, 20)

Анализ пяти выявленных закономерностей, используя методы булевой алгебры [9], показывает, что грязекаменные сели, даже при средней площади бассейна, отличаются значительным объемом максимального единовременного выноса и высоким содержанием твердых отложений.

Построение логического классификатора

Каждая строка (1) является зависимостью и может быть представлена следующим правилом:

$$\&_{j=1}^{m} x_j\left(y_i,\right) \to y_i. \tag{2}$$

Эти правила описывают зависимость конкретного выноса твердых отложений от остальных параметров данного селевого потока [8].

Представим их в следующей дизъюнктивной форме:

$$\bigvee_{j=1}^{m} \overline{x_j(y_i)} \vee y_i, \tag{3}$$

а зависимость всех исследуемых селевых потоков от своих параметров как

$$f(x,y) = \&_{i=1}^{n} \bigvee_{j=1}^{m} \overline{x_j(y_i)} \vee y_i. \tag{4}$$

В нашем случае $f\left(X\right) = \&_{j=1}^{387}\left(\&_{i=1}^{7} x_i \to P(y_j)\right)$

$$x_1 \in \{D,L,C-D,\}; \quad x_2 \in \{VK,GK\}; \quad x_3 \in \{10,,11,12\}; x_4 \in \{20,21,22\};$$
$$x_5 \in \{30,31,32\}; x_6 \in \{40,41,42\}; x_7 \in \{50,51,52\}.$$

$$P(60) = \begin{cases} 0 \text{ при } y_i = 61 \text{ или } 62 \\ 1 \text{ при } y_i = 60 \end{cases}; \qquad P(61) = \begin{cases} 0 \text{ при } y_i = 60 \text{ или } 62 \\ 1 \text{ при } y_i = 61 \end{cases};$$

$$P(62) = \begin{cases} 0 \text{ при } y_i = 60 \text{ или } 61 \\ 1 \text{ при } y_i = 62 \end{cases}.$$

Из огромного количества полученных правил (93 237) были отобраны наиболее значимые, в основном правила, содержащие категории 60, 61 или 62. Для упрощения и обобщения информации схожие правила были объединены, что сократило общее количество правил без потери ключевой информации [9].

В результате часть картины полученных правил изображена на рис. 1.

```
D ,GK, 12, 50, 60 |D, GK, 11,20,60|D, GK, 10, 30, 60
D, VK, 11, 50, 61| D, GK, 10,51, 61| D, GK, 31, 61
L-D, GK, 12, 32, 52, 62| L-D, VK, 11, 31 ,52, 62
```

Рис. 1. *Результирующие правила (здесь обозначения: «|»-«∨»; «,»- «&»)*

Fig. 1. *Resulting rules (here the notations are: «|»-« »; «,»- «&»)*

Данные можно проинтерпретировать следующим образом: сели с малым объемом твердых отложений (60) – это преимущественно небольшие грязекаменные дождевые потоки с низкой интенсивностью. Сели со средним объемом (61) характеризуются преобладанием дождевого генезиса, но включают как грязекаменные, так и водокаменные сели преимущественно со средними и крупными бассейнами. Сели с большим объемом (62) чаще всего вызваны ливневыми дождями (L-D) и связаны с крупными бассейнами и руслами.

Заключение

В результате можно утверждать, что логический анализ данных позволяет выделить набор фундаментальных правил, которые объясняют основные закономерности и взаимосвязи в данных. Эти правила являются основой исследуемой области, способствуют более глубокому пониманию ее природы и оптимизируют поиск решений.

Результаты исследования показывают, что даже неполные и неточные данные могут стать основой для создания эффективных моделей прогнозирования, что дает возможности в области управления рисками и повышения безопасности в зонах, подверженных селевым потокам. Это подчеркивает потенциал интеллектуальных аналитических систем для эффективного управления рисками и минимизации негативных последствий селевых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондратьева Н. В.* Предварительная оценка максимального объема твердых отложений селя методами математической статистики для Центрального Кавказа // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 50–56. URL: http://www.science-education.ru/118-13897

2. *Кондратьева Н. В., Аджиев А. Х., Беккиев М. Ю. и др.* Кадастр селевой опасности Юга европейской части России. М., Нальчик: Феория, 2015. 148 с.

3. *Caiafa C. F., Jordi Solé-Casals J.S.-C., Marti-Puig P. et al.* Decomposition methods for machine learning with small, incomplete or noisy datasets // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 23. P. 8481. DOI: 10.3390/APP10238481

4. *Kainthura P., Sharma N.* Hybrid machine learning approach for landslide prediction, Uttarakhand, India // Scientific reports. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 20101. DOI: 10.1038/s41598-022-22814-9

5. *Hadi F. A. A., Sidek L. M., Salih G. H. A. et al.* Machine learning techniques for flood forecasting // Journal of Hydroinformatics. 2024. Vol. 26. No. 4. Pp. 779–799. DOI: 10.2166/hydro.2024.208

6. *Lombardo L., Mai P. M.* Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results // Engineering Geology. 2018. Vol. 244. Pp. 14–24. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.07.019

7. *Rahmati O., Kornejady A., Samadi M. et al.* PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches // The Science of the total environment. 2019. Vol. 664. Pp. 296–311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.017

8. *Кюль Е. В., Езаов А. К., Канкулова Л. И.* Теоретические основы геоэкологического мониторинга горных геосистем // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11. № 1. С. 36–43. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-1-36-43

9. *Lyutikova L. A.* Methods for Improving the Efficiency of Neural Network Decision-Making // Advances in Automation IV. RusAutoCon 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering – 2023. Vol. 986. Pp. 294–303. DOI: 10.1007/978-3-031-22311-2_29

10. *Радеев Н. А.* Предсказание лавинной опасности методами машинного обучения // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 92–101. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-2-92-101

11. *Журавлев Ю. И.* Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. 1978. Т. 33. С. 5–68.

12. *Флах П.* Машинное обучение: наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015.

REFERENCES

1. Kondrat'eva N.V. Preliminary assessment of the maximum volume of solid mudflow deposits using mathematical statistics methods for the Central Caucasus. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014. No. 4. Pp. 50–56. URL: http://www.science-education.ru/118-13897. (In Russian)

2. Kondrat'eva N.V., Adzhiev A.Kh., Bekkiev M.Yu. et al. *Kadastr selevoy opasnosti Yuga evropeyskoy chasti Rossii* [Mudflow hazard cadastre of the South of the European part of Russia]. M., Nal'chik: Feoriya, 2015. 148 p. (In Russian)

3. Caiafa C.F., ,Jordi Solé-Casals J.S.-C., Marti-Puig P. et al. Decomposition methods for machine learning with small, incomplete or noisy datasets. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 23. P. 8481. DOI: 10.3390/APP10238481

4. Kainthura P., Sharma N. Hybrid machine learning approach for landslide prediction, Uttarakhand, India. *Scientific reports*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 20101. DOI: 10.1038/s41598-022-22814-9

5. Hadi F.A.A., Sidek L.M., Salih G.H.A. et al. Machine learning techniques for flood forecasting. *Journal of Hydroinformatics*. 2024. Vol. 26. No. 4. Pp. 779–799. DOI: 10.2166/hydro.2024.208

6. Lombardo L., Mai P.M. Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 244. Pp. 14–24. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.07.019

7. Rahmati O., Kornejady A., Samadi M. et al. PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches. *The Science of the Total Environment.* 2019. Vol. 664. Pp. 296–311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.017

8. Kyul' E.V., Ezaov A.K., Kankulova L.I. Theoretical foundations of geoecological monitoring of mountain ecosystems. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain areas]. 2019. Vol. 11. No 1. Pp. 36–43. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-1-36-43. (In Russian)

9. Lyutikova L.A. Methods for Improving the Efficiency of Neural Network Decision-Making. *Advances in Automation IV. RusAutoCon 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023. Vol. 986. Pp. 294–303. DOI: 10.1007/978-3-031-22311-2_29

10. Radeev N.A. Predicting Avalanche Hazard Using Machine Learning Methods. *Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii* [Bulletin of NSU. Series: Information technology]. 2021. Vol. 19, No 2. Pp. 92–101. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-2-92-101. (In Russian)

11. Zhuravlyov Yu.I. On an algebraic approach to solving recognition or classification problems. *Problemy kibernetiki* [Problems of cybernetics]. 1978. Vol. 33. Pp. 5–68. (In Russian)

12. Flakh P. *Mashinnoe obuchenie: nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotorye izvlekayut znaniya iz dannykh* [Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data]. Moscow: DMK Press, 2015. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Лютикова Лариса Адольфовна, канд. ф.-м. наук, зав. отделом нейроинформатики и машинного обучения, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;

lylarisa@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5819-9396, SPIN-код: 1679-7460

Information about the author

Larisa A. Lyutikova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Neural Networks and Machine Learning, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;

lylarisa@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5819-9396, SPIN-code: 1679-7460

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК: 004.91 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-146-157
EDN: FXNFBO

Информационное и алгоритмическое обеспечение обработки и анализа нормативных документов в сфере информационной безопасности в автоматизированной информационной системе

И. Р. Чеканов, А. С. Кузнецов✉

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

Аннотация. В данной научной статье рассмотрены вопросы, касающиеся разработки информационного и алгоритмического обеспечения процессов предварительной обработки и анализа нормативных документов в области информационной безопасности. Проведен системный анализ предметной области. С позиций системного подхода и структурного анализа рассмотрены процессы обработки и анализа нормативно-технической документации в области информационной безопасности. Выделены группы составляющих подпроцессов работы с нормативными документами. Построен комплекс информационных моделей детализации составляющих функциональных подпроцессов обработки и анализа нормативной документации в предметной области информационной безопасности. Выполнено построение обобщенной информационной модели процессов обработки и анализа нормативных документов по информационной безопасности с целью их актуализации в информационной базе данных с последующей генерацией отчетной документации. Приведено функциональное формализованное описание составляющих подпроцессов идентификации и сбора документов, классификации и систематизации документации, ввода документов в информационную базу данных, актуализации данных по информационной безопасности и генерации отчетной документации для лиц, принимающих решения. Представлено в виде блок-схемы алгоритмическое обеспечение работы пользователя с автоматизированной информационной системой. Предложенные подходы представляют собой динамическую модель информационной поддержки процессов подготовки, выработки, выбора и принятия управляющих решений.

Ключевые слова: формализация, систематизация, обработка и анализ документов, классификация, информационная безопасность

Поступила 15.10.2024, одобрена после рецензирования 05.11.2024, принята к публикации 21.11.2024

Для цитирования. Чеканов И. Р., Кузнецов А. С. Информационное и алгоритмическое обеспечение обработки и анализа нормативных документов в сфере информационной безопасности в автоматизированной информационной системе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 146–157. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-146-157

© Чеканов И. Р., Кузнецов А. С., 2024

MSC: 00A72 Original article

Information and algorithmic support for processing and analysis of regulative documents in the field of information security in an automated information system

I.R. Chekanov, **A.S. Kuznetsov**✉

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

Abstract. This scientific article examines in detail the issues related to the development of information and algorithmic support for the processes of preliminary processing and analysis of regulatory documents in the field of information security. A systems analysis of the subject area is carried out. From the standpoint of a systems approach and structural analysis, the processes of processing and analysis of regulatory and technical documentation in the field of information security are considered. Groups of constituent subprocesses of working with regulatory documents are identified. A set of information models of detailing the constituent functional subprocesses of processing and analysis of regulatory documentation in the subject area of information security is built. A generalized information model of the processes of processing and analysis of regulatory documents on information security is built for the purpose of their updating in the information database with the subsequent generation of reporting documentation. A functional formalized description of the constituent subprocesses of identification and collection of documents, classification and systematization of documentation, entering documents into the information database, updating information security data and generating reporting documentation for decision makers is provided. Algorithmic support for user work with the automated information system is presented in the form of a block diagram. The proposed approaches represent a dynamic model of information support for the processes of preparation, development, selection and adoption of management decisions.

Keywords: formalization, systematization, document processing and analysis, classification, information security

Submitted 15.10.2024, approved after reviewing 05.11.2024, accepted for publication 21.11.2024

For citation. Chekanov I.R., Kuznetsov A.S. Information and algorithmic support for processing and analysis of regulative documents in the field of information security in an automated information system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 146–157. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-146-157

Введение

Важнейшей частью цифровизации общества и применения информационных технологий в современном мире является обеспечение информационной безопасности (ИБ)[1]. Регламентируемые основы представлены фундаментальными нормативными и законодательными актами указанной области, такими как: Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», Федеральный закон от 27 июля 2006 г. №152 «О персональных

[1]ISO/IEC 27002:2022, Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security controls, *https://www.iso.org/standard/75652.html*

данных», Федеральный закон от 26 июля 2017 г. № 187 «О критической информационной инфраструктуре» и др.

Важной самостоятельной задачей является оценка всего перечня законодательных актов, затрагивающих область ИБ, однако согласно проведенным исследованиям [1] их количество превышает 400 документов. Большое разнообразие документационного обеспечения в области ИБ диктует необходимость создания системного описания процессов их обработки, анализа и классификации. Разработка эффективных механизмов и инструментов управления информационной безопасностью является актуальной научной задачей и требует системного подхода в анализе нормативно-правовой документации и применения методов формализации, в том числе в части совершенствования управления процессами обработки и анализа нормативных документов. Эффективное организационное управление невозможно без постоянного мониторинга и актуализации нормативно-правовой базы, что задает высокие требования к информационно-аналитическому сопровождению данных [2].

Целью работы является разработка информационного и алгоритмического обеспечения процессов предварительной обработки и анализа нормативных документов в области информационной безопасности.

В процессе проведения данного исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести системный анализ предметной области и выделить основные группы подпроцессов работы с нормативными документами.

2. Разработать комплекс информационных моделей, детализирующих функциональные подпроцессы обработки и анализа нормативной документации.

3. Построить обобщенную информационную модель, формализующую процессы обработки и анализа нормативных документов рассматриваемой области.

4. Разработать функциональное формализованное описание составляющих подпроцессов идентификации и сбора документов, классификации и систематизации документации, ввода документов в информационную базу данных, актуализации данных по информационной безопасности и генерации отчетной документации.

5. Разработать структурно-функциональную графическую блок-схему алгоритма работы пользователя с автоматизированной информационной системой управления информацией в сфере информационной безопасности.

Объектом исследования являются процессы обработки и анализа нормативной документации в области информационной безопасности, основанные на методах системного анализа. Предметом исследования выступает визуальное представление процессов работы с нормативными документами в области ИБ в виде информационных моделей детализации функциональных подпроцессов и алгоритмическое обеспечение процессов предварительной обработки и анализа нормативных документов по ИБ.

Основная часть.

Вербальная модель предметной области

Профессиональная деятельность специалистов в области информационной безопасности построена на общих правилах решения типовых процедур с использованием законодательной и нормативной базы – документационного обеспечения [3].

Основными опорными документами для работы являются: международные нормативные правовые акты (НПА), федеральные законы, указы Президента, постановления Правительства, акты министерств и ведомств, стандарты в области ИБ (ГОСТы), законы субъектов РФ, НПА Банка России, стандарты Банка, а также документы, носящие рекомендательный характер, и судебная практика.

Специалисту требуется классифицировать поставленную задачу по направлениям ИБ, предполагающим определенный пакет документов, можно выделить следующие основные группы:

1. «Информация».
2. «Защита информации».
3. «Аудит».
4. «Контроль».
5. «Управление».
6. «Угрозы».

Каждое направление содержит различное количество подгрупп и опорных документов, определяемых в соответствии с поставленной задачей.

Таким образом, процессы анализа, поиска и подбора документов, выявление приоритетных из числа отобранных и относящихся к решаемой задаче и являются целью автоматизации со стороны разрабатываемого программного обеспечения [4].

Экспертная информационно-аналитическая система (ЭИАС) представляет собой программную инструментальную среду для работы с документами в области информационной безопасности [5].

Основными задачами оператора являются систематизация подготовленного набора документов, регулярная актуализация и создание классификаторов для каждого документа, входящего в базу данных (БД) системы. В качестве классификаторов обычно выступают группы и подгруппы, выделяемые экспертами ИБ из заданного перечня, а также набор ключевых слов, составляемый при анализе документа [6].

Пользователю предоставлена возможность поиска с применением вычисления мер сходства запроса и набора ключевых семантических данных документа (расстояние Левенштейна) [7], с индексацией ключевых слов элементов БД и отражением наиболее подходящих элементов в соответствии с поставленным запросом пользователя [8].

Информационное обеспечение процессов предварительной обработки и анализа документов в области ИБ

Для более подробной детализации процессов предварительной обработки, анализа и классификации входящих документов в области ИБ на основе принципов системного подхода и структурного анализа были построены информационные модели формализации данных процедур. Построенный комплекс информационных моделей включает в себя описание функциональных процедур предобработки, анализа, классификации и записи в информационную БД документов в области ИБ.

На рис. 1 представлена обобщенная информационная модель предварительной обработки документов в области ИБ в автоматизированной информационной системе. Входной поток информации представлен набором документационного обеспечения законодательной и нормативной базы в области ИБ. Управляющие воздействия продиктованы ре-

гламентами и политиками регулирования процесса пополнения информационной базы данных нормативных документов (ИБД НД).

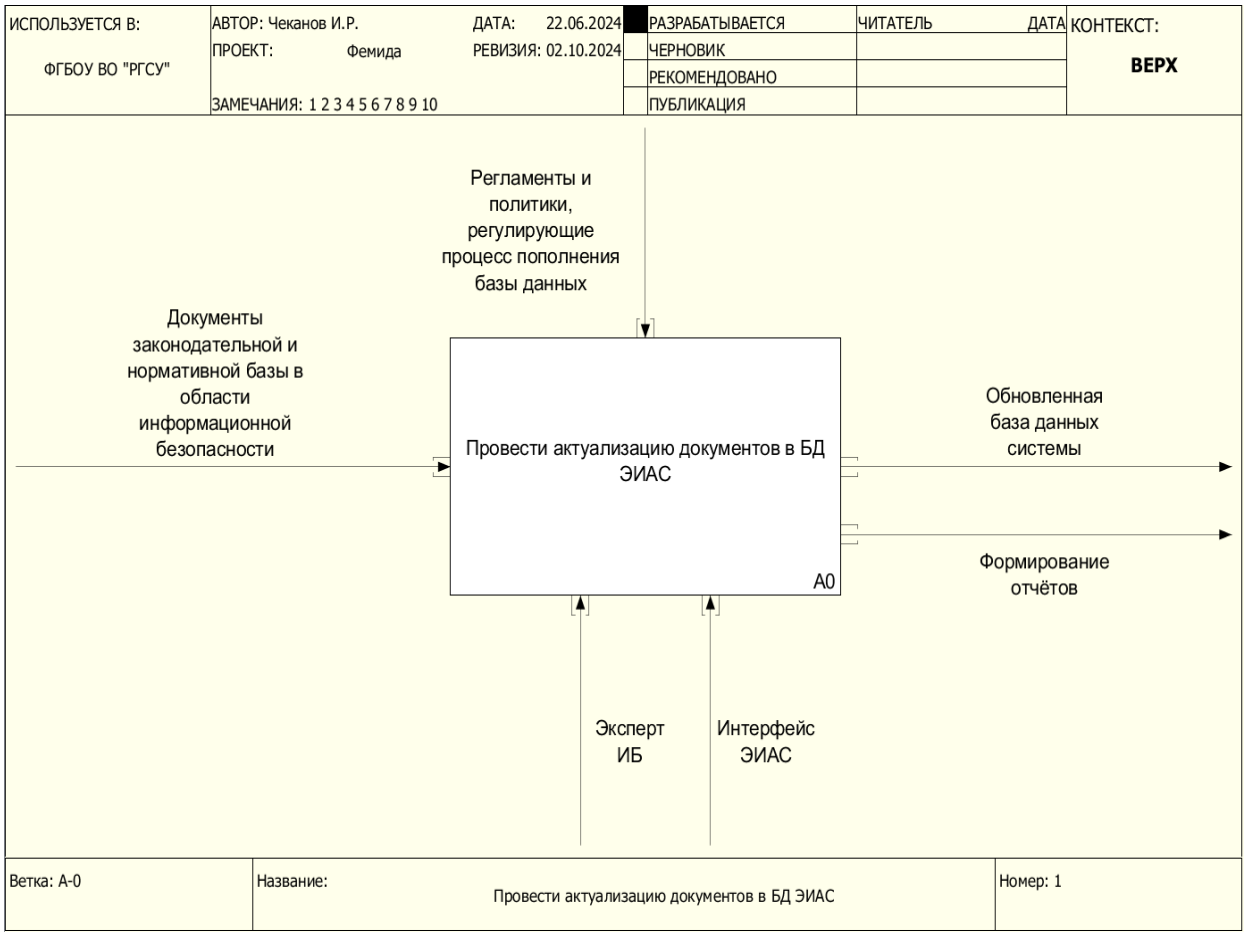


Рис. 1. *Обобщенная информационная модель предварительной обработки документов в области ИБ в ЭИАС*

Fig. 1. *Generalized information model of preliminary document processing in the field of information security in the EIAS*

Процесс реализуется конкретным исполнителем – экспертом в области ИБ с применением ЭИАС, взаимодействие осуществляется через разработанный интерфейс системы. Выходная информация процесса актуализации НД в области ИБ представлена выходными стрелками: это обновленная база данных НД в области ИБ, а также процессы формирования отчетной документации о работе ЭИАС.

Для конкретизации подпроцессов обработки и анализа НД в области ИБ была выполнена функциональная декомпозиция обобщенной информационной модели предварительной обработки документов по ИБ в АИС. Данная контекстная диаграмма представлена на рис. 2.

В ходе выполнения функциональной декомпозиции было четыре составляющих подпроцесса: идентификация и сбор документов по ИБ; классификация и систематизация документов по ИБ; ввод документов по ИБ в информационную базу данных; актуализация информационной базы данных – документационного обеспечения ИБ. Каждая стадия реализуется отдельным конкретным исполнителем процесса – специалистом по ИБ.

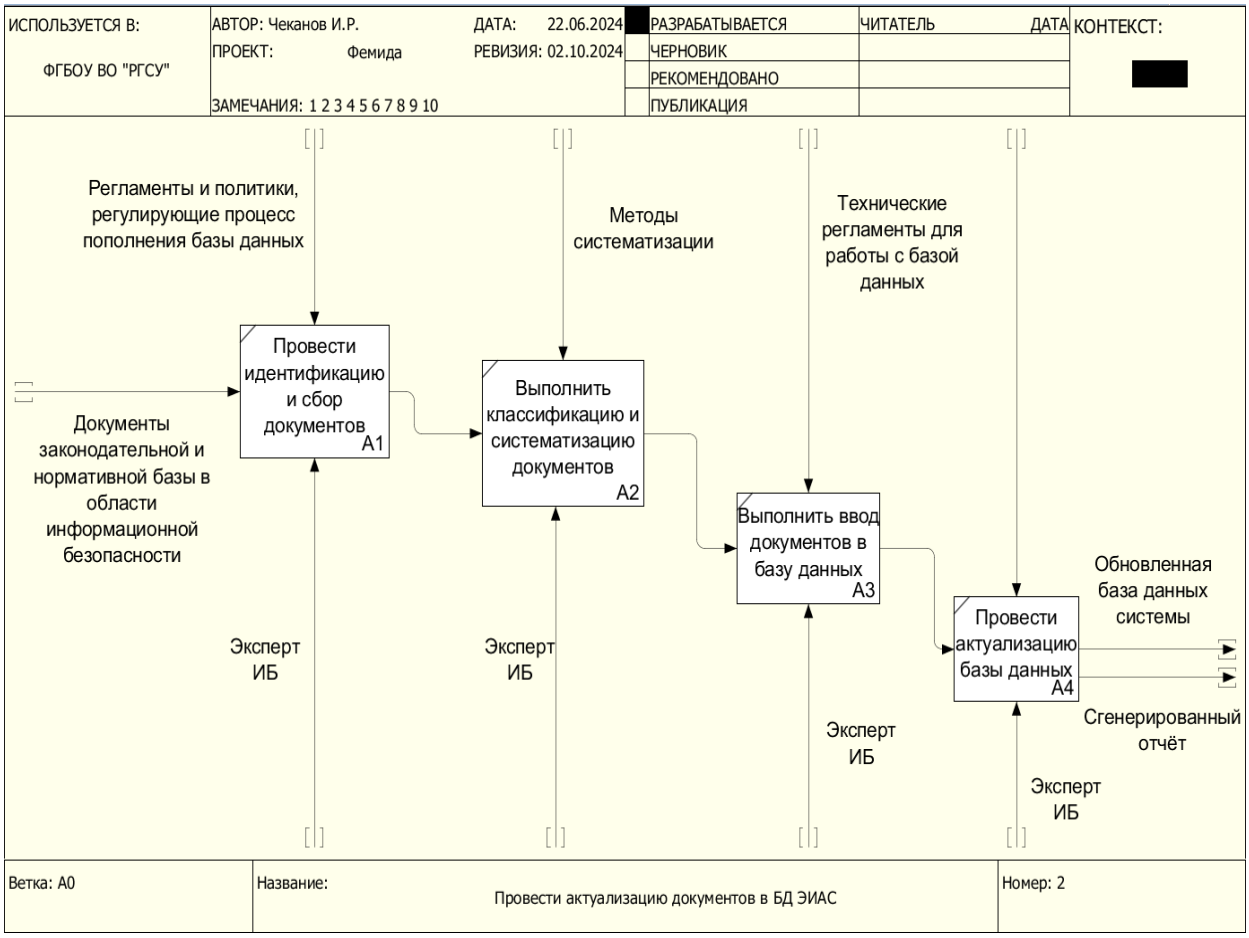


Рис. 2. *Декомпозиция обобщенной функциональной диаграммы – функциональные подпроцессы работы с документами в области ИБ в ЭИАС*

Fig. 2. *Decomposition of the generalized functional diagram – functional subprocesses of working with documents in the field of information security in the EIAS*

Управление данными подпроцессами реализовано на основе регламентов и политик пополнения ИБД, методов систематизации, технических регламентов работы с ИБД. На выходе имеется обновленная ИБД системы документационного обеспечения ИБ, а также система генерации отчетных документов для лиц, принимающих решения.

Алгоритмическое обеспечение процессов обработки и анализа документов по ИБ пользователем в ЭИАС

Предложенное информационное обеспечение в виде комплекса информационных моделей процессов работы с НД в области ИБ в ходе функциональной декомпозиции обобщенной информационной модели регламентировало перечень технических процессов, что позволило создать алгоритмическое обеспечение процессов предварительной обработки, анализа и актуализации документов в области ИБ пользователем ЭИАС. Предложенное алгоритмическое обеспечение в виде блок-схемы представлено на рис. 3.

На начальном этапе производится анализ поступающего документа на предмет наличия в информационной базе данных ЭИАС. В случае наличия подобного документа в базе данных производится проверка на актуальность его действия. Документ вносится в информационную БД только в том случае, если выявлена потребность в актуализации дан-

ных. Если подобный документ отсутствует в ИБД, вначале в ЭИАС выполняется процедура его классификации и затем добавления (записи) в ИБД.

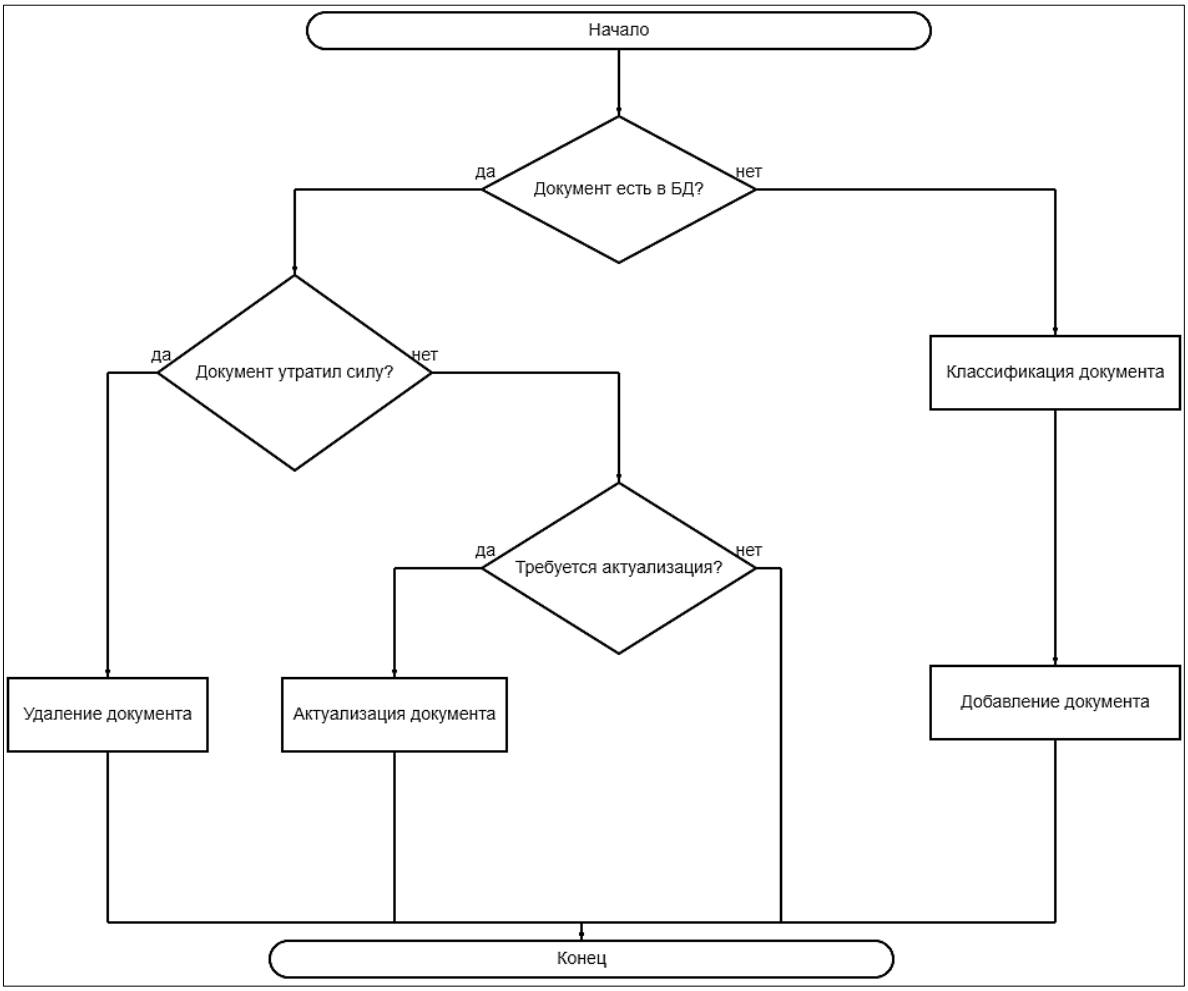


Рис. 3. *Блок-схема алгоритма предварительной обработки и анализа документов в области ИБ*

Fig. 3. *Block diagram of the algorithm for preliminary processing and analysis of documents in the field of information security*

Алгоритм обработки документов в экспертной информационно-аналитической системе состоит из последовательных этапов, обеспечивающих эффективное управление [9, 10] и актуализацию базы данных:

1. Сопоставительный анализ

На первом этапе происходит процесс сопоставления нового документа с уже имеющимися элементами базы данных. Это позволяет определить, существует ли данный документ в системе и какие дальнейшие действия необходимы.

2. Обработка отсутствующего документа

Если документ отсутствует в базе:

Производится классификация: документ соотносится к определенному направлению в области ИБ.

Присваиваются семантические значения: каждому добавляемому документу определяется перечень ключевых слов, используемый для дальнейшей работы алгоритма поиска ЭИАС.

3. Добавление документа

После классификации и присвоения семантических значений новый документ добавляется в базу данных, что расширяет ее содержимое и улучшает качество информации.

4. Обработка существующего документа

Если документ уже есть в базе:

Проверка действительности: сначала проверяется, является ли закон действующим и не утратил ли он силу.

Удаление: если документ утратил силу, он удаляется из базы данных для поддержания актуальности информации.

Актуализация: если документ остается действующим, проводится проверка на необходимость его актуализации. При необходимости осуществляется обновление информации в базе.

Таким образом, алгоритм обеспечивает не только добавление новых документов, но и поддержание актуальности уже существующих элементов БД, что является ключевым для эффективного функционирования ЭИАС.

Разработанное информационное и алгоритмическое обеспечение процессов обработки, анализа, актуализации и систематизации нормативных документов по ИБ послужило основой для создания ЭИАС «Фемида» [11]. Данная информационно-аналитическая система представляет собой программный инструмент информационной поддержки рабочих процессов, что позволяет пользователю эффективно управлять потоками электронных документов по ИБ на основе систематизации знаний и опыта экспертов в области ИБ [12]. Визуальный интерфейс ЭИАС представлен на рис. 4.

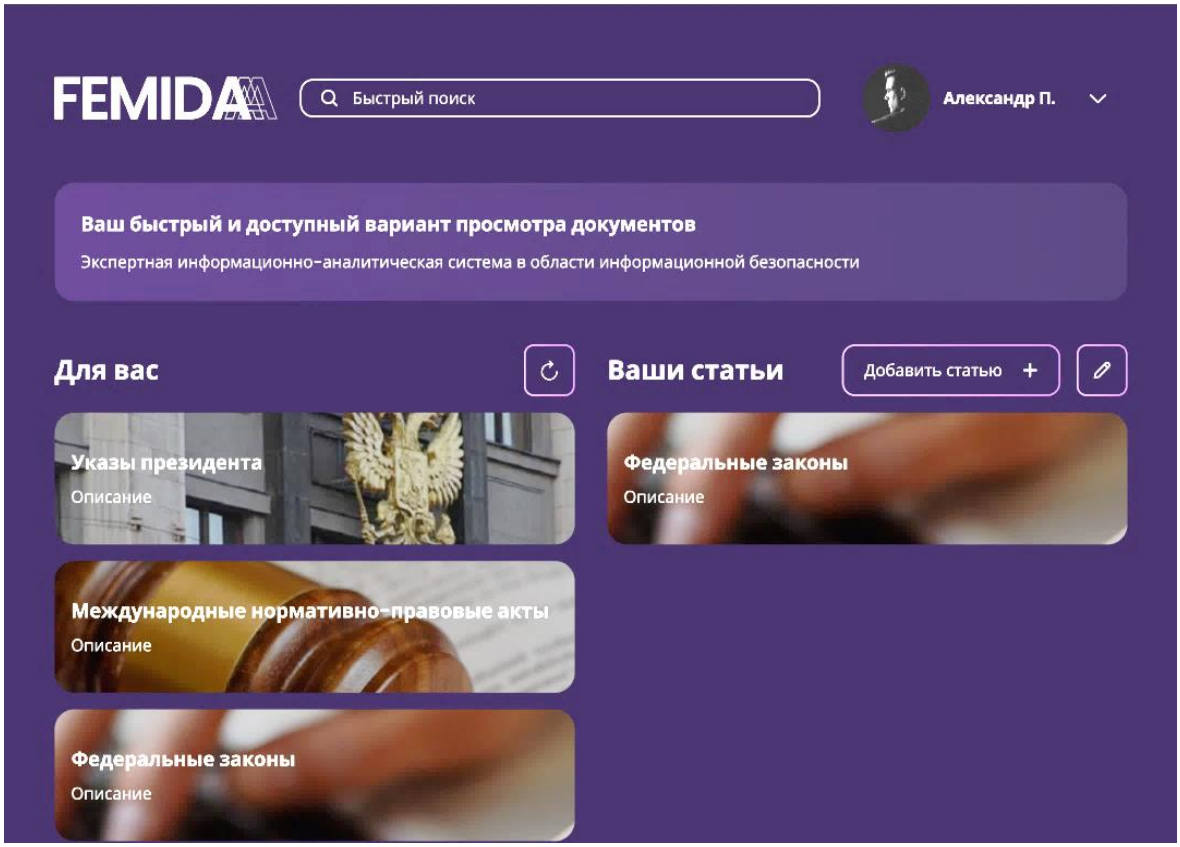


Рис. 4. *Главная страница ЭИАС «Фемида»*

Fig. 4. *Main page of the EIAS Themis*

Данная ЭИАС позволяет работать с нормативными документами в области ИБ на различных иерархических уровнях нормативно-правовых актов и региона правоприменения, а также значительно упрощает процессы работы с документами по ИБ для различных групп пользователей, не являющихся экспертами в данной предметной области.

Заключение

В научной работе предложен комплекс информационных моделей процессов предварительной обработки, анализа и классификации нормативных документов в области информационной безопасности, по сути представляющий собой цифровой прототип – результат системного описания предметной области документооборота в сфере ИБ. Созданное информационное и алгоритмическое обеспечение системного анализа электронного документооборота было использовано для создания структуры и рабочего прототипа в виде программного обеспечения группы процессов обработки, анализа, актуализации и систематизации – электронной автоматизированной информационной системы работы с документационным обеспечением ИБ.

Рассмотренные в статье подходы к описанию комплекса процессов работы с документами в области информационной безопасности являются инструментами организации высокоэффективного управления и контроля цепочки процессов в автоматизированной информационной системе на основе системного подхода и структурного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чеканов И. Р., Краснов А. Е.* Анализ семантических элементов базы данных экспертной системы для работы с законодательными и нормативными документами в области информационной безопасности // Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXX международной конференции, Москва, 14 декабря 2022 года. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2022. С. 221–225. DOI: 10.25728/ iccss.2022.68.92.031

2. *Кисиогло Т. В., Медведева О. С.* Разработка и повышение эффективности экспертных систем в организации // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 11-1(93). С. 185–190. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-11-1-185-190

3. *Набатов А. Н., Веденяпин И. Э.* К вопросу применения различных методологий проектирования информационных систем: онтологический подход к проектированию // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2022. Т. 26. № 3(97). С. 24–35. DOI: 10.54708/19926502_2022_2639724

4. *Mamakas D., Tsotsi P., Androutsopoulos I., Chalkidis I.* Processing long legal documents with pre-trained transformers: Modding LegalBERT and Longformer // NLLP 2022 – Natural Legal Language Processing Workshop 2022, Proceedings of the Workshop. 2022

5. *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

6. *Потемкин С. Б., Кедрова Г. Е.* Семантическое расстояние между предложениями на основе модифицированного расстояния Левенштейна // Когнитивные исследования на современном этапе: материалы Всероссийской конференции с международным участием по когнитивной науке, Архангельск, 19–22 ноября 2018 года. Архангельск: Северный, 2018. С. 246–249. EDN: VTGOMF

7. *Kadhim A.I.* An evaluation of preprocessing techniques for text classification // International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS). 2018. Т. 16. № 6. С. 22–32.

8. *Пашков Н. Н., Дрозд В. Г.* Анализ рисков информационной безопасности и оценка эффективности систем защиты информации на предприятии // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 1(105). С. 3. EDN: DWGGTA

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023667310 Российская Федерация. Фемида: № 2023665111 : заявл. 19.07.2023 : опубл. 14.08.2023 / И. Р. Чеканов. EDN: THQUVI.

10. *Кузнецов А. С., Краснов А. Е.* Информационное обеспечение импульсного управления устойчивостью систем информационной безопасности // Вестник РГГУ. Серия: Информатика. Информационная безопасность. Математика. 2024. № 2. С. 99–108. DOI: 10.28995/2686-679X-2024-2-99-108

11. *Краснов А. Е., Кузнецов А. С., Смирнов В. М.* Модель импульсного управления устойчивостью системы информационной безопасности // Вестник РГГУ. Серия: Информатика. Информационная безопасность. Математика. 2024. № 1. С. 80–90. DOI: 10.28995/2686-679X-2024-1-80-90

12. *Смирнов Н. Н., Кузнецов А. С.* Информационное обеспечение процессов обработки данных устройств интернета вещей в автоматизированной информационной системе экомониторинга // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 3. С. 92–102. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-3-92-102

REFERENCES

1. Chekanov I.R., Krasnov A.E. *Analiz semanticheskikh elementov bazy dannykh ekspertnoy sistemy dlya raboty s zakonodatel'nymi i normativnymi dokumentami v oblasti informatsionnoy bezopasnosti* [Analysis of semantic elements of the expert system database for working with legislative and regulatory documents in the field of information security]. *Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem: materialy XXX mezhdunarodnoy konferentsii* [Problems of Complex Systems Security Management: Proceedings of the XXX International Conference]. Moscow, December 14, 2022. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2022. Pp. 221–225. DOI: 10.25728/ iccss.2022.68.92.031. (In Russian)

2. Kisioglo T.V., Medvedeva O.S. Development and improvement of the efficiency of expert systems in an organization. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economy and Business: Theory and Practice]. 2022. No. 11-1(93). Pp. 185–190. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-11-1-185-190. (In Russian)

3. Nabatov A.N., Vedenyapin I.E. On the issue of applying various methodologies for designing information systems: an ontological approach to design. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University]. 2022. Vol. 26. No. 3(97). Pp. 24–35. DOI: 10.54708/19926502_2022_2639724. (In Russian)

4. Mamakas D., Tsotsi P., Androutsopoulos I., Chalkidis I. Processing long legal documents with pre-trained transformers: Modding LegalBERT and Longformer. *NLLP – Natural Legal Language Processing Workshop, Proceedings of the Workshop.* 2022

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

6. Potemkin S.B., Kedrova G.E. Semantic distance between sentences based on the modified Levenshtein distance. *Kognitivnyye issledovaniya na sovremennom etape: materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem po kognitivnoy nauke* [Cognitive research at the present stage: Proceedings of the All-Russian conference with international participation on cognitive science]. Arkhangelsk, November 19–22, 2018. Arkhangelsk: Severny, 2018. Pp. 246–249. EDN: VTGOMF. (In Russian)

7. Kadhim A.I. An evaluation of preprocessing techniques for text classification. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS).* 2018. Vol. 16. No. 6. Pp. 22–32.

8. Pashkov N.N., Drozd V.G. Analysis of information security risks and assessment of the effectiveness of information security systems at the enterprise. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation]. 2020. No. 1(105). P. 3. EDN: DWGGTA. (In Russian)

9. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2023667310 Rossiyskaya Federatsiya* [Certificate of state registration of a computer program No. 2023667310 Russian Federation]. Themis: No. 2023665111: declared. 19.07.2023: published. 14.08.2023 / I.R. Chekanov. EDN: THQUVI. (In Russian)

10. Kuznetsov A.S., Krasnov A.E. Information support for pulse control of the stability of information security systems. *Vestnik RGGU. Seriya: Informatika. Informatsionnaya bezopasnost'. Matematika* [Bulletin of the Russian State University for the Humanities. Series: Computer Science. Information Security. Mathematics]. 2024. No. 2. Pp. 99–108. DOI: 10.28995/2686-679X-2024-2-99-108. (In Russian)

11. Krasnov A.E., Kuznetsov A.S., Smirnov V.M. Model of impulse control of stability of information security system. *Vestnik RGGU. Seriya: Informatika. Informatsionnaya bezopasnost'. Matematika* [Bulletin of RSUH. Series: Computer Science. Information Security. Mathematics]. 2024. No. 1. Pp. 80–90. DOI: 10.28995/2686-679X-2024-1-80-90. (In Russian)

12. Smirnov N.N., Kuznetsov A.S. Information support for data processing processes of internet of things devices in the automated information system of ecomonitoring. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 3. Pp. 92–102. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-3-92-102. (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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00622, https://rscf.ru/project/23-29-00622/).

Funding. The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00622, https://rscf.ru/project/23-29-00622/).

Информация об авторах

Чеканов Иван Романович, аспирант факультета политических и социальных технологий, кафедра информационных технологий, искусственного интеллекта и общественно-социальных технологий цифрового общества, 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. тех. наук, 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

Information about the authors

Ivan R. Chekanov, Postgraduate Student of the Department of Political and Social Technologies, Department of Information Technologies, Artificial Intelligence and Social and Public Technologies of the Digital Society, Russian State Social University;

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

cartmen98@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3656-265X, SPIN-code: 6993-8756

Andrey S. Kuznetsov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies, Artificial Intelligence and Social Technologies of Digital Society, Russian State Social University;

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

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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 004.8 Обзорная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-158-164
EDN: GLZBAX

Применение многоагентных робототехнических систем в сельском хозяйстве

М. И. Анчёков[✉1], Ж. Х. Курашев[2], А. М. Лешкенов[2]

[1]Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а
[2]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Статья посвящена применению мультиагентных робототехнических систем в сельском хозяйстве. Рассматриваются различные примеры применения мультиагентных систем, такие как оптимизация маршрутов, механическая прополка, картографирование сорняков и уборка урожая. Также рассматривается вопрос об экономической целесообразности применения коллективов роботов, приводится сравнение с существующими на рынке системами.

Ключевые слова: искусственный интеллект, роботы, мультиагентные системы, точное земледелие

Поступила 10.11.2024, одобрена после рецензирования 05.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Анчёков М. И., Курашев Ж. Х., Лешкенов А. М. Применение многоагентных робототехнических систем в сельском хозяйстве // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 158–164. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-158-164

MSC: 93A16 Review article

Application of multi-agent robotic systems in agriculture

M.I. Anchekov[✉1], Zh.Kh. Kurashev[2], A.M. Leshckenov[2]

[1]Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street
[2]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article is devoted to the application of multi-agent robotic systems in agriculture. The article considers various examples of the application of multi-agent systems, such as route optimization, mechanical weeding, weed mapping and harvesting. It also considers the issue of the economic feasibility of using robot teams, provides a comparison with existing systems on the market.

Keywords: artificial intelligence, robots, multi-agent systems, precision agriculture

Submitted 10.11.2024, approved after reviewing 05.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Anchekov M.I., Kurashev Zh.Kh., Leshckenov A.M. Application of multi-agent robotic systems in agriculture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 158–164. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-158-164

© Анчёков М. И., Курашев Ж. Х., Лешкенов А. М., 2024

Введение

Успешный опыт внедрения робототехнических систем в сельское хозяйство постепенно уточняет требования к роботам. Если на этапе опытного внедрения потребители готовы были приобретать несколько единиц роботов, то в данный момент крупные сельхозпроизводители готовы к покупке нескольких десятков роботов. Такой рост интереса к сельхозробототехнике ставит новые задачи перед производителями и разработчиками. Так, применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для съемки полей и их обработки требует наличия высококвалифицированных специалистов. В зависимости от количества одновременно применяемых единиц роботов количество работников, которые обеспечивают эксплуатацию, может быть в соотношении 1 к 1 в худшем случае и 1 к 5 в лучшем. Опыт применения БАС в КБНЦ РАН показывает, что для съемки полей требуется два специалиста, для обработки полей одним роботом – два специалиста, если используется два дрона, то количество специалистов возрастает до трех. Такое соотношение накладывает дополнительные расходы и замедляет темпы внедрения робототехнических систем. Актуальность темы обуславливается ростом спроса на продукты сельхозпроизводства, который не может быть удовлетворен простым увеличением площадей полей и увеличением мощности сельскохозяйственной техники, которая уже достигла массогабаритных пределов, превышение которых приводит к деградации и переуплотнению почвы. На наш взгляд, одним из решений, которое может привести к изменению сложившейся ситуации, является переход к мультиагентной робототехнике [1, 2].

Целью исследования является изучение возможностей применения мультиагентных робототехнических систем для решения ключевых задач в сельском хозяйстве.

Мультиагентные (многоагентные) робототехнические системы появились как закономерный этап развития мультиагентных систем, в которых части систем взаимодействуют для решения общей задачи [3, 4]. В случаях, когда элементы системы похожи друг на друга, такие системы называют гомогенными мультиагентными системами, если элементы отличаются – гетерогенными.

В [5] рассматривается гетерогенная мультиагентная робототехническая система, состоящая из двух видов роботов: беспилотного летательного аппарата и наземного робота на гусеничном ходу. Основной задачей, которую решают данные роботы, является движение строем, определяемым оператором. Каждый наземный робот оснащен камерой, которая позволяет ориентироваться в пространстве и следить за направлением движения лидирующего робота. Чтобы роботы имели возможность различать друг друга, они оснащаются маркерами-идентификаторами. Система управления наземным роботом основывается на ПИД-регуляторе. БПЛА используется для координации группы наземных роботов и их ориентации и навигации в посевах. В одном из экспериментов авторы показывают, что предложенная ими конфигурация робототехнической системы позволяет наземным роботам достаточно уверенно двигаться каскадом, в котором один робот является ведущим, а два других – ведомые. Предложенный авторами подход является достаточно перспективным, так как роботы делятся на подгруппы не только по конструктивными особенностям, но и иерархически, что позволяет применять предложенный подход и за пределами точного земледелия.

Одной из важнейших задач в точном земледелии является задача оптимизации маршрутов передвижения роботов по полю. В [6] авторы рассматривают и сравнивают четыре алгоритма поиска пути: метод k-ближайших соседей [7], алгоритм Кристофидеса [8], муравьиный алгоритм [9] и алгоритм Беллмана–Хелда–Карпа [10]. Для проведения вычислительных экспериментов авторы разработали три наиболее типичные двумерные модели поля. Первая модель представляет собой сад, в котором деревья высажены квадратно-гнездовым способом. Вторая модель – поле, на котором выращивают овощи, и третья – сад, но

с наличием препятствий. Суть эксперимента заключалось в том, что роботы должны достигнуть оптимальным путем все необходимые точки интереса (points of interest, POI) и вернуться в исходную точку. Алгоритмы сравнивались по нескольким критериям, наиболее важные из которых – дистанция пройденного пути и время работы. Авторы отмечают, что выбор конкретного алгоритма необходимо осуществлять в зависимости от топологии поля и количества агентов. Так, на симметричных полях без препятствий алгоритм Кристофидеса превосходит муравьиный алгоритм, однако если участок несимметричный, муравьиный алгоритм показывает лучшие результаты.

В [11] рассматривают задачу механической прополки. В работе авторы обращают внимание, что применение беспилотных летательных аппаратов не повышает эффективность прополки, так как культурные растения препятствуют обнаружению сорной растительности. Кроме того, предлагаемый подход учитывает частичную наблюдаемость среды и ее структурированность за счет рядной посадки и использования модели роста сорняков. Для проведения компьютерного моделирования была разработана среда Weed World. Модель учитывает, что урожай распределен равномерно в рядах. Роботы могут передвигаться по рядам и обмениваться информацией. Сорняки генерируются случайным образом на основе модели клеточных автоматов или распределения Бернулли. Эксперимент проводился на участке площадью 0,4 га, разбитом на квадраты площадью 0,8 м^2. В зависимости от условий эксперимента радиус обмена информацией между роботами мог быть равен нулю, ограничиваться только соседними ячейками или охватывать всех роботов. Также варьировались начальная плотность всходов сорняков и количество дней до начала прополки. Для координации своих действий роботы собирали информацию об окружающей среде и обменивались ею через общую модель среды. В работе авторы приходят к выводу, что возможность обмена информацией между роботами положительно сказывается на общей производительности.

Для эффективной борьбы с сорняками необходимо своевременно получать информацию об их локализации. В [12] представлена система SAGA, которая в автоматическом режиме будет заниматься картированием сорняков. Предлагаемое решение полностью децентрализовано и основывается на применении роя малых беспилотных летательных аппаратов. Каждый БПЛА оснащен камерой, снимки с которой привязываются к реальным координатам. Для сегментации изображений используются сверточные нейронные сети. Алгоритм передвижения БПЛА основывается на алгоритме пчелиной колонии. Результаты экспериментов показали, что предложенная стратегия эффективна, проявляет робастность и хорошо масштабируется.

Сбор урожая относится к одной из самых трудозатратных операций. В [13] рассматривается подвижная платформа с манипулятором. Постановщиком задач для агентов является так называемый распределитель, который, зная состояние роботов и среды, производит динамическую диспетчеризацию роботов. Для тестирования разработанного алгоритма была создана двумерная модель процесса уборки урожая. Проведенные эксперименты показали, что с ростом количества роботов-сборщиков уменьшается среднее время, проведенное в пути каждым отдельным роботом, но увеличивается время вычисления.

В [14] представлена концепция умного сада на основе гетерогенного коллектива роботов. В исследовании рассматривается задача логистики автономных роботов. Стоит отметить, что авторами затронута тема частичного замещения человеческого труда. Таким образом, в решении сельскохозяйственных задач участвуют гетерогенные агенты в самом широком смысле этого слова: часть сборщиков остается выполнять свои функции, робот-

сборщик и транспортный робот обеспечивают роботизированную уборку, беспилотный летательный аппарат помогает координировать пространственное расположение роботов. Кроме этого, контроль над роботами осуществляет человек, который в сложных ситуациях может не только взять на себя часть управления, но и переформулировать задачи через пульт управления. Предложенная авторами формализованная модель управления группой гетерогенных роботов может служить основой при решении задач планирования операций и увеличения эффективности производства сельхозпродукции.

На данный момент остается открытым вопрос об экономической целесообразности применения коллективов роботов. Инновационные разработки, которые на данный момент внедряются в сельское хозяйство, должны конкурировать с таким гигантами, как John Deere, New Holland, JCB, Claas, которые уже достаточно давно находятся на рынке и зарекомендовали себя с хорошей стороны. В [15] проводят сравнение двух подходов к глубокой вспашке: в первом используется классический трактор John Deere 8730R, а во втором группа из десяти роботов, общая мощность которых сопоставима с трактором. Технические характеристики плугов подобраны так, чтобы они были идентичными. Комплексное сравнение двух подходов показало, что стоимость приобретения группы роботов в 3,5 раза ниже, чем большого трактора, а стоимость эксплуатации в 2 раза ниже. При этом производительность остается сопоставимой.

Применение нескольких роботов для реализации одной технологической операции приводит к необходимости декомпозиции задачи. В [16] на примере задачи прополки показано, что эффективность обработки значительно зависит от того, каким образом распределены задачи между исполнителями. Авторы предложили алгоритм CDABC (collaborative following bee strategy), который является разновидностью алгоритма пчелиной колонии. Слабым местом алгоритмов, ищущих экстремум в частично наблюдаемом пространстве состояний, является то, что решение может сходиться в локальном экстремуме. В таких экстремумах описываются квазиоптимальные решения, которые в большинстве случаев не подходят. Для выхода из данной ситуации существует несколько стратегий: повторный запуск процедуры решения или решение задачи несколькими исполнителями; запрет «близких» решений; «шокирование» популяции, когда часть найденных решений случайным образом меняется; сохранение части решений в глобальном пространстве. В работе авторы предлагают стратегию *collaborative following bees*, которая работает следующим образом. На начальном этапе пчела находит несколько решений в своей окрестности. Два лучших помечаются. В случае, если все найденные решения будут хуже, чем помеченные, выбирается лучшее решение из помеченных. Если находится лучшее решение, то они помечаются, и цикл повторяется. Был проведен сравнительный анализ использования предложенного подхода семью биоинспирированными алгоритмами (Simulated Annealing, Quantum Artificial Bee Colony, Ant Colony System, Improved Artificial Bee Colony, Discrete Artificial Bee Colony, Multi-picking-robot Discrete Artificial Bee Colony (MDABC) и Teaching-Learning-Based Optimizer). Полученные результаты убедительно демонстрируют, что предложенный авторами подход позволяет более эффективно в сравнении с существующими подходами распределять задачи между несколькими сельскохозяйственными роботами.

Выводы

Проведенный обзор работ показал, что на данный момент имеются разработки, которые достаточно эффективно решают задачи производства сельхозпродукции на основе мультиагентных роботов. Мультиагентный подход демонстрирует преимущество перед одиночными роботами за счет перераспределения задач, возможности обмена сообщениями и

координации действий. Это позволяет повысить качество, скорость и экономическую эффективность производства. На наш взгляд, дальнейшее развитие мультиагентной сельскохозяйственной робототехники в большей степени будет связано с развитием систем искусственного интеллекта и человеко-машинного взаимодействия. Применение искусственного интеллекта позволит повысить адаптивность и автономность мультиагентных систем, а интеграция человека в контур управления позволит использовать его опыт и знания для более эффективного решения сельскохозяйственных задач.

В целом мультиагентный подход к применению робототехнических систем в сельском хозяйстве демонстрирует значительный потенциал для повышения эффективности и производительности сельскохозяйственного производства. Дальнейшее развитие этого направления может привести к качественным изменениям в организации сельскохозяйственных работ, повышению конкурентоспособности производимой продукции и своевременному ответу на глобальные вызовы, стоящие перед сельским хозяйством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ota J. Multi-agent robot systems as distributed autonomous systems. *Advanced Engineering Informatics*. 2006. Vol. 20. No. 1. Pp. 59–70. DOI: 10.1016/j.aei.2005.06.002

2. Ju C., Kim J., Seol J., Son H.Il. A review on multirobot systems in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 202. P. 107336. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107336

3. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. М.: И. Д. Вильямс, 2016. 1408 с.

Russell S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod* [Artificial Intelligence: A Modern Approach]. Moscow: I.D. Vil'yams, 2016. 1408 p. (In Russian)

4. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 213 с.

Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intellectics, or Thinking in Living and Artificial Systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 213 p. (In Russian)

5. Chevalier A., Copot C., Keyser R.D., Hernandez A. A multi agent system for precision agriculture. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015. Pp. 361–386. DOI: 10.1007/978-3-319-26327-4_15

6. Botteghi N. et al. Multi-agent path planning of robotic swarms in agricultural fields. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2020. Vol. 1. 2020. Pp. 361–368.

7. Laporte G. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*. 1992. Vol. 59. No. 2. Pp. 231–247. DOI: 10.1016/0377-2217(92)90138-Y

8. Christofides N. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. *Operations Research Forum*. 2022. Vol. 3(1). Pp. 1–4. DOI: 10.1007/s43069-021-00101-z

9. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part B (Cybernetics). 1996. Vol. 26. No. 1. Pp. 29–41. DOI: 10.1109/3477.484436

10. Held M., Karp R.M. A dynamic programming approach to sequencing problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1962. Vol. 10. No. 1. Pp. 196–210. DOI: 10.1137/011001

11. McAllister W., Osipychev D., Davis A., Chowdhary G. Agbots: Weeding a field with a team of autonomous robots. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2019. Vol. 163. P. 104827. DOI: 10.1016/j.compag.2019.05.036

12. Albani D., Haken R., Ijsselmuiden J., Trianni V. Monitoring and mapping with robot swarms for agricultural applications. *XIV IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance* (AVSS). 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078478

13. *Припотнев М. С.,* Диане С. А.К., Акуловский Д. В. Модели и алгоритмы управления группой мобильных роботов в задаче уборки урожая // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2023. Т. 10. № 4. С. 32–37. DOI: 10.24892/RIJIE/20230407

Pripotnev M.S., Diane S.A.K., Akulovsky D.V. Models and algorithms for controlling a group of mobile robots in the problem of harvesting. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: a network electronic scientific journal]. 2023. Vol. 10. No. 4. Pp. 32–37. DOI: 10.24892/RIJIE/20230407. (In Russian)

14. *Мещеряков Р. В., Широков А. С.* Постановка задачи гетерогенного группового взаимодействия роботов при решении задач умного сада // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. 2024. № 2. С. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204

Meshcheryakov R.V., Shirokov A.S. Statement of the problem of heterogeneous group interaction of robots in solving smart garden problems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2024. No. 2. Pp. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204. (In Russian)

15. Albiero D., Garcia A.P., Umezu C.K., Leme de Paulo R. Swarm robots in mechanized agricultural operations: A review about challenges for research. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 193. P. 106608. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106608

16. Guo H., Miao Zh., Ji J.C., Pan Q. An effective collaboration evolutionary algorithm for multi-robot task allocation and scheduling in a smart farm. *Knowledge-Based Systems.* 2024. Vol. 289. P. 111474. DOI: 10.1016/j.knosys.2024.111474

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Анчёков Мурат Инусович, науч. сотр., отдел «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X, SPIN-код: 3299-0927

Курашев Жираслан Хаутиевич, зав. лабораторией «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-6122, SPIN-код: 8549-2620

Лешкенов Аслан Мухамедович, зав. лабораторией «Сельскохозяйственная робототехника», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;
aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9516-3213, SPIN-код: 7494-4370

Information about the authors

Murat I. Anchekov, Researcher of the Department of Multiagent Systems of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X, SPIN-code: 3299-0927
Zhiraslan Kh. Kurashev, Head of the Laboratory of Molecular Breeding and Biotechnology, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-6122, SPIN-code: 8549-2620
Aslan M. Leshckenov, Head of the Laboratory of Agricultural robotics of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;
aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9516-3213, SPIN-code: 7494-4370

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 519.71 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-165-174
EDN: HYEZQR

Анализ целесообразного поведения различных типов автоматов

Д. П. Димитриченко

Институт прикладной математики и автоматизации –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А

Аннотация. Коллективное поведение автоматов является одним из направлений развития методов машинного обучения. Такие автоматы реализуют функцию целенаправленного поведения. Автомат выполняет действие, в ответ на которое окружающая среда подает свой выходной сигнал на вход автомата. Автомат, в соответствии со своей конструкцией, реагирует на этот входной сигнал очередным действием. Таким образом, выстраивается замкнутый контур взаимодействия между некоторой окружающей средой и функционирующим в ней автоматом. Сама эта среда во многих случаях допускает автоматную реализацию. Оценка эффективности автомата определяется как оптимизационная задача максимизации суммы положительных сигналов (поощрений) или минимизации отрицательных сигналов (штрафов), получаемых от окружающей среды за рассматриваемый промежуток времени. Формализация как свойств окружающей среды, так и действий автоматов, а также обработка полученных результатов производятся при помощи аппарата теории игр. В этом случае сигналы от окружающей среды удобно представить, как суммы выигрышей и проигрышей игроков-автоматов. В настоящей работе проведено сравнение автоматов различных конструкций, так как эффективность реакций автоматов определяется не только свойствами окружающей среды, но и такими параметрами, как тип и глубина памяти.

Ключевые слова: автомат, целесообразное поведение, оптимальная стратегия, глубина памяти, теория игр, формализация окружающей среды, динамическая среда

Поступила 11.10.2024, одобрена после рецензирования 14.11.2024, принята к публикации 02.12.2024

Для цитирования. Димитриченко Д. П. Анализ целесообразного поведения различных типов автоматов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 165–174. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-165-174

MSC: 68P01 Original article

Analysis of expedient behavior of various types of automata

D.P. Dimitrichenko

Institute of Applied Mathematics and Automation –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street

Abstract. Collective behavior of automata is one of the directions of development of machine learning methods. Such machines fulfil the function of goal-oriented behavior. The machine performs an action, in response to which the environment sends its output signal to the input of the machine. The machine, in accordance with its design, responds to this input signal with the next action. Thus, a closed loop of interaction is built between a certain environment and the machine operating in it. This environment

© Димитриченко Д. П., 2024

itself in many cases allows for machine implementation. Effectiveness evaluation of the machine is defined as an optimization problem of maximizing the sum of positive signals (rewards), or minimizing negative signals (penalties), received from the environment, over the considered period of time. Formalization of both the properties of the environment and the actions of the machines, as well as processing of the obtained results is performed using the apparatus of game theory. In this case, signals from the environment are conveniently represented as the sums of the winnings and losses of the players-machines. In this paper, a comparison of machines of different designs is carried out, since the efficiency of machine reactions is determined not only by the properties of the environment, but also by such parameters as the type and depth of memory.

Keywords: automaton, expedient behavior, optimal strategy, memory depth, game theory, formalization of the environment, dynamic environment

Submitted 11.10.2024, approved after reviewing 14.11.2024, accepted for publication 02.12.2024

For citation. Dimitrichenko D.P. Analysis of expedient behavior of various types of automata. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 165–174. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-165-174

Введение

Организация сложного поведения децентрализованных систем, построенных на базе простых элементов, находит свое отражение в таком разделе машинного обучения, как «Коллективное поведение автоматов» [1]. При этом связь между нейросетевым и автоматным подходами бывает очень тесной [2].

Анализ поведения автоматов будет проводиться при помощи аппарата теории игр. Такой выбор определяется тем, что теория игр позволяет легко создавать формализуемые системы правил и стратегий поведения, определяющие характер взаимодействия отдельного автомата (или совокупности автоматов) и окружающей среды [3].

Это обстоятельство позволяет сформировать замкнутый контур Среда-Автомат, в котором действия автомата определяют реакцию окружающей среды, которая в свою очередь через обратную связь оказывает влияние на выбор последующего действия автомата.

Первые интересные модели такого типа были созданы М. Л. Цетлиным (1924–1966) [4]. Он выступил создателем целого направления исследований, получившего название «коллективное поведение автоматов» [5–7]. Им были сформулированы основные принципы, лежащие в основе подобных моделей, и способы их реализации.

Формализация понятия целенаправленного поведения позволила М. Л. Цетлину сформулировать базовый принцип организации сложного поведения совокупности децентрализованных систем, образующих коллективы автоматов.

Основные положения этого подхода состоят в следующем:

1) принцип суперпозиции;
2) принцип соизмеримости;
3) принцип универсальности структуры автомата.

Принцип суперпозиции. Любое достаточно сложное поведение слагается из совокупности простых поведенческих актов. Совместная реализация таких простых поведенческих актов и простейшее взаимодействие приводят в результате к весьма сложным поведенческим процессам.

Принцип соизмеримости. Степень целесообразного поведения анализируемой кибернетической системы рассматривается как величина математического ожидания совокупности штрафов и поощрений, полученных этой системой от окружающей среды за наблюдаемый промежуток времени t. Эта величина находится в интервале со следующими границами:

Левая граница – это значение математического ожидания количества штрафов и поощрений, полученных системой, реализующей стратегию случайного выбора доступных в данной среде действий из множества $D=d_1,..., d_m, m \geq 2$.

Правая граница – это величина математического ожидания штрафов и поощрений, полученных системой, которая в любой момент времени t, t>>1 всегда реализует заведомо оптимальное в данной среде действие $d_i = d^*, i=1, ..., m$.

Очевидно, что чем ближе величина математического ожидания поощрений анализируемой системы к левой границе определенного таким образом интервала, тем точнее ее поведение соответствует стратегии «случайного выбора». А чем ближе эта величина к правой границе интервала, тем ближе характер поведения такой системы соответствует наилучшей возможной стратегии. Такое определение целесообразного поведения не зависит от структуры анализируемой системы, а опирается только на результат взаимодействия со средой.

Принцип универсальности. Конструкция анализируемой системы не должна содержать эмпирических данных об оптимальных (или неоптимальных) действиях в данной среде, т. е. такие действия система выявляет в процессе своего функционирования в течение некоторого заданного времени *t*. Первая автоматная реализация таких систем была предложена М. Л. Цетлиным.

Автоматная реализация

Приведем формальное описание автомата:

$X = x_1, ..., x_k$ – множество входных сигналов, поступающих от окружающей среды на вход автомата (входной алфавит).

$D = d_1, ..., d_m$ – конечное множество доступных автомату действий (выходной алфавит).

$S = s_1,...,s_n, \ 2 <= m <= n$ – конечное множество внутренних состояний автомата (внутренний алфавит).

Правила функционирования автомата в дискретные моменты времени t однозначным образом задаются двумя функциями:

функцией переходов внутренних состояний $s_{t+1} = F(s_t, x_t)$ и начальным внутренним состоянием в нулевой момент времени $t = t_0$: $s_0 = S(t_0)$;

функцией зависимости выходных сигналов (действий) от внутренних состояний $dt = G(s_t)$.

Общая постановка задачи

Пусть задана некоторая среда *E*, в которой будут функционировать типы исследуемых автоматов.

Пусть также имеются типы автоматов, для которых возможно установить степень целесообразного поведения в среде *E* определенным выше образом.

Требуется:

– определить степень влияния глубины памяти *q* каждого из рассматриваемых типов автоматов на изменение степени целесообразности поведения в указанной среде *E*;

– на основе полученных результатов определить тип конструкции автомата, достигающей заданного уровня целесообразности с минимально возможной глубиной памяти $q = q^*$;

– в случае наличия нескольких эквивалентных конструкций указать наиболее простую в реализации конструкцию.

Биологические предпосылки

Результаты из экспериментальной биологии потребовали сформулировать кибернетический «белый ящик», обладающий целесообразным поведением.

Подопытное животное помещалось в основание Т-образного лабиринта с возможностью выбора одного из двух действий:

«Повернуть влево»;

«Повернуть вправо».

По условиям эксперимента в конце каждого из двух ответвлений реализовывались неизвестные подопытному животному благоприятные (или неблагоприятные) условия с независимыми вероятностями для каждого из ответвлений.

Требовалось установить способность подопытных животных различать условия окружающей среды, носящие вероятностный характер.

Оказалось, что несмотря на ошибки выбора в начале серии экспериментов животные впоследствии верно ассоциировали выбираемый ими поворот (выполняемое действие) с тем, для которого вероятность штрафа (вероятность попасть в неблагоприятную ситуацию) была минимальной.

Стационарная окружающая среда

Стационарная окружающая среда E является математическим описанием условий Т-образного лабиринта.

В Т-образном лабиринте было всего два доступных для выполнения действия: «повернуть влево» и «повернуть вправо». В каждом из выбранных ответвлений ожидалась своя вероятность поощрения Pl и Pr.

Обобщением этой ситуации является стационарная среда с m исходами (действиями).

Для каждого из m действий задается совокупность значений вероятностей: либо поощрения p_i, либо штрафа $1 - p_i$, $i=1, \ldots, m$.

Выбор оптимального действия в такой среде сводится к определению действия с максимальной вероятностью поощрения (минимальной вероятностью штрафа).

При этом ни подопытное животное в биологических экспериментах, ни соответствующий ему по поведению автомат не располагают знаниями об исходных значениях вероятностей, но вынуждены эту информацию получать в опосредованной форме через сигналы поощрения и штрафа.

Типы конструкций автоматов

Первой конструкцией автомата, способного вести себя целесообразно в описанной выше стационарной среде E, является автомат с линейной тактикой, предложенный М. Л. Цетлиным.

Автомат L1 (с глубиной памяти q=1) состоит из m состояний $S=s_1,.., s_m$.

За каждым из m состояний s_i закреплено действие d_i, $i=1, \ldots, m$.

Автомат L1 функционирует следующим образом:

В некоторый момент времени $t=t^*$, находясь в состоянии s_i, автомат L1 выполняет выходное действие d_i, $i=1, \ldots, m$.

В ответ на это действие окружающая среда и формирует сигнал, принимающий значение «поощрение» в соответствии с вероятностью p_i и «штраф» с вероятностью $1 - p_i$.

Этот сигнал подается на вход автомата l1.

Если автомат L1 на входе получает сигнал «штраф», то он переходит в состояние s_{i+1} и, следовательно, переключает внешнее действие с d_i на d_{i+1}.

При получении сигнала «поощрение» автомат L1 остается в исходном состоянии s_i, при этом смена действия не происходит.

Таким образом, в следующий момент времени t^*+1 автомат L1 выполнит действие в соответствии со своим внутренним состоянием, и процесс взаимодействия автомата со средой повторится описанным выше образом.

Закрепляя за каждым из m действий di q последовательных состояний, мы получим последовательность линейных автоматов с монотонно возрастающей глубиной памяти q.

М. Л. Цетлину удалось показать, что последовательность таких автоматов *L1, L2, …, Lq*, функционирующих в стационарной среде *E,* является асимптотически оптимальной, т.е. чем больше глубина памяти линейного автомата Lq, тем дольше такой автомат выполняет самое оптимальное действие (с максимальной вероятностью поощрения) и почти никогда не покидает связанные с ним состояния.

Усложнением автомата с линейной тактикой является автомат Кринского.

Он характеризуется тем, что при получении поощрения этот автомат всегда переходит в самое глубокое состояние, соответствующее текущему (выполненному им) действию.

При получении штрафа от окружающей среды этот автомат реагирует точно так же, как и автомат с линейной тактикой, понижая на единицу номер состояния текущего (выполненного) действия.

Для этого автомата также доказана теорема об асимптотической оптимальности при функционировании в стационарных средах *E*.

Следующим по степени усиления свойства инерционности является автомат Роббинса.

Он отличается от автомата Кринского тем, что в отличие от него при смене действия автомат Роббинса сразу переходит в самое глубокое состояние, соответствующее новому действию.

В остальном он ничем не отличается от автомата Кринского.

Для него также верна теорема об асимптотической оптимальности в стационарных средах.

Заметим, что у трех автоматов – автомата с линейной тактикой, автомата Кринского и автомата Роббинса – при глубине памяти $q = 1$ алгоритмы функционирования полностью совпадают, утрачивая отличия между ними.

Несколько другой подход к усилению инерционности применен в конструкции автомата Крылова.

Он сочетает в себе элементы поведения как детерминированного, так и стохастического автомата.

При получении поощрения автомат функционирует точно так же, как и автомат с линейной тактикой, увеличивая вплоть до самого глубокого номер состояния, соответствующего действию, за выполнение которого этот автомат получил поощрение от среды *E*.

При получении штрафа автомат Крылова «подбрасывает монетку».

При выпадении «орла» автомат не меняет своего состояния, а при выпадении «решки» уменьшает номер состояния за действие, за которое от среды получен штраф.

Этот автомат также является асимптотически оптимальным в условиях стационарных сред.

Динамические среды

Первоначально формальным языком описания как стационарных, так и динамических сред с функционирующими в них автоматами послужила теория игр.

Действия автомата из множества *D* взаимно однозначно соотносятся со стратегиями, доступными игроку в соответствующей (заданной) игре с конечным числом стратегий.

Например, действия автомата в уже рассмотренной выше стационарной среде *E* на языке теории игр формулируется как игра с природой:

1) задана одностолбцовая платежная матрица с *m* неотрицательными значениями;

2) элементы матрицы игры нормируются относительно максимального значения платежа и рассматриваются как вероятности поощрений от стационарной среды *E*;

3) значение поощрения равно единице, значение штрафа равно нулю;

4) действиям автомата (игрок 1) соответствуют номера строк заданной матрицы;

5) природа (игрок 2) выбрала свою стратегию (столбец) и не меняет ее в течение всех партий игры;

6) целью игры является максимизация выигрыша автомата.

Игрок 1 (автомат) в каждый момент времени t разыгрывает партию игры с природой и в зависимости от выбранного действия $d^*=d_i$ и соответствующей этому действию вероятности $p^*=p_i$ получает сигнал поощрения (или штрафа) от окружающей среды I, $i=1, \ldots, m$.

Поскольку оптимальная стратегия игры с природой известна и соответствует выбору игроком действия с максимальной ценой $p_i=p_{max}$, то создается возможность сравнить эффективность действия осведомленного игрока, которому известна вся платежная матрица, с действиями автомата, которому не известно содержимое этой матрицы.

Из теорем об асимптотической оптимальности рассмотренных выше типов автоматов следует, что чем больше глубина памяти q автомата, тем точнее его совокупные действия соответствуют оптимальной стратегии.

Игры двух автоматов

Случай матричной игры двух игроков с нулевой суммой – это пример того, как один автомат способен создать среду для другого автомата.

В этом случае действиям первого автомата сопоставляются номера строк, а действиям второго автомата – номера столбцов платежной матрицы.

Если первый автомат с вероятностью p получает поощрение, то второй автомат получает штраф, и наоборот, реализуя принцип антагонистической игры с нулевой суммой.

Задача первого автомата состоит в максимизации поощрений, задача второго автомата – в минимизации штрафов.

Если игра допускает решение в чистых стратегиях, то автоматы реализуют друг для друга стационарную среду, для которой повышение целесообразности связано с ростом глубины памяти q.

Решение в смешанных стратегиях требует от автоматов оптимальной глубины памяти, удовлетворяющей свойствам данной динамической среды и типа автомата.

Аналогичным образом строится игра двух автоматов в случае бескоалиционных, неантагонистических, биматричных игр с конечным числом стратегий.

Игра в размещения

Примером того, как коллектив автоматов формирует динамическую среду для отдельного автомата, является игра в размещения.

Биологической предпосылкой для игры в размещения служит следующая задача:

1) имеется конечное число участков с различной степенью производительности пищи. На этих участках некоторым образом размещаются животные;

2) если два и более животных в текущий момент времени оказываются на одном участке, то производительность пищи участка делится поровну между этими животными.

Задача животного состоит в максимизации количества добываемой им пищи.

Описание игры в размещения легко формулируется на языке теории игр следующим образом:

1) пусть задано m стратегий $d = d_1, \ldots, d_m$. Значение каждой стратегии равно математическому ожиданию события «поощрение / штраф» в случае ее выбора;

2) в рамках заданных стратегий функционируют n автоматов: $n < m$. Выигрыш от стратегии d_i, $i=1, \ldots, m$, в любой момент времени t поровну делится между всеми выбравшими эту стратегию автоматами;

3) требуется найти условия, обеспечивающие максимальный выигрыш для всей совокупности автоматов.

Эти условия делятся на три основные группы:

– типы исследуемых автоматов, определяющие структуру и особенности их поведения;

– значение глубины памяти q, определяющее степень инерционности автомата (скорость переключения между действиями);

– структурные изменения автоматов, направленные на организацию различных способов взаимодействия в коллективе.

Мы будем анализировать рассмотренные выше типы автоматов: автомат с линейной тактикой, автомат Кринского, автомат Роббинса и автомат Крылова.

Мы также проанализируем влияние глубины памяти q на степень инерционности автоматов, т.е. на скорость переключения автоматов между действиями в среде E.

Взаимодействие автоматов варьируется от полной изолированности автоматов друг от друга до введения внешней по отношению к структуре автоматов процедуры общей кассы.

Оценка скорости переключения

Скорость переключения действий автомата определяет минимальное время, за которое автомат способен использовать все доступные стратегии.

Требуется определить необходимый интервал времени функционирования автомата для сбора достоверной статистики.

Утверждение 1. Средняя скорость переключения между действиями одного из изолированных автоматов в игре в размещения не ниже значения этой скорости автомата, функционирующего в соответствующей стационарной среде.

Действительно, если у автомата при выборе текущего действия $d^* = d_i$, $i = 1, \ldots, m$ в текущей партии отсутствуют соседи, то его новое состояние будет обусловлено только значением отклика окружающей среды на выбор данного действия в соответствии с вероятностью получения поощрения $p^* = p_i$. В этом случае его скорость смены действий будет совпадать со скоростью автомата в соответствующей стационарной среде E.

Если при выборе данной стратегии $d^* = d_i$ у рассматриваемого автомата имеются соседи (один или более одного) на i-й площадке, то текущая ситуация распадается на два случая.

Если сигнал поощрения среды достался рассматриваемому автомату, то в текущей партии факт наличия соседей не влияет на его скорость переключения между действиями.

Если, наоборот, при получении от среды сигнала поощрения в рамках дележа пищи рассматриваемому автомату достается штраф, то такой сигнал может лишь уменьшить (по крайней мере не увеличить) время его пребывания на текущей площадке.

Таким образом, средняя скорость переключения между действиями изолированного автомата в игре в размещения не меньше, чем скорость переключения автомата в соответствующей стационарной среде E.

Теперь рассмотрим фактор влияния процедуры общей кассы.

Утверждение 2. Средняя скорость переключения n автоматов в наилучшем размещении не ниже скорости переключения между действиями одним автоматом, выполняющим наилучшее действие в соответствующей стационарной среде E.

Действительно, наличие процедуры общей кассы приводит к тому, что вся совокупность полученных от окружающей среды поощрений в любой партии делится в равных долях между всеми n автоматами.

Технически это может быть реализовано, например, путем последовательной раздачи n автоматам всех поощрений, получаемых от среды за полное время игры, в порядке циклической очереди.

Очевидно, что для коллектива из n автоматов наилучшим является такое размещение, при котором все автоматы по одному занимают n наилучших площадок из m возможных, $n < m$. При таком размещении, благодаря процедуре общей кассы, каждый из n автоматов получает поощрение с вероятностью, равной среднеарифметическому суммы вероятностей n наилучших площадок.

Эта величина меньше (не больше) вероятности поощрения, получаемого одним автоматом, расположенным на наилучшей площадке.

Следовательно, среднее время пребывания коллектива автоматов в наилучшем для себя размещении не меньше времени пребывания одного автомата на наилучшей площадке.

А суммарное время последовательного пребывания одного автомата на всех площадках тем более не превосходит времени пребывания коллектива автоматов в более худших размещениях, где средняя скорость переключения между действиями еще выше.

Поочередно вычеркивая из списка наилучшую площадку, мы можем провести данное доказательство для всех m площадок.

Проведение вычислительного эксперимента

Для проведения игры в размещения задано 10 площадок. В качестве доступных для автоматов действий.

Величина поощрения равна (+1), величина штрафа (–1).

Эти величины определяют следующие значения вероятностей получения поощрений:

Таблица 1. Платежная матрица

Table 1. Payoff matrix

Цена	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Поощрения	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95

Для каждого типа автомата была проведена серия из 10 независимых экспериментов, после чего полученные данные усреднялись.

Для каждой серии экспериментов генератор случайных чисел запускался с фиксированного начального значения, порождая для всех типов автоматов идентичную псевдослучайную стационарную среду E.

Обозначим типы автоматов следующим образом:

автомат с линейной тактикой – АЛТ;

автомат Кринского – АКРН;

автомат Роббинса – АРББ;

автомат Крылова – АКРЛ.

Таблица 2. Математические ожидания поощрений и штрафов

Table 2. Mathematical expectations of rewards and penalties

Автомат	Память 1	Память 2	Память 3	Память 4	Память 5	Память 6	Память 7	Память 8
АЛТ	0,63679	0,76809	0,80862	0,87499	0,88372	0,88475	0,79856	0,88803
АКРН	0,63679	0,76809	0,80474	0,87788	0,87707	0,88170	0,88255	0,87800
АРББ	0,63679	0,75081	0,80495	0,87277	0,87602	0,89240	0,89255	0,89688
АКРЛ	0,630618	0,760276	0,848816	0,884885	0,886225	0,89742	0,89549	–

Мы видим, что даже в рамках вероятностной стационарной среды конструкция автомата не является абсолютным преимуществом при всех значениях глубины памяти q.

При этом общая тенденция увеличения эффективности функционирования автомата с ростом глубины памяти q сохраняется.

Считая значение математического ожидания каждого автомата как результат выполнения некоторого алгоритма, воспользуемся величиной среднего времени работы автомата как оценкой быстродействия этого алгоритма для достижения полученного результата.

Таблица 3. Среднее время работы автомата

Table 3. Average machine operating time

Автомат	Память 1	Память 2	Память 3	Память 4	Память 5	Память 6	Память 7	Память 8
АЛТ	74	695	3761	251394	3648854	19393688	927170104	22414244336
АКРН	74	695	4527	264297	3795658	–	48562927	927170104
АРББ	74	759	5179	264297	3795658	53461387	1029193271	26407904074
АКРЛ	116	2152	50814	2426164	89700530	3627473535	126294097025	–

Таким образом, мы видим две автоматные стратегии оптимизации поведения:

1) получение оптимального результата за счет более высокой скорости смены действий;

2) замедление скорости переключения действий для увеличения времени нахождения в рамках оптимального в среде *E* действия.

Заключение

Рассмотренные выше системы, состоящие из достаточно простых автоматов, обладают свойством целесообразного поведения. Целесообразное поведение таких систем наблюдается уже при небольшом количестве входящих в них автоматов. Разнообразие поведения также достигается уже при незначительных изменениях в способе обработки сигналов автоматами. Более того, во всех случаях, кроме стационарной случайной среды, чрезмерная емкость памяти *q* оказывалась даже вредной. Внешняя процедура общей кассы в игре в размещения может быть реализована при помощи различных способов взаимодействия между участвующими в ней автоматами, которое варьируется от информационного до материального (полученные от среды поощрения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стефанюк В. Л.* Локальная организация интеллектуальных систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 328 с.

2. *Димитриченко Д. П.* Оптимизация рекуррентной нейронной сети при помощи автоматов с переменной структурой // Программные системы и вычислительные методы. 2023. № 4. С. 30–43. DOI: 10.7256/2454-0714.2023.4.69011

3. *Поспелов Д. А.* Игры и автоматы. М.: Энергия, 1966. 136 с.

4. *Цетлин М. Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М. 1969. 316 с.

5. *Поспелов Д. А.* Вероятностные автоматы. М.: Энергия, 1970. 88 с.

6. *Варшавский В. И.* Коллективное поведение автоматов. М.: Наука, 1973. 408 с.

7. *Варшавский В. И., Поспелов Д. А.* Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции некоторых технических систем и управление ими. М.: Наука, 1984. 208 с.

REFERENCES

1. Stefanyuk V.L. *Lokal'naya organizatsiya intellektual'nykh sistem* [Local organization of intelligent systems]. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 328 p. (In Russian)

2. Dimitrichenko D.P. Optimization of a recurrent neural network using automata with variable structure. *Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody* [Software systems and computational methods]. 2023. No. 4. Pp. 30–43. DOI: 10.7256/2454-0714.2023.4.69011. (In Russian)

3. Pospelov D.A. *Igry i avtomaty* [Games and automata]. Moscow: Energiya, 1966. 136 p. (In Russian)

4. Tsetlin M.L. *Issledovaniya po teorii avtomatov i modelirovaniyu biologicheskikh sistem* [Studies in the theory of automata and modeling of biological systems]. Moscow, 1969. 316 p. (In Russian)

5. Pospelov D.A. *Veroyatnostnyye avtomaty* [Probabilistic automata]. Moscow: Energiya, 1970. 88 p. (In Russian)

6. Varshavskii V.I. *Kollektivnoye povedeniye avtomatov* [Collective behavior of automata]. Moscow: Nauka, 1973. 408 p. (In Russian)

7. Varshavskii V.I., Pospelov D.A. *Orkestr igrayet bez dirizhera: razmyshleniya ob evolyutsii nekotorykh tekhnicheskikh sistem i upravleniye imi* [The orchestra plays without a conductor: reflections on the evolution of some technical systems and their control]. Moscow: Nauka, 1984. 208 p. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Димитриченко Дмитрий Петрович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., отдел нейроинформатики и машинного обучения, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А;

dimdp@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2399-3538, SPIN-код: 3272-3520

Information about the author

Dmitry P. Dimitrichenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, the Department of Neuroinformatics and Machine Learning, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 89 A Shortanov street;

dimdp@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2399-3538, SPIN-code: 3272-3520

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК: 004.89:004.4 Обзорная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-175-187
EDN: IKXIFN

Методы организации вопросно-ответных систем

Г. В. Дорохина[1], А. Г. Полоус[1, 2]

[1]Институт проблем искусственного интеллекта
283048, Россия, г. Донецк, ул. Артема, 118б
[2]Донецкий государственный университет
283001, Россия, г. Донецк, ул. Университетская, 24

Аннотация. На сегодняшний день актуальны проблемы человеко-машинного взаимодействия с помощью текста на естественном языке, в том числе с применением вопросно-ответных систем. Цель работы – анализ методов организации вопросно-ответных систем – достигнута путем рассмотрения типов вопросов и видов вопросно-ответных систем, описания методов построения вопросно-ответных систем. Встраивание вопросно-ответных систем в цифровые платформы позволит без существенного расширения персонала улучшать взаимодействие с клиентами, способствовать более эффективному решению их проблем, улучшать сервис. Это одновременно будет способствовать и росту дохода организаций-поставщиков, и повышению качества жизни потребителей товаров и услуг.

Ключевые слова: вопросно-ответная система, обработка естественно-языковых текстов, база данных, база знаний, онтология, машинное обучение, предобученные языковые модели

Поступила 25.11.2024, одобрена после рецензирования 09.12.2024, принята к публикации 11.12.2024

Для цитирования. Дорохина Г. В., Полоус А. Г. Методы организации вопросно-ответных систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 175–187. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-175-187

MSC: 68T40; 93C85 Review article

Methods of organizing question-answering systems

G.V. Dorokhina[1], A.G. Polous[1, 2]

[1]Institute of Artificial Intelligence Problems
283048, Russia, Donetsk, 118b Artema street
[2]Donetsk State University
283001, Russia, Donetsk, 24 University street

Abstract. Today the issue of human-machine interaction via natural language text, including the use of question answering systems, is relevant. The purpose of the work is to analyze the methods of developing question answering systems. It was achieved by considering the types of questions and types of question answering systems, describing the methods of building question answering systems. Embedding question answering systems into digital platforms will allow improving customer interaction without significantly expanding staff, contributing to more effective solutions to their problems, and improving service. This will simultaneously contribute to the growth of income of supplier organizations and improve the life quality of goods and services consumers.

Keywords: question-answering system, natural language processing, database, knowledge base, ontology, machine learning, pre-trained language models

© Дорохина Г. В., Полоус А. Г., 2024

Submitted 25.11.2024, approved after reviewing 09.12.2024, accepted for publication 11.12.2024

For citation. Dorokhina G.V., Polous A.G. Methods of organizing question-answering systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 175–187. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-175-187

Введение

Текст на естественном языке является ориентированным на человека средством хранения и передачи данных, информации, знаний. Вопросно-ответная система – это программный модуль, позволяющий человеку вести с машиной диалог на естественном языке, при котором пользователь задает вопросы программной системе, а программная система предоставляет ответы, формируемые в виде осмысленных предложений [1]. Работы по вопросно-ответным системам на естественном языке ведутся более пятидесяти лет. Большие массивы информации в виде текстов и текстовых документов на естественном языке привели к созданию поисковых систем, предоставляющих данные по текстовому запросу. Обычно эти данные представлены в виде ссылок на информационные ресурсы. Качество поиска значительно возросло благодаря распространению семантически структурированного содержимого. Появились вопросно-ответные системы на основе онтологий – формального описания структуры знаний в предметных областях. Автоматизация поиска и обработки данных с помощью вопросов и запросов на естественном языке расширяет возможности человека, упрощает и ускоряет работу с информацией, что указывает на актуальность темы исследований.

К настоящему времени разработан широкий спектр вопросно-ответных систем, которые существенно отличаются друг от друга по решаемым задачам, используемым методам и источникам данных. Достаточно много внимания уделяют вопросно-ответным системам, использующим семантический web, онтологии и графы знаний.

Цель работы состоит в анализе методов организации вопросно-ответных систем. Для ее достижения решены следующие задачи: 1) рассмотрены типы вопросов и виды вопросно-ответных систем; 2) описаны методы построения вопросно-ответных систем.

Практическая значимость работы. Встраивание вопросно-ответных систем в цифровые платформы [2] позволит без существенного расширения персонала улучшать взаимодействие с клиентами, способствовать более эффективному решению их проблем, улучшать сервис. Это одновременно будет способствовать и росту дохода организаций-поставщиков, и повышению качества жизни потребителей товаров и услуг. Примеры сфер, в которых эффективно применение вопросно-ответных систем: онлайн-службы доставки продуктов, покупки одежды и аксессуаров; интернет-банкинг; образование [3].

Типы вопросов и виды вопросно-ответных систем

Вопрос является формой мысли человека, которая нацелена на восполнение и уточнение известной ему информации [4]. Он выполняет познавательную и коммуникативную функции. Вопрос содержит в себе информацию, называемую базисом. Содержание будущего ответа является предметом вопроса, а область возможных ответов – объемом вопроса. Вопросы делят на восполняющие (что, где, когда и т.п.) и уточняющие (правда ли, что …). Вопросы бывают сложными и простыми. Простые содержатся в простых предложениях. Сложные образуются из двух и более простых вопросов с помощью логических союзов. Различают три вида сложных суждений: соединительные, разделительные, смешанные. Вопросы по существу называют релевантными, а вопросы, не относящиеся к делу, – нерелевантными. Закрытые вопросы допускают возможность исчерпывающего ответа. Тогда как открытые предполагают продолжение диалога, дальнейшее уточнение и углубление

знания. Определенные вопросы требуют однозначного ответа, а не определенные допускают неполный или неясный ответ. Прямые вопросы явно требуют установления неизвестного, а наводящие содержат такое требование в скрытой форме. Общие относятся к интересующему предмету в целом, а частные – к отдельным сторонам предмета вопроса [4].

Вопросно-ответные системы более удобны для пользователя по сравнению с поисковыми системами по ключевым словам в случаях, когда нужен краткий ответ на вопрос, а не список ссылок на документы, в которых этот ответ можно найти. Вопросно-ответные системы существенно различаются сложностью и предоставляемыми возможностями. Типичные классы вопросов, которые задают вопросно-ответным системам [5]: запрос по ключевым словам или на получение определения; вопросы относительно фактов («что» – вопрос, утверждение или опровержение); вопросы на понимание причинно-следственных связей (почему, как); вопросы, связанные с временными и пространственными рассуждениями; вопросы, связанные с рассуждениями на основе здравого смысла; интерактивные диалоги.

Вопросно-ответные системы могут быть организованы как системы с фактами или как системы со знаниями [6]. Системы с фактами хранят ответы на вопросы в базе данных. Для определения соответствия между вопросом пользователя и предопределенным в системе вопросом, а также между вопросом и ответом используют алгоритмы машинного обучения. Системы со знаниями в качестве источников используют тексты, данные интернета и базы знаний. Поиск ответа в текстовом корпусе зачастую выполняют с помощью линейных моделей или нейронных сетей, посредством которых моделируют контекст и семантическую связь между вопросом и текстом. Базы знаний содержат формализованные модели, которые описывают концептуальную структуру отдельных предметных областей и мира в целом, методы доступа к элементам моделей и способы выражения этих элементов в терминах естественного языка. Стандартом описания знаний в настоящее время являются онтологии. Вопросно-ответные системы на основе онтологий выбирают концепты, упомянутые в вопросе, и по связанным с ними данным либо данным, которые можно из них вывести, синтезируют ответ.

В работе [7] вопросно-ответные системы, организованные как интерактивные диалоги, предложено различать по «направлению», которое определяет ведущего в диалоге. В прямой вопросно-ответной системе человек задает вопросы, машина отвечает на них, а в инвертированной ведущим диалога является машина.

Закрытые вопросно-ответные системы работают в определенной предметной области, открытые – не зависят от предметной области. Есть вопросно-ответные системы, работающие с частными базами знаний. Различны и источники знаний, которые вопросно-ответные системы используют для получения ответа: структурированные – преобразуют запрос на естественном языке в запрос к базе данных; полуструктурированные – источниками выступают структурированные документы (анкеты, медицинские записи, платежные документы); тексты; семантические источники (онтологии, базы знаний) [5].

У вопросно-ответных систем присутствуют внутренние проблемы, характерные для классических поисковых систем, например: адаптируемость и работа с неоднозначностью. Для решения этих проблем применяют: лингвистический подход, статистический подход и подход, основанный на сопоставлении образцов.

Различается технологическая основа вопросно-ответных систем. В их основе может лежать: веб-классификация, извлечение сущностей [8, 9] и извлечение отношений [10–12], правила.

Появление генеративных языковых моделей (GPT от OpenAI, PaLM и Gemini от Google, Copilot от Microsoft, LlaMA от Meta AI, YandexGPT от Яндекс, GigaChat от Сбер, MTS AI

Chat от МТС) повлекло разделение вопросно-ответных систем на экстрактивные и генеративные [13]. Экстрактивные вопросно-ответные системы дают «короткий ответ на вопрос, часто в виде цитаты из поданного на вход набора документов» [13]. Генеративные системы синтезируют ответ из фрагментов текстов, выбранных в качестве соответствующих вопросу, или элементов базы знаний. Некоторые генеративные вопросно-ответные системы построены на основе больших предобученных генеративных языковых моделей, которые считаются способными к «сложным рассуждениям» и «позволяют отвечать более развернуто на более сложные вопросы» [13].

Организация вопросно-ответных систем со структурированными источниками

Известными представителями закрытых вопросно-ответных систем, которые используют структурированные источники данных, являются BASEBALL (1961) и LUNAR (1973) [5]. Они являются естественно-языковыми интерфейсами к экспертным системам по заданной предметной области.

Первые системы этого класса преобразуют вопросы на естественном языке в запросы к базам данных, используя правила и сравнение с образцом. Например, правило: «Если в вопросе за словом «столица» следует название страны, то система должна вывести название столицы, которая соответствует стране» позволит ответить на следующие вопросы и запросы:

Какой город является столицей Италии?

Выведи столицу Италии.

Что является столицей Италии?

Вы не могли бы назвать столицу Италии?

Такое поверхностное сопоставление с образцом часто приводит к неудаче, но также является неожиданно эффективной техникой при использовании в вопросах терминов, специфичных для предметной области, к которой относится источник знаний [5].

Недостатки систем этого класса связаны с их привязкой к конкретной базе данных. Их трудно модифицировать для использования с разными базами данных или перенести на другую предметную область. Настройка таких систем на предметную область требует существенных затрат времени и труда на синтез грамматик, которые отображают (mapping) вопросы на структуру базы данных. Их создают эксперты, используя явно сформулированные и неявные знания предметной области.

В следующем поколении систем использован формально-семантический подход: вместо жесткой привязки к структуре базы данных используют промежуточный язык представления, выражающий значение вопроса пользователя в терминах высокоуровневых концепций, независимо от структуры базы данных [5]. Это позволяет отделить языковые процессы, не зависящие от предметной области, от процесса отображения (mapping) вопроса на базу данных, который зависит от предметной области [5].

Развитием этого метода стал формально-семантический подход, в рамках которого отображают (mapping) предложения английского языка на выражения формальной семантической теории [5]. При таком подходе интерфейсы на естественном языке не зависят от предметной области. Настройка на предметную область состоит в настройке отображения выражений формальной семантической теории и терминов предметной области на структуру базы данных. При обработке запроса на естественном языке его сначала переводят в промежуточное логическое представление, а затем в SQL. Представителем такого подхода является система MASQUE / SQL (1993). В ней настройка на предметную область происходит полуавтоматически с помощью встроенного редактора, который помогает пользователю, используя иерархию is-a, описать типы сущностей, относящихся к базе данных, а затем указать ожидаемые слова вопроса и определить их значение в терминах логики предикатов, привязанной к таблицам (table) и отображениям (view) базы данных.

Система PRECISE (2003) сопоставляет вопрос с SQL-запросом путем определения классов семантически трактуемых вопросов. Вопрос преобразуют во множество пар атрибут/значение и маркеры отношения, указывающие на принадлежность либо к атрибутам, либо к значениям. Каждый атрибут в базе данных связан с определенным значением (что?, где? и т.д.), специальный словарь задает синонимы. Полученные в результате сопоставления элементы базы данных собираются в SQL-запрос. Если найдено более одного запроса, то правильный выбирает пользователь. Подход требует, чтобы лексические маркеры атрибутов и значений были различными. Вопросы с неизвестными словами являются семантически не интерпретируемыми – не обрабатываются. В экспериментах система правильно обработала 80% вопросов [5].

Более сложные запросы к базам данных по вопросу на естественном языке строят с помощью метода концептуальной разработки (Conceptual Authoring, 2007). Его применяли к большому медицинскому хранилищу. Логическое представление запроса строят с помощью естественно-языкового интерфейса, в котором вместо ввода текста все операции редактирования определяются в базовом логическом представлении, управляемом предопределенной онтологией. Это исключает проблемы с интерпретацией вопроса, но остается проблема настройки на предметную область [5].

Уменьшить сложность создания базовых грамматик для различных предметных областей призвана система C-PHRASE (2010). Ее графический веб-интерфейс позволяет построить семантическую грамматику с помощью серии именований, адаптаций и определений операций. В этой системе запросы представлены в виде выражений в расширенной версии кортежного исчисления Кодда. Они могут быть напрямую сопоставлены с SQL-запросами или логическими выражениями первого порядка. Возможно также использование предикатов более высокого порядка [5].

Организация открытых вопросно-ответных систем по текстам документов

Большинство открытых вопросно-ответных систем по вопросу устанавливают тип ожидаемого ответа, например: имя (человека, организации), количество (выражающее сумму денег, расстояние, размер), дата. Исходя из типа ожидаемого ответа классы вопросов помещены в таксономиях. Разные типы вопросов обрабатывают в соответствии с разными стратегиями.

Некоторые открытые вопросно-ответные системы применяют поверхностное расширение на основе ключевых слов для поиска в документах интересующих предложений. При этом документы отбирают по наличию слов, которые ссылаются на объекты того же типа, что и тип ожидаемого ответа. При поиске предложений их ранжируют, основываясь на синтаксических признаках, таких как порядок слов или сходство с запросом. Для поиска ответов, являющихся переформулировкой вопроса, могут использовать шаблоны. Для определения типа вопроса и сопоставления объектов с ожидаемым типом ответа системы могут обращаться к семантической паутине, например, к лексическим ресурсам WordNet, онтологии SUMO и другим. При построении ответа возможна более сложная синтаксическая, семантическая и контекстуальная обработка, включающая: распознавание именованных сущностей и отношений; разрешение кореференций; синтаксические чередования; устранение лексической, синтаксической и семантической неоднозначности; логические выводы и пространственно-временные рассуждения [5].

Вопросно-ответные системы, использующие в качестве источника текст, включают два этапа: 1) «определение семантического типа сущности, которую ищет вопрос» и 2) «определение дополнительных ограничений на объект ответа». В качестве ограничений используют ключевые слова, которые должны присутствовать (с точностью до синонимов или морфологических вариантов) в кандидате на ответ, и синтаксические или семантические

связи между сущностью-кандидатом на ответ и другими сущностями в вопросе. Такие системы обычно имеют встроенную иерархию типов вопросов на основе типов ожидаемых ответов, используют методы распознавания именованных сущностей и извлечения информации. Причем считается, что более 80 % вопросов в качестве ответа ожидает именованную сущность [5]. Рассмотрим особенности реализации этого метода на примерах систем LASSO (1999), FALCON (2000), DIMAP (2001).

Система LASSO может строить иерархию типов вопросов и ответов из обучающей выборки. По вопросу она автоматически определяет: тип вопроса (что, почему, кто, как, где); тип ответа (человек, расположение и т. д.); фокус вопроса – что нужно найти (многие вопросы неявно содержат ответ); ключевые слова. Распознавание именованных сущностей полезно, когда в ответе не может содержаться ключевое слово из вопроса, например: фокус вопроса «день недели».

Система FALCON в вопросе распознает именованные сущности и отображает на них семантические категории ответов. Идентифицированный таким образом тип ожидаемого ответа отображают на таксономию ответов, в которой категории верхнего уровня связаны с несколькими классами WordNet. То есть для фокуса вопроса и ключевых слов в иерархии WordNet выбирают наиболее общую категорию и ищут ответы, включая всех представителей синонимического ряда (synset) этой категории. Фокус вопроса – существительные, непосредственно связанные с вопросным словом, – также относят к ключевым словам.

Система DIMAP работает с шестью типами вопросов: время, местоположение, кто, что, размер и сколько. Она извлекает из документов «триплеты семантических отношений», которые хранит в базе данных и использует для ответа на вопрос. Триплет семантического отношения состоит из объекта дискурса, семантического отношения, характеризующего роль объекта в предложении, и управляющего слова, с которым объект находится в семантическом отношении. Для каждого предложения строится в среднем 9,8 триплетов. Аналогичную обработку выполняют для вопросов, генерируя в среднем 3,3 триплета на предложение, в том числе один триплет на каждый вопрос содержит несвязанную переменную, соответствующую типу вопроса.

Организация открытых вопросно-ответных систем по текстам в сети интернет

Вопросно-ответные системы на основе веб-классификации извлекают ответы на вопросы относительно фактов путем обращения к хранилищу документов в интернете. Они состоят из трех компонентов: 1) механизм формулирования запросов – преобразует запрос на естественном языке в запросы извлечения информации (IR-запросы); 2) поисковая система в интернете; 3) модуль извлечения ответов из документов, полученных от поисковой системы. В системах этого типа так же, как в системах поиска в текстах, для классификации типов ответа прибегают к WordNet или разметке именованных сущностей [5].

Система Mulder (2001) является вопросно-ответной системой относительно фактов в сети интернет, использующей результаты нескольких запросов к поисковому движку Google. Чтобы правильно сформировать поисковые запросы, система выполняет следующие действия. В вопросе она анализирует тип объекта глагола с помощью WordNet (например: числовой, именной, временной). Далее модуль формулирования запросов преобразует вопрос в набор запросов по ключевым словам, используя различные стратегии: извлечение наиболее важных ключевых слов, цитирование неполных предложений (именных групп), спряжение глагола или его расширение посредством WordNet. Ответ извлекают из возвращаемых Google фрагментов или резюме. При этом группируют похожие ответы и выбирают лучший методом голосования [5].

Система AskJeeves ищет вопрос в собственной базе данных и возвращает список близких вопросов, на которые известен ответ. Пользователь выбирает наиболее подходящий

вариант из списка, и его направляют на веб-страницы, где можно найти ответ. Данная система полагается на редакторов-людей, которые шаблонам вопросов ставят в соответствие страницы авторитетных сайтов.

Другой метод основан статистическом или семантическом сходстве. Например, FAQ Finder (1997) – это вопросно-ответная система на естественном языке, у которой источником данных выступают файлы часто задаваемых вопросов. Для сопоставления вопросов с ответами она использует две метрики: статистическое сходство и семантическое сходство. Статистическое сходство определяют с учетом предварительной статистической обработки большого количества специально подготовленных объемных документов предметной области. Семантическое сходство оценивают путем поиска в WordNet связей между вопросом пользователя и ответом. Данный метод не находит ответы на вопросы, слова которых явно не присутствуют в базе знаний. Для решения проблемы находят семантические эквиваленты, которые являются перефразировкой вопроса пользователя и на которые уже есть ответ в социальных сетях вопросов и ответов.

START (SynTactic Analysis using Reversible Transformations, 1993) – сетевая вопросно-ответная система на естественном языке. Отвечает на вопросы о фактах, дает определения из словарей по четырем предметным областям: география, искусство, наука и справочная информация, история и культура. Данные о фактах хранит в специальной «универсальной базе» Omnibase, имеющей модель «объект – свойство – значение». Каждому объекту этой базы сопоставлен источник данных. Источниками знаний являются локальное хранилище (база знаний) и интернет [14].

Вопросно-ответные системы на основе предобученных языковых моделей

Влияние на все задачи обработки естественно-языковых текстов оказали генеративные предобученные языковые модели. Ограничением в их использовании является лимит по числу входных токенов, что не позволяет работать с большим количеством документов или с документом большого размера [13]. Для его преодоления в работе [13] рассмотрена индексация документов с последующим поисковым запросом и генерацией ответа на базе open source фреймворков Haystack, LlamaIndex. Рассмотрим схему ее работы. Вопрос поступает на вход «ретривера», который выбирает из хранилища индексированных документов наиболее релевантные вопросу фрагменты текста. Из этих фрагментов текста генерируют ответ. Предпочтительным способом статистической индексации документов считают индексацию с использованием меры TF-IDF или ее вариации BM25 [15]. Статистическая индексация имеет существенные недостатки, связанные с невозможностью учитывать порядок слов, контекст, замену слов синонимами. Эту проблему решают векторные семантические представления как способ в векторной форме описать семантический контекст слова с помощью так называемого эмбеддинга. Представления текста в виде эмбеддингов строят большие языковые модели, такие как BERT и GPT. Индекс может быть построен либо как набор последовательных эмбеддингов, соответствующих последовательным частям текста, либо как древовидная иерархическая структура, являющаяся представлением последовательной восходящей суммаризации текста. Существуют фреймворки с открытым исходным кодом, которые можно применять для создания вопросно-ответных систем на основе генеративных предобученных языковых моделей, например LlamaIndex и Haystack. При работе с ними можно использовать оптимизированные хранилища, такие как Weaviate, Pinecone, FAISS.

Организация вопросно-ответных систем на основе модели BERT, применяемых в известных виртуальных ассистентах, рассмотрена в работе [16]. Реализация мультимодальных визуальных вопросно-ответных систем приведена в работе [17].

Вопросно-ответные системы на основе онтологий

Вопросно-ответные системы на основе онтологий детально рассмотрены в работе [18]. Охарактеризуем наиболее известные из них.

MOSES отвечает на вопросы на естественном языке, используя базу знаний, которая основана на фактах и построена на семантически структурированном содержимом Семантической паутины.

AQUA – закрытая доменная вопросно-ответная система, которая объединяет связанные с доменом документы и знания баз данных с помощью онтологии. При поиске ответа взаимодействует с человеком для уточнения входящего запроса.

JAVELIN – система для открытых доменов, в которой предусмотрено дополнение данными. JAVELIN имеет звездообразную архитектуру. В ней все подзадачи, связанные с ответом на вопрос (анализ вопроса, поиск информации, извлечение ответа и поиск ответа), рассматриваются как узлы, соединенные с центральным узлом. Получив вопрос от пользователя, центральный узел генерирует стратегию поиска ответа по классу вопроса.

PowerAQUA – это вопросно-ответная система на основе нескольких онтологий, которая ориентирована на запросы к нескольким ресурсам Семантического Веба и принимает пользовательские запросы на естественном языке.

AquaLog – это портативная вопросно-ответная система, основанная на онтологии с ограниченным доменом. Источниками данных являются онтология и WordNet. Система принимает вопросы на естественном языке и возвращает ответы из семантических баз знаний, совместимых с онтологией. Она способна настраиваться на «жаргон» пользователя. Обучение происходит с использованием онтологических рассуждений для формирования общих шаблонов. По вопросу на естественном языке лингвистический компонент системы строит запросы в формате триплетов (Query Triples), а служба сходства отношений преобразует их в форму онто-триплетов (OntoTriples).

PANTO моделирует портативный интерфейс для преобразования данных на естественном языке в запрос SPARQL. Он основан на модели триплетов, в которой дерево разбора строят для модели данных с использованием стандартного парсера Standford. К запросам на естественном языке применяют логические правила в форме отрицания, сравнительной и превосходной степени. Для отображения используют метрические алгоритмы WordNet и String. Дерево синтаксического анализа формирует промежуточное представление в виде Query Triples. Далее это представление преобразует в форму OntoTriples, которые представлены как сущности в онтологии. В конечном итоге OntoTriples интерпретируются как форма SPARQL. Таким образом, эта система помогает преодолеть разрыв между реальными пользователями и онтологией с помощью семантической сети, основанной на логической модели.

FREyA (Feedback, Refinement и Extended Vocabulary Aggregation) – вопросно-ответная система с возможностью уточнения вопроса и расширенной агрегацией словарного запаса. Сочетает синтаксический анализ со знаниями в онтологии для быстрого развертывания новой системы. В этой модели концепции онтологии изначально идентифицируются и проверяются. По вопросу пользователя строят дерево синтаксического разбора с помощью StanfordParser. Сопоставление пользовательского запроса с концепцией онтологии реализуется двумя способами: автоматически и с помощью пользователя. Уточнение вопроса у пользователя производят с помощью закодированных в онтологии знаний. В результате определяют тип ответа и генерируют запрос SPARQL. Модель ранжирования используется по типу сходства строк. Тип ответа этой системы представлен в виде графа. Для визуализации полученного графа используют JIT-библиотеку.

Querix – использует диалоги уточнений в случае неоднозначности вопроса. Включает в себя пользовательский интерфейс, менеджер онтологий, анализатор запросов, центр сопоставления, генератор запросов, компонент диалога и уровень доступа к онтологии; использует парсер Standford для построения дерева синтаксического разбора вопроса. Запросы на естественном языке преобразует SPARQL-запрос, а с помощью WordNet определяет синонимы. Querix не использует семантические методы, основанные на логике.

ORAKEL используют для вычисления потенциальных ответов на запросы пользователя. Эта система формирует вопросы на основе слов пользователя и знаний, представленных в форме логики. Она переводит вопрос в форму запроса и отправляет его в модель обобщения для получения ответа. Затем механизм вывода оценивает запрос и возвращает ответ пользователю. ORAKEL настраивается через взаимодействие с пользователем в программе Frame Mapper, которая сопоставляет лингвистические структуры с отношениями в онтологии.

Система QACID основана на сборе запросов из заданного домена. Их анализируют и группируют в кластеры, далее вручную аннотируют с помощью запросов SPARQL. Каждый запрос рассматривается как мешок слов, сопоставляющий слова в естественно-языковых запросах с базой знаний с помощью метрик строковых расстояний. Генератор SPARQL заменяет онтологию экземплярами, сопоставленными для исходного вопроса на естественном языке. Он специфичен для домена – производительность зависит от типов вопросов, собранных в домене.

Систему SMART используют для управления информацией в семантической сети. Она включает в себя автоматический инструмент рассуждения и интеграцию с инструментами запроса. Система SMART способна выполнять запросы к семантическим базам данных с использованием языка запросов дескриптивной логики (DL), который отображается в форме запроса SPARQL. Одной из особенностей SMART является возможность проверки семантических запросов и преобразование запросов DL в формат SPARQL. Полученные результаты отображаются в формате RDF (триплетов «субъект – отношение – объект»), где каждый объект тройки представлен в виде унифицированного идентификатора ресурсов (URI). SMART хранит онтологии в файловой системе.

SWSE – система семантического веб-поиска, поддерживающая SPARQL с представлением RDF. Структура индекса состоит из полного индекса на четверках с функцией поиска по ключевым словам, основанной на инвертированной форме индекса. Компоненты обработки запросов распределены по нескольким машинам.

Система Cyc является открытой и обладает большой базой знаний. Она существует уже около 30 лет и включает в себя множество онтологий. Кроме того, Cyc имеет интерфейс на английском языке и может отвечать на вопросы.

Заключение

В данной работе изложены основные методы построения вопросно-ответных систем. Их анализ показал, что на практике применяют широкий спектр методов. Методы, реализованные в ранних вопросно-ответных системах, отвечали на вопросы относительно фактов в заданной предметной области и были построены как интерфейсы к базам данных. Задача получения человеком информации из технической системы с помощью вопроса на естественном языке сыграла не последнюю роль в появлении таких технологий, как семантический веб, машинное обучение, базы знаний на основе онтологий. А сами эти технологии позволили существенно ускорить, упростить и удешевить разработку вопросно-ответных систем в разных предметных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лапшин В. А.* Вопросно-ответные системы: развитие и перспективы // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2012. № 6. С. 1–9. EDN: PDWJEV

2. *Пономарев В. В., Туманов В. Е.* Модель цифрового интерактивного документа в системном анализе предметной онтологии // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXV международной научной и учебно-практической конференции, 13–14 октября 2021 г.: в 3 частях. Ч. 3. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-361

3. *Муромцев Д. И.* Модели и методы индивидуализации электронного обучения в контексте онтологического подхода // Онтология проектирования. 2020. Т. 10. № 1(35). С. 34–49. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-34-49

4. *Веревичев И. И.* Логика: краткий теоретический курс: учебное пособие для студентов гуманитарных факультетов. Ульяновск: УлГТУ, 2009. 101 с.

5. *Lopez V. Is., Uren V., Sabou M., Motta E.* Question answering fit for the Semantic Web? // Article in Semantic Web. DOI: 10.3233/SW-2011-0041. UK: Milton Keynes, 2011. Pp. 14–47.

6. *Тюрина Д. А., Пальмов С. В.* Применение нейронных сетей в обработке естественного языка // Журнал прикладных исследований. 2023. № 7. С. 158–162. DOI: 10.47576/2949-1878_2023_7_158

7. *Черноморова Т. С., Воробьев С. П.* Классификация и принципы построения систем вопросно-ответного поиска // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6. № 8. С. 145–156. DOI: 10.33619/2414-2948/57/12

8. *Дородных Н. О., Юрин А. Ю.* Подход к автоматизированному наполнению графов знаний сущностями на основе анализа таблиц // Онтология проектирования. 2022. Т. 12. № 3(45). С. 336–352. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-336-352

9. *Видия А. В., Дородных Н. О., Юрин А. Ю.* Подход к созданию онтологий на основе электронных таблиц с произвольной структурой // Онтология проектирования. 2021. Т. 11. № 2(40). С. 212–226. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-2-212-226

10. *Ломов П. А., Никонорова М. Л., Шишаев М. Г.* Извлечение отношений из NER-размеченных предложений для обучения онтологии // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13. № 2. С. 23–30. DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.2.002

11. *Тихобаева О. Ю., Бручес Е. П., Батура Т. В.* Извлечение семантических отношений из текстов научных статей // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. Т. 20. № 3. С. 65–76. DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20- 3-65-76

12. *Мезенцева А. А., Бручес Е. П., Батура Т. В.* Методы и подходы к автоматическому связыванию сущностей на русском языке // Труды ИСП РАН. 2022. Т. 34. № 4. С. 187–200. DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(4)-13

13. *Голиков А. А., Акимов Д. А., Романовский М. С., Тращенков С. В.* Аспекты создания корпоративной вопросно-ответной системы с использованием генеративных предобученных языковых моделей // Litera. 2023. № 12. С. 190–205. DOI: 10.25136/2409-8698.2023.12.69353

14. *Деревянко Д. В., Пальчунов Д. Е.* Формальные методы разработки вопросно-ответной системы на естественном языке // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2014. Т. 12, № 3. С. 34–47. EDN: RKCZKL

15. *Милкова М. А., Неволин И. В., Пигорев Д. П.* Современные методы извлечения ключевой информации из нормативных документов // Экономическая наука современной России. 2021. № 2(93). DOI: 10.33293/1609-1442-2021-2(93)-101-114

16. *Гуляев П. А., Елистратова Е. А., Коновалов В. П. и др.* Отслеживание состояния целеориентированного диалога на основе БЕРТ // Труды МФТИ. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 48–61. DOI: 10.53815/20726759_2021_13_3_48

17. *Фаворская М. Н., Андреев В. В.* Адаптивное блочное тензорное разложение в визуальных вопросно-ответных системах // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 1. С. 164–171. DOI: 10.15827/0236-235X.133.164-171

18. *Bali V., Verma A.* A study on components, benchmark criteria and techniques used in ontology-based question answering systems // IJISAE, 2022, 10(1s). India: Chandigarh, 2022. Pp. 9–17.

REFERENCES

1. Lapshin V.A. Question-answering systems: development and prospects. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2012. No. 6. Pp. 1–9. EDN: PDWJEV. (In Russian)

2. Ponomarev V.V., Tumanov V.E. Model of a digital interactive document in the systems analysis of subject ontology. *Sistemnyy analiz v proyektirovanii i upravlenii* [Systems analysis in design and management]: collection of scientific papers of the XXV International scientific and educational-practical conference, October 13–14, 2021, in 3 parts. Part 3. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-361. (In Russian)

3. Muromtsev D.I. Models and methods of individualization of e-learning in the context of the ontological approach. *Ontology of Designing*. 2020. Vol. 10. No. 1(35). Pp. 34–49. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-34-49. (In Russian)

4. Verevichev I.I. *Logika: kratkiy teoreticheskiy kurs: uchebnoye posobiye dlya studentov gumanitarnykh fakul'tetov* [Logic: a short theoretical course: a tutorial for students of humanities faculties]. Ulyanovsk: UlGTU, 2009. 101 p. (In Russian)

5. Lopez V.Is, Uren V., Sabou M., Motta E. Question answering fit for the Semantic Web? *Article in Semantic Web*. DOI: 10.3233/SW-2011-0041. UK: Milton Keynes, 2011. Pp. 14–47.

6. Tyurina D.A., Palmov S.V. Application of neural networks in natural language processing. *Journal of Applied Research*. 2023. No. 7. Pp. 158–162. DOI: 10.47576/2949-1878_2023_7_158. (In Russian)

7. Chernomorova T.S., Vorobyov S.P. Classification and principles of constructing question-answer search systems. *Bulletin of Science and Practice*. 2020. Vol. 6. No. 8. Pp. 145–156. DOI: 10.33619/2414-2948/57/12. (In Russian)

8. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. An approach to automated filling of knowledge graphs with entities based on table analysis. *Ontology of Designing*. 2022. Vol. 12. No. 3(45). Pp. 336–352. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-336-352. (In Russian)

9. Vidiya A.V., Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. An approach to creating ontologies based on spreadsheets with an arbitrary structure. *Ontology of Designing*. 2021. Vol. 11. No. 2(40). Pp. 212–226. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-2-212-226. (In Russian)

10. Lomov P.A., Nikonorova M.L., Shishaev M.G. Extracting relations from NER-labeled sentences for ontology training. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical sciences]. 2022. Vol. 13. No. 2. Pp. 23–30. DOI: 10.37614/2949-1215.2022.13.2.002. (In Russian)

11. Tikhobaeva O.Yu., Bruches E.P., Batura T.V. Extracting semantic relations from the texts of scientific articles. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of NSU. Series: Information technologies]. Vol. 20. No. 3. Pp. 65–76. DOI 10.25205/1818-7900-2022-20- 3-65-76. (In Russian)

12. Mezentseva A.A., Bruches E.P., Batura T.V. Methods and approaches to automatic linking of entities in Russian. *Proceedings of The Institute for System Programming of the RAS*. 2022. Vol. 34. No. 4. Pp. 187–200. DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(4)-13. (In Russian)

13. Golikov A.A., Akimov D.A., Romanovsky M.S., Trashchenkov S.V. Aspects of creating a corporate question-answering system using generative pre-trained language models. *Litera*. 2023. No. 12. Pp. 190–205. DOI: 10.25136/2409-8698.2023.12.69353. (In Russian)

14. Derevyanko D.V., Palchunov D.E. Formal methods for developing a question-answering system in natural language. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Novosibirsk State University. Series: Information Technology]. 2014. Vol. 12. No. 3. Pp. 34–47. EDN: RKCZKL. (In Russian)

15. Milkova M.A., Nevolin I.V., Pigorev D.P. Modern methods for extracting key information from regulatory documents. *Economics of Contemporary Russia*. 2021. No. 2(93). DOI: 10.33293/1609-1442-2021-2(93)-101-114. (In Russian)

16. Gulyaev P.A., Elistratova E.A., Konovalov V.P. et al. Tracking the state of a goal-oriented dialogue based on BERT. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*. 2021. Vol. 13. No. 3(51). Pp. 48–61. DOI: 10.53815/20726759_2021_13_3_48. (In Russian)

17. Favorskaya M.N., Andreev V.V. Adaptive block tensor decomposition in visual question-answering systems. *Software & Systems*. 2021. Vol. 34. No. 1. Pp. 164–171. DOI: 10.15827/0236-235X.133.164-171. (In Russian)

18. Bali V., Verma A. A study on components, benchmark criteria and techniques used in ontology-based question answering systems. *IJISAE*, 2022. Vol. 10. No. 1s(2002). India: Chandigarh, 2022. Pp. 9–17.

Вклад авторов:

А. Г. Полоус – подбор материала по тематике исследований, типизация вопросно-ответных систем и описание вопросно-ответных систем на основе онтологий.

Г. В. Дорохина – систематизация материала, изложение методов построения вопросно-ответных систем, оформление работы.

Authors' contribution:

A.G. Polous – selection of material on the research topic, typification of question-answering systems and description of question-answering systems based on ontologies.

G.V. Dorokhina – systematization of material, presentation of methods for constructing question-answering systems, design of the work.

Финансирование. Исследование осуществлено в рамках фундаментальных исследований ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта» по теме «Исследование и разработка методов обработки данных и естественно-языковых текстов с применением онтологий», Рег. № НИОКТР 123092600030-4.

Funding. The study was carried out within the framework of fundamental research of the Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Artificial Intelligence Problems on the topic Research and development of methods for processing data and natural language texts using ontologies, Reg. No. NIOKTR 123092600030-4.

Информация об авторах

Дорохина Галина Владимировна, науч. сотр., отдел системного анализа и интеллектуальных интерфейсов, Институт проблем искусственного интеллекта;
283048, Россия, г. Донецк, ул. Артема, 118б;
SPIN-код: 6522-7758

Полоус Андрей Геннадиевич, техник-программист, отдел системного анализа и интеллектуальных интерфейсов, Институт проблем искусственного интеллекта;
283048, Россия, г. Донецк, ул. Артема, 118б;
студент физико-технического факультета, Донецкий государственный университет;
283001, Россия, г. Донецк, ул. Университетская, 24;
SPIN-код: 6966-7988

Information about the authors

Galina V. Dorokhina, Researcher, Department of Systems Analysis and Intelligent Interfaces, Institute of Artificial Intelligence Problems;
283048, Russia, Donetsk, 118b Artema street;
SPIN-code: 6522-7758

Andrey G. Polous, Software Engineer, Department of Systems Analysis and Intelligent Interfaces, Institute of Artificial Intelligence Problems;
283048, Russia, Donetsk, 118b Artema street;
student, Faculty of Physics and Technology, Donetsk State University;
283001, Russia, Donetsk, 24 University street;
SPIN-code: 6966-7988

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 004.89 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-188-196
EDN: WQHLUG

Нейрокогнитивные отображения и функции для моделей нейроморфогенеза в системах управления интеллектуальных онтофилогенетических агентов

З. В. Нагоев[1, 2]

[1]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2
[2]Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. Основная *научная проблема*, решению которой посвящена настоящая работа, заключается в необходимости разработки формального аппарата для описания процессов онтонейроморфогенеза роста и развития аксо-дендрональных связей между агентами-нейронами в составе управляющих нейрокогнитивных архитектур интеллектуальных программных агентов. *Цель исследования* состоит в разработке формального аппарата, описывающего взаимодействие между элементами мультиагентных нейрокогнитивных архитектур агентов универсального искусственного интеллекта. Разработан формальный аппарат для описания мультиагентных нейрокогнитивных архитектур и процессов ситуативно-обусловленного роста и деградации ассоциативных связей в них, инспирированных процессами роста и деградации аксо-дендрональных связей в головном мозге человека. Впервые введены понятия и даны формальные определения мультиагентных пространств, координат, осей, метрик, протоколов, диалогов, реплик и мультиреплик, функций нейрогенеза, пресинаптических и постсинаптических терминалей, коэффициентов корреляции и доверия, функций активации и доверия, синапсов, необходимые для записи и исчисления контрактов между акторами в составе когнитивных архитектур агнейронов. Впервые введены нейрокогнитивные функции (отображения), описывающие процессы онтонейроморфогенеза в нейрокогнитивных архитектурах интеллектуальных агентов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, мультиагентные системы, нейрокогнитивные архитектуры, нейроморфогенез, машинное обучение, онтофилогенетические агенты

Поступила 29.11.2024, одобрена после рецензирования 09.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Нагоев З. В. Нейрокогнитивные отображения и функции для моделей нейроморфогенеза в системах управления интеллектуальных онтофилогенетических агентов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 188–196. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-188-196

MSC: 68T42 Original article

Neurocognitive mappings and functions for neuromorphogenesis models in control systems of intelligent ontophylogenetic agents

Z.V. Nagoev[1, 2]

[1]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street
[2]Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

© Нагоев З. В., 2024

Abstract. The main scientific problem of this work is the need to develop a formal apparatus for describing processes of onto-neuromorphogenesis, growth and development of axo-dendronal connections among agent neurons in the control neurocognitive architectures of intelligent software agents. The aim of the study is to develop a formal apparatus describing the interaction among elements of multi-agent neurocognitive architectures of agents of universal artificial intelligence. A formal apparatus has been developed to describe multi-agent neurocognitive architectures and processes of situationally conditioned growth and degradation of associative connections in them, inspired by the processes of growth and degradation of axo-dendronal connections in human brain. For the first time concepts have been introduced and formal definitions have been given for multi-agent spaces, coordinates, axes, metrics, protocols, dialogues, replicas and multi-replicas, neurogenesis functions, presynaptic and postsynaptic terminals, correlation and trust coefficients, activation and trust functions, synapses, which are necessary for recording and calculating contracts among actors as part of cognitive architectures of agneurons. For the first time neuro-cognitive functions (mappings) have been introduced that describe the processes of ontoneuromorphogenesis in neurocognitive architectures of intelligent agents.

Keywords: artificial intelligence, multi-agent systems, neurocognitive architectures, neuromorphogenesis, machine learning, ontophylogenetic agents

Submitted 29.11.2024, approved after reviewing 09.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Nagoev Z.V. Neurocognitive mappings and functions for neuromorphogenesis models in control systems of intelligent ontophylogenetic agents. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 188–196. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-188-196

Введение

В [1, 2] предложена концепция алгоритмов онтонейроморфогенеза, описывающих процессы ситуативно-детерминированного роста и деградации ассоциативных связей между агентами-нейронами (агнейронами) в нейрокогнитивных архитектурах, представляющих собой метафоры проектирования систем управления поведением интеллектуальных программных агентов, действующих в реальной среде. Основная идея этой концепции состоит в имитации гипотетических процессов формирования аксо-дендрональных связей между нейронами головного мозга человека в ходе его индивидуального развития с целью формирования алгоритмической базы идентификации, онтологизации и решения проблем универсального спектра в системе «интеллектуальный агент – реальная среда». Агнейроны представляются минимальными функциональными моделями (клетками) искусственной жизни, обладающими собственными целевыми функциями максимизации энергии, рассматриваемой как описательная величина, характеризующая степень жизнеспособности агнейрона. Агнейроны могут получать энергию из резервуара энергии интеллектуального программного агента, в составе функциональных узлов (нейрокогнитонов) нейрокогнитивной архитектуры которого они находятся, и расходовать эту энергию на выполнение различных действий, основным из которых является отправка сообщений другим агнейронам.

Кроме того, агнейроны могут посылать друг другу порции энергии с целью получения взамен информации, которой располагает агнейрон-контрагент. Такой обмен получил название нейрокогнитивный контракт. Агнейроны вступают друг с другом в контрактные отношения, исходя из своих представлений, выраженных в их онтологиях, реализованных на базе мультиагентных знаний, хранящихся в их нейрокогнитивных архитектурах.

Агнейроны являются промежуточным звеном рекурсивной нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента, так как, с одной стороны, входят в состав различных нейрокогнитонов этой архитектуры (рис. 1 а), а с другой стороны, сами включают в свой состав внутреннюю когнитивную архитектуру, состоящую из когнитивных узлов (актор-когнитонов), функциональность которых сходна с нейрокогнитонами, в которых

располагаются т.н. акторы – программные агенты, не имеющие своей собственной целевой функции и действующие в процедурном стиле на основе продукционных правил, содержащихся в их базах знаний (рис. 1 б).

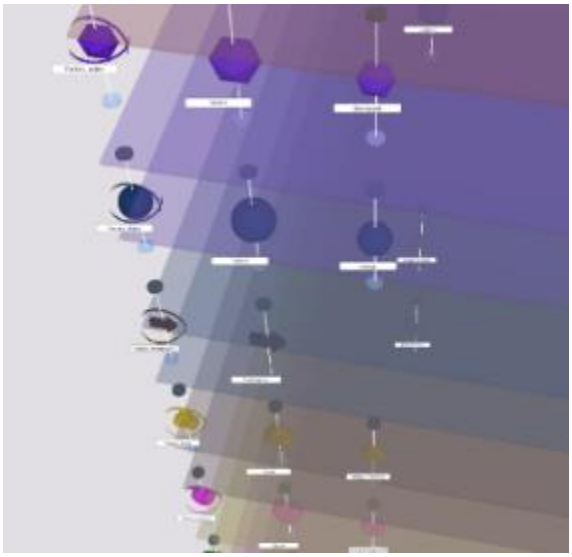


Рис. 1 а). *Агнейроны в составе нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента*

Fig. 1 a). *Agneurons as part of the neurocognitive architecture of an intelligent agent*

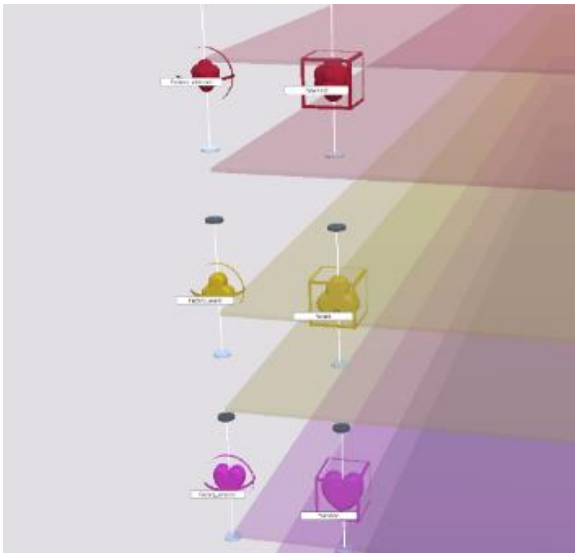


Рис. 1 б). *Акторы в составе акторной когнитивной архитектуры агнейрона*

Fig. 1 b). *Actors in the actor-cognitive architecture of the agneuron*

Концепция управления развитием нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента на основе алгоритма онтонейроморфогенеза мотивирована гипотетическим сходством вышеописанных процессов с процессами, происходящими в головном мозге человека в процессе формирования онтологий системы «интеллектуальный агент – среда», синтеза поведения этого интеллектуального агента в пространстве состояний этой системы. Особый теоретический и практический интерес представляет возможность обоснования способности управляющих нейрокогнитивных архитектур к синтезу автономного поведения, направленного на идентификацию, онтологизацию и решение любых проблем (последовательность состояний, приводящая интеллектуального агента к потере энергии), с которыми агент может столкнуться в пространстве состояний этой системы (*универсальный спектр проблем*), так как именно такая способность, по нашему представлению, является основным классифицирующим признаком *агента универсального искусственного интеллекта* (УИИ) [3].

Основная *научная проблема*, решению которой посвящена настоящая работа, заключается в необходимости разработки формального аппарата для описания процессов онтонейроморфогенеза роста и развития аксо-дендрональных связей между агентами-нейронами в составе управляющих нейрокогнитивных архитектур интеллектуальных программных агентов.

Актуальность работы определяется требованиями разработки концептуальной, формальной и алгоритмической базы агентов универсального искусственного интеллекта, пригодных к обучению и использованию при решении задач универсального спектра.

Цель исследования состоит в разработке формального аппарата, описывающего взаимодействие между элементами мультиагентных нейрокогнитивных архитектур агентов универсального искусственного интеллекта.

Основной *задачей* исследования является разработка формального аппарата для моделирования взаимодействия акторов в составе когнитивных архитектур агнейронов в процессах формирования и расторжения мультиагентных контрактов на обмен энергией и информацией.

1. Нейрокогнитивные функции (отображения)

Опишем нейрокогнитивную архитектуру $\text{מ}_i^{\text{ל}}$ *интеллектуального агента* $\text{א}_i^{\text{ל}}$ множеством:

$$\text{מ}_i^{\text{ל}} = \left\{\text{ק}_{jT_j}^{i} \mid j = 1,2,\dots,j^{\mathbf{max}}\right\}, \text{ק}_{jT_j}^{i} = \left\{\text{נ}_{kT_j}^{ij(\text{ל}-1)} \mid k = 1,2,\dots,k^{j\mathbf{max}}\right\},$$

$$\text{נ}_{kT_j}^{ij(\text{ל}-1)} = \left\{K_{lT_l}^{ijk} \mid l = 1,2,\dots,l^{k\mathbf{max}}\right\}, K_{lT_l}^{ijk} = \left\{\alpha_{hT_l}^{ijkl(\text{ל}-2)} \mid h = 1,2,\dots,h^{jkl\mathbf{max}}\right\},$$

где $\text{ק}_{jT_j}^{i}$ – *нейрокогнитоны*, $\text{נ}_{kT_j}^{ij(\text{ל}-1)}$ – *агнейроны* типа T_j, $K_{lT_l}^{ijk}$ – *акторкогнитоны*, $\alpha_{hT_l}^{ijkl(\text{ל}-2)}$ – *акторы* типа T_l. Индексы ל указывают на *ранг*.

Актор $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$ зададим *абстрактным конечным детерминированным автоматом*: $a_{hT_l}^{ijkl} = \left(X_{hT_l}^{ijkl}, S_{hT_l}^{ijkl}, Y_{hT_l}^{ijkl}, \delta_{hT_l}^{ijkl}, \lambda_{hT_l}^{ijkl}\right)$.

Здесь $X_{hT_l}^{ijkl} = \left\{x_{hT_lv}^{ijkl}\right\}$ – *входной язык*, включающий высказывания вида:

$$x_{hT_lv}^{ijkl} = \begin{pmatrix} \left(\alpha_{hT_lv1}^{ijkl}, x_{hT_lv1}^{ijkl}, \Delta v_{hT_lv1}^{ijkl}\right), \left(\alpha_{hT_lv2}^{ijkl}, x_{hT_lv2}^{ijkl}, \Delta v_{hT_lv2}^{ijkl}\right), \dots, \\ \left(\alpha_{hT_lvq^{\max}}^{ijkl}, x_{hT_lvq^{\max}}^{ijkl}, \Delta v_{hT_lvq^{\max}}^{ijkl}\right) \end{pmatrix},$$

где $\alpha_{hT_lvq}^{ijkl}$ – акторы, $x_{hT_lvq}^{ijkl}$ – символьные сообщения, $\Delta v_{hT_lvq}^{ijkl}$ – порции *энергии* (*ноотропа*), $S_{hT_l}^{ijkl} = \left\{s_{hT_lb\tau_c}^{ijkl}\right\}$ – состояния автомата, $Y_{hT_l}^{ijkl} = \left\{y_{hT_lv}^{ijkl}\right\}$ – *выходной язык*, состоящий из высказываний вида:

$$y_{hT_lv}^{ijkl} = \begin{pmatrix} \left(a_{hT_lv1}^{ijkl}, y_{hT_lv1}^{ijkl}, \Delta v_{hT_lsv1}^{ijkl}\right), \left(a_{hT_lv2}^{ijkl}, y_{hT_lv2}^{ijkl}, \Delta v_{hT_lsv2}^{ijkl}\right), \dots, \\ \left(a_{hT_lvg^{\max}}^{ijkl}, y_{hT_lvg^{\max}}^{ijkl}, \Delta v_{hT_lsvg^{\max}}^{ijkl}\right) \end{pmatrix},$$

$\alpha_{hT_lvg}^{ijkl}$ – акторы – реципиенты сообщений $y_{hT_lvg}^{ijkl}$ или порций энергии $\Delta v_{hT_lsvg}^{ijkl}$ от актора $a_{hT_l}^{ijkl}$.

Процедуры рассылки сообщений и энергии отобразим в виде:

$$\alpha_{uT_d}^{ijkd} \to \alpha_{hT_l}^{ijkl} : m_{ijkdu}^{ijklh}, \alpha_{hT_l}^{ijkl} \to \alpha_{uT_d}^{ijkd} : \Delta v_{ijklh}^{ijkdu}$$

Функции переходов

$$\delta_{hT_l}^{ijkl} : S_{hT_l}^{ijkl} \times X_{hT_l}^{ijkl} \to S_{hT_l}^{ijkl}$$

и *выходов*

$$\lambda_{hT_l}^{ijkl} : S_{hT_l}^{ijkl} \times X_{hT_l}^{ijkl} \to Y_{hT_l}^{ijkl}$$

автомата $a_{hT_l}^{ijkl}$ реализованы на базе знаний $\text{،}_{hT_lv}^{ijkl}$, представленных *продукциями* вида:

$$\text{،}_{hT_lv}^{ijkl} = \langle P_{hT_lv}^{ijkl}, L_{hT_lv}^{ijkl} \Rightarrow Y_{hT_lv}^{ijkl}, Q_{hT_lv}^{ijkl} \rangle, L_{hT_lv}^{ijkl} = \bigwedge_{q=1}^{q^{\mathbf{max}}} l_{hT_lvq}^{ijkl},$$

где $P_{hT_lv}^{ijkl}$ – предусловия, $L_{hT_lv}^{ijkl} \Rightarrow Y_{hT_lv}^{ijkl}$ – ядро, $L_{hT_lv}^{ijkl}$ – *антецедентная часть*, $Y_{hT_lv}^{ijkl}$ – *консеквентная* часть, $Q_{hT_lv}^{ijkl}$ – постусловие. Продукции $\text{،}_{hT_lv}^{ijkl}$ составляют базу знаний $\text{،}_{hT_l}^{ijkl}$ актора $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$.

С целью описания нейрокогнитивных архитектур введем в рассмотрение т.н. *мультиагентные функции и пространства*, задающие отображения между множествами состояний агентов. Переопределим введенные в [4] ע-функции (айн-функции).

$\mathfrak{Y}$-*функция* – это отображение:

$$\mathfrak{Y}\colon Y_{T_d}^{ijkd} \to Y_{T_l}^{ijkl}, \forall y_{T_d c}^{ijkd} \in \begin{Bmatrix} \langle y_{1T_d v_c^1}^{ijkd}, y_{2T_d v_c^2}^{ijkd}, \dots, y_{u^{\mathbf{max}} T_d v_c^{u\mathbf{max}}}^{ijkd} \rangle \,|c = \overline{1, c^{\mathbf{max}}}, \\ \exists u, \exists v_c^u, \alpha_{uT_d}^{ijkd} \to \alpha_{hT_l}^{ijkl} \colon y_{uT_d v_c^u}^{ijkd}, y_{uT_d v_c^u}^{ijkd} \neq \emptyset \end{Bmatrix},$$

$$\exists y_{T_l c}^{ijkl} \in \left\{ \langle y_{1T_l v_c^1}^{ijkl}, y_{2T_l v_c^2}^{ijkl}, \dots, y_{h^{\mathbf{max}} T_l v_c^{h\mathbf{max}}}^{ijkl} \rangle \,|c = \overline{1, c^{\mathbf{max}}} \right\},$$

$$\exists \alpha_{hT_l}^{ijkl}, \exists \, {}^{ijkl}_{hT_l v_c^h}, L_{hT_l v}^{ijkl} = .\text{Истина.}, y_{hT_l v_c^h}^{ijkl} = \lambda_{hT_l}^{ijkl}\left(s_{hT_l c}^{ijkl}, y_{uT_d v_c^u}^{ijkd}\right), c^{\mathbf{max}} = \prod_{u=1}^{u^{\mathbf{max}}} v_c^{u\mathbf{max}}, v_c^{u\mathbf{max}} = \left|Y_{uT_d}^{ijkd}\right|,$$

где $Y_{T_d}^{ijkd} = \cup_{u=1}^{u^{\mathbf{max}}} Y_{uT_d}^{ijkd}, Y_{T_l}^{ijkl} = \cup_{h=1}^{h^{\mathbf{max}}} Y_{hT_l}^{ijkl}$ – выходные языки акторов $\alpha_{uT_d}^{ijkd} \in K_{dT_d}^{ijk}$, $\alpha_{hT_l}^{ijkl} \in K_{lT_l}^{ijk}$.

Допустим также запись:

$$y_{T_{(j+1)}(j+1)}^{i} = \mathfrak{Y}\left(y_{T_j j}^{i}\right), K_{T_{(j+1)}}^{i} = \mathfrak{Y}\left(K_{T_j}^{i}\right), Y_{T_{(j+1)}}^{i} = \mathfrak{Y}_{K_{T_{(j+1)}}^{i}}^{K_{T_j}^{i}}\left(Y_{T_j}^{i}\right), Y_{T_{(j+1)}}^{i} = \mathfrak{Y}_{K_{T_{(j+1)}}^{i}}^{K_{T_j}^{i}}\left(Y_{T_j}^{i}\right).$$

Определим *хор* айн-функции $Y_{(j+1),T_{j+1}}^{i} = \mathfrak{Y}_{\chi_{jT_j}^{i}}^{\chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i}}\left(Y_{jT_j}^{i}\right)$ как множество акторов:

$$\chi_{jT_j}^{i} = \left\{ a_{uT_j}^{ij} \mid a_{hT_j}^{ij} \to a_{hT_{j+1}}^{ij+1} \colon m_{ijuT_j}^{i,(j+1),hT_{j+1}} \in Y_{jT_j}^{i} \right\}$$

и *аудиторию* – множество акторов:

$$\chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i} = \left\{ a_{hT_{j+1}}^{ij+1} \mid a_{hT_j}^{ij} \to a_{hT_{j+1}}^{ij+1} \colon m_{ijuT_j}^{i,(j+1),hT_{j+1}} \in Y_{jT_j}^{i} \right\}.$$

Определим *функцию нейрогенеза*:

$$\varphi_{hT_l c}^{ijkl(c+1)} \colon Y_{T_d c}^{ijkd} \to \chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i}, \forall Y_{T_d c}^{ijkd} \in K_{T_{(j+1)}c}^{i}, Y_{(j+1),T_{j+1}}^{i} = \mathfrak{Y}_{\chi_{jT_j}^{i}}^{\chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i}}\left(Y_{jT_j}^{i}\right):$$

$$\nexists \chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i} \in K_{T_{(j+1)}c}^{i} \Rightarrow K_{T_{(j+1)},(c+1)}^{i} = K_{T_{(j+1)}c}^{i} \cup \chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i},$$

где $K_{T_{(j+1)}c}^{i}$ и $K_{T_{(j+1)},(c+1)}^{i}$ – когнитоны на c-м и $c+1$-м шагах времени.

В силу того, что такая функция создает в когнитоне $K_{T_{(j+1)}}^{i}$ акторов хора $\chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i}$, необходимых для айн-отображения $Y_{(j+1),T_{j+1}}^{i} = \mathfrak{Y}_{\chi_{jT_j}^{i}}^{\chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i}}\left(Y_{jT_j}^{i}\right)$, запишем:

$$\chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i} = \varphi_{hT_l}^{ijkl}\left(Y_{T_d c}^{ijkd}\right), \varphi_{hT_l}^{ijkl} \uparrow \chi_{(j+1),T_{j+1}}^{i}\left(Y_{T_d}^{ijkd}\right).$$

Определим *мультиагентное пространство* как множество:

$$\vec{\mathfrak{R}} = \begin{Bmatrix} p_q\left(Y_q\right) \mid Y_q = \left(y_{1a^1}^{q}, y_{2a^2}^{q}, \dots, y_{na^n}^{q}\right), \\ \forall u, \forall a^u \colon y_{ua^u}^{q} \in \mathfrak{r}_u = \{y_{u1}, y_{u2}, \dots, y_{ua^{u\mathbf{max}}}\}, \\ \exists p_v(Y_v) \in \vec{\mathfrak{R}}, Y_v = \mathfrak{Y}\left(Y_q\right) \end{Bmatrix},$$

где $Y_q = \left(y_{1a^1}^{q}, y_{2a^2}^{q}, \dots, y_{na^n}^{q}\right)$ – *мультиагентные координаты точки* $p_q\left(Y_q\right)$, множества $\mathfrak{r}_u$ – *мультиагентные оси*, n – *размерность*, $Y_v = \mathfrak{Y}\left(Y_q\right)$ – *мультиагентная метрика* пространства $\vec{\mathfrak{R}}$.

Зададим *протокол мультиагентного взаимодействия* $\overleftrightarrow{\pi}^{o}\left(a_{hT_l}^{ijkl}, a_{uT_d}^{ijkd}\right)$ акторов $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$ и $\alpha_{uT_l}^{ijkd}$ как упорядоченное множество взаимосвязанных состояний и выходов этих акторов. Определим *диалог* $\overleftrightarrow{\pi}^{o}.\sigma\left(a_{uT_d}^{ijkd}, a_{hT_l}^{ijkl}\right)$ как последовательность выходов автоматов $a_{uT_d}^{ijkd}$ и $a_{hT_l}^{ijkl}$, *мультиагентный автомат* $\overleftrightarrow{a}\left(a_{uT_d}^{ijkd}, a_{hT_l}^{ijkl}\right)$ как композицию этих автоматов, *реплики* $y_{hT_l vg\tau_c}^{ijklo} = \left(\alpha_{uT_d\tau_c}^{ijkd}, m_{ijklhvg\tau_c}^{ijkduo}, \Delta v_{ijklhvg\tau_c}^{ijkduo}\right)$ как выходы *автомата* $a_{hT_l}^{ijkl}$ в диалоге $\overleftrightarrow{\pi}^{o}.\sigma\left(a_{uT_d}^{ijkd}, a_{hT_l}^{ijkl}\right)$, направленных автомату $a_{uT_d}^{ijkd}$, и *мультиреплики* $Y_{T_d}^{ijkd}$ как множества реплик $y_{hT_l vg\tau_c}^{ijklo}$.

Определим пресинаптическую терминаль актора $\alpha_{uT_d}^{ijkd}$ как пару:

$$\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh} = \left(P_{ijkdu}^{\xi ijklh}, F_{ijkdu}^{\xi ijklh}\right), P_{ijkdu}^{\xi ijklh} = \left(\alpha_{hT_l}^{\xi ijkl}, m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}, \Delta v_{ijklh}^{\xi ijkdu\Theta}, \beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}, \beta_{ijkdu}^{\xi ijklhT}, \beta_{ijkdu}^{\xi ijklhF}\right),$$

$$F_{ijkdu}^{\xi ijklh} = \left(\beta^{\xi}\left(\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}\right), \mu^{\xi}\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd}, \alpha_{hT_l}^{\xi ijkl}\right)\right),$$

где $P_{ijkdu}^{\xi ijklh}$ – это *объектная часть пресинаптической терминали*, $F_{ijkdu}^{\xi ijklh}$ *– функциональная часть пресинаптической терминали*, $\alpha_{hT_l}^{\xi ijkl}$ *– контрагент* (*актор-покупатель*) актора-продавца $\alpha_{uT_d}^{ijkd}$ по данному синапсу, $m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}$ *– тематическое нейромедиаторное сообщение синапса*, $\Delta v_{ijklh}^{\xi ijkdu\Theta}$ *– ноотропное вознаграждение* (*стоимость*) *тематического нейромедиаторного сообщения пресинаптической терминали*, $\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}$ *– коэффициент корреляции*, характеризующий пропускную способность (проводимость сигналов) пресинаптической терминали, $\beta_{ijkdu}^{\xi ijklhT}$ *– порог доверия аксона*, определяющий минимальное значение коэффициента корреляции $\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}$, при котором синапс сохраняет проводимость, $\beta_{ijkdu}^{\xi ijklhF}$ *– порог разрушения* (*забывания*) *аксона*, характеризующий значение коэффициента корреляции $\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}$, при котором синапс с участием пресинаптической терминали $\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}$ разрушается (на стороне аксона).

Коэффициент корреляции аксонной (*пресинаптической*) *терминали* вычисляется с помощью *функции корреляции пресинаптической терминали* (*функция корреляции аксона*):

$$\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh} = \beta^{\xi}\left(\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}\right) = \beta^{\xi}\left(\alpha_{uT_d}^{\xi ijkd}, \alpha_{hT_l}^{\xi ijkl}\right) = \frac{n^{m}\left(\Delta v_{ijklh}^{\xi ijkdu\Theta}\right)}{n\left(m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}\right)} \in [0,1],$$

где $n\left(m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}\right)$ – количество раз, когда актор $\alpha_{uT_d}^{ijkd}$ отправляет актору $\alpha_{hT_l}^{\xi ijkl}$ тематические нейромедиаторные сообщения $m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}$ пресинаптической терминали $\varsigma_{uT_dq}^{\xi ijkd}$, а $n\left(\Delta v_{ijklh}^{\xi ijkdu\Theta}\right)$ – количество раз, когда в ответ на это сообщение актор $\alpha_{hT_l}^{\xi ijkl}$, выполняя свою часть синаптического контракта, до истечения времени жизни этого сообщения $\Delta\tau^{L}\left(m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}\right)$ отправляет (оплачивает) актору $\alpha_{uT_d}^{ijkd}$ порцию ноотропа $\Delta v_{ijklh}^{\xi ijkdu\Theta}$:

$$n\left(m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}\right) = n\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd} \to \alpha_{hT_l}^{\xi ijkl} : m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta}\right),$$

$$n^{m}\left(\Delta v_{ijklh}^{\xi ijkdu\Theta}\right) = n\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd} \to \alpha_{hT_l}^{ijkl} : m_{ijkdu}^{\xi ijklh\Theta} \Rightarrow \alpha_{hT_l}^{ijkl} \to \alpha_{uT_d}^{ijkd} : \Delta v_{ijklh}^{\xi ijkdu\Theta}\right).$$

На основании значения коэффициента корреляции актор-продавец принимает решение о том, должен ли он отправлять информацию актору-покупателю. Для учета этого коэффициента используется *функция доверия пресинаптической терминали актора* (*функция доверия аксона*):

$$\mu^{\xi}\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd},\alpha_{hT_l}^{ijkl}\right)=\mu^{\xi}\left(\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}\right)=\begin{cases}.\text{ИСТИНА.},\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}\geq\beta_{ijkdu}^{\xi ijklhT}\\ .\text{ЛОЖЬ.},\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}<\beta_{ijkdu}^{\xi ijklhT}\end{cases},$$

$$\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}\in[0,1],\beta_{ijkdu}^{\xi ijklhT}\in[0,1].$$

Так как актор $\alpha_{uT_d}^{ijkd}$ может образовывать множество *синаптических соединений*, для их описания определим *множество пресинаптических терминалей на аксоне* актора: $\Sigma^{\xi}\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd}\right)=\left\{\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}\right\}$.

По аналогии определим *постсинаптическую терминаль* $\varsigma_{ijklhT_lw}^{\Delta ijkdu}$ актора $\alpha_{hT_d}^{ijkdl}$, описывающие ее коэффициенты и функции, *множество постсинаптических терминалей* актора $\Sigma^{\delta}\left(\alpha_{hT_l}^{ijkl}\right)=\left\{\varsigma_{ijklhT_lw}^{\delta ijkdu}\right\}$.

Определим *синапс акторов* $\alpha_{uT_d}^{ijkd}$ *и* $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$ (*синаптический контракт*):

$$\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi\delta ijkhlT_lw}=\left(\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh},\varsigma_{ijklhT_lw}^{\delta ijkdu},\overrightarrow{\pi}^{\varsigma}\left(a_{uT_d}^{ijkd},a_{hT_l}^{ijkl}\right),\overrightarrow{\pi}^{\zeta}\left(a_{uT_d}^{ijkd},a_{hT_l}^{ijkl}\right)\right),$$

где $\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}$ – пресинаптическая терминаль, $\varsigma_{ijklhT_lw}^{\Delta ijkdu}$ – постсинаптическая терминаль, $\overrightarrow{\pi}^{\varsigma}\left(a_{uT_d}^{ijkd},a_{hT_l}^{ijkl}\right)$ – *протокол формирования синапса*, $\overrightarrow{\pi}^{\zeta}\left(a_{uT_d}^{ijkd},a_{hT_l}^{ijkl}\right)$ – *протокол изменения аксо-дендрональной связи в синапсе.*

Определим *нейрокогнитивное отображение* (*н-отображение*), или *нейрокогнитивную функцию* (*н-функцию*), между двумя акторами $\alpha_{uT_d}^{ijkd}$ и $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$ как отображение:

$$\text{н}\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd},\alpha_{hT_l}^{ijkl}\right):y_{uT_d}^{ijkd}\to y_{hT_l}^{ijkl},\forall y_{uT_dc}^{ijkd}\in y_{uT_d}^{ijkd},\forall y_{hT_lc}^{ijkl}\in y_{hT_l}^{ijkl},y_{hT_lc}^{ijkl}=\text{н}_{\alpha_{uT_d}^{ijkd}}^{\alpha_{hT_l}^{ijkl}}\left(y_{uT_dc}^{ijkd}\right),$$

$$\alpha_{uT_d}^{ijkd}\in P_{ijklh}^{\delta ijkdu}\in\varsigma_{ijkduT_dw}^{\delta ijklh},\alpha_{hT_l}^{ijkl}\in P_{ijkdu}^{\xi ijklh}\in\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh},$$

$$\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}\in\Sigma^{\xi}\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd}\right),\varsigma_{ijkduT_dw}^{\delta ijklh}\in\Sigma^{\delta}\left(\alpha_{hT_l}^{ijkl}\right),\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}\in\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi\delta ijkhlT_lw},$$

$$\varsigma_{ijkduT_dw}^{\delta ijklh}\in\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi\delta ijkhlT_lw},$$

$$\mu^{\xi}\left(\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}\right)=.\text{ИСТИНА.},\mu^{\delta}\left(\beta_{ijklh}^{\delta ijkdu}\right)=.\text{ИСТИНА.},$$

$$\mu^{\xi}\left(\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}\right)\in F_{ijkdu}^{\xi ijklh}\in\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh},\mu^{\delta}\left(\beta_{ijklh}^{\delta ijkdu}\right)\in F_{ijklh}^{\delta ijkdu}\in\varsigma_{ijkduT_dw}^{\delta ijklh},$$

$$\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}=\beta^{\xi}\left(\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}\right)\in F_{ijkdu}^{\xi ijklh},\beta_{ijklh}^{\delta ijkdu}=\beta^{\delta}\left(\varsigma_{ijklhT_lw}^{ijkdu}\right)\in F_{ijklh}^{\delta ijkdu}$$

Будем использовать также варианты записи:

$$y_{hT_lc}^{ijkl}=\text{н}\left(y_{uT_dc}^{ijkd}\right),\alpha_{hT_l}^{ijkl}=\text{н}\left(\alpha_{uT_d}^{ijkd}\right),y_{hT_lc}^{ijkl}=\text{н}_{\alpha_{uT_d}^{ijkd}}^{\alpha_{hT_l}^{ijkl}}\left(y_{uT_dc}^{ijkd}\right).$$

Определим *дендрос* $\Delta_{hT_l}^{ijkl}$ актора $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$ как множество синапсов $\Delta_{hT_l}^{ijkl}$, в которых актор $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$ участвует с помощью своих постсинаптических терминалей:

$$\Delta_{hT_l}^{ijkl}=\left\{\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi\delta ijkhlT_lw},\forall\varsigma_{ijkduT_dq}^{\xi ijklh}\in\Sigma^{\delta}\left(\alpha_{hT_l}^{ijkl}\right)\right\}.$$

Определим *функции активации* $\psi(\alpha_{hT_l}^{ijkl})$ *актора* $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$:

$$\psi(\alpha_{hT_l}^{ijkl}): y_{T_dc}^{ijkd} \to y_{T_lc}^{ijkl}, \forall y_{uT_dc}^{ijkd} \in y_{T_dc}^{ijkd}, y_{uT_dc}^{ijkd} \in \Delta_{hT_l}^{ijkl}, \forall y_{hT_lc}^{ijkl} \in y_{T_lc}^{ijkl}:$$

$$\psi(\alpha_{hT_l}^{ijkl}) = \begin{cases} .\text{ИСТИНА}., \eta_{ijkdu}^{ijklh} \geq \eta_{ijkdu}^{ijklhT}, \eta_{ijkdu}^{ijklh} \in [0,1] \\ .\text{ЛОЖЬ}., \eta_{ijkdu}^{ijklh} < \eta_{ijkdu}^{ijklhT} \in [0,1] \end{cases},$$

$$\eta_{ijkdu}^{ijklh} = \frac{n^b(\Delta_{hT_l}^{ijkl})}{n\left(\Delta_{hT_l}^{ijkl}\right)} \in [0,1], n^b(\Delta_{hT_l}^{ijkl}) =$$

$$= \left|\left\{\alpha_{uT_d}^{ijkd} \in \Delta_{hT_l}^{ijkl}, \mu^{\xi}\left(\beta_{ijkdu}^{\xi ijklh}\right) =. \text{ИСТИНА}., \mu^{\delta}(\beta_{ijklh}^{\delta ijkdu}) =. \text{ИСТИНА}.\right\}\right|,$$

$$n(\Delta_{hT_l}^{ijkl}) = \left|\Delta_{hT_l}^{ijkl}\right|.$$

Здесь η_{ijkdu}^{ijklh} *– коэффициент активации* актора, а η_{ijkdu}^{ijklhT} *– порог активации актора*. Эти коэффициенты задают количество активных синапсов, входящих в дендрос актора $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$, срабатывание которых приводит к формированию и отправке тематического сообщения актора.

Зададим н-отображение для случая акторкогнитонов $K_{dT_d}^{ijk}$ и $K_{lT_l}^{ijk}$:

$$\text{н}(K_{dT_d}^{ijk}, K_{lT_l}^{ijk}): Y_{T_d}^{ijkd} \to Y_{T_l}^{ijkl}, \forall y_{T_dc}^{ijkd} \in Y_{T_d}^{ijkd}, \forall y_{T_lc}^{ijkl} \in Y_{T_l}^{ijkl}, \forall \alpha_{hT_l}^{ijkl} \in y_{hT_lc}^{ijkl} \in y_{T_lc}^{ijkl},$$

$$\psi(\alpha_{hT_l}^{ijkl}) =. \text{ИСТИНА}., y_{T_lc}^{ijkl} = \left\{\bigcup y_{hT_lc}^{ijkl}, y_{hT_lc}^{ijkl} = \text{н}(y_{uT_dc}^{ijkd})\right\}.$$

Будем использовать также запись: $Y_{T_l}^{ijkl} = \text{н}_{K_{dT_d}^{ijk}}^{K_{lT_l}^{ijk}}(Y_{T_d}^{ijkd})$.

С помощью введенных н-функций можно формально задать нейрокогнитивные архитектуры и описать процессы передачи сообщений между агентами в их составе.

Заключение

Разработан формальный аппарат для описания мультиагентных нейрокогнитивных архитектур и процессов ситуативно-обусловленного роста и деградации ассоциативных связей в них, инспирированных процессами роста и деградации аксо-дендрональных связей в головном мозге человека.

Впервые введены понятия и даны формальные определения мультиагентных пространств, координат, осей, метрик, протоколов, диалогов, реплик и мультиреплик, функций нейрогенеза, пресинаптических и постсинаптически терминалей, коэффициентов корреляции и доверия, функций активации и доверия, синапсов, необходимые для записи и исчисления контрактов между акторами в составе когнитивных архитектур агнейронов.

Впервые введены нейрокогнитивные функции (отображения), описывающие процессы онтонейроморфогенеза в нейрокогнитивных архитектурах интеллектуальных агентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 235 с.

2. *Нагоев З. В.* Онтонейроморфогенетическое моделирование // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 4(54). С. 56–63.

3. *Абазоков М. А., Анчеков М. И., Бжихатлов К. Ч., Курашев Ж. Х., Нагоев З. В., Нагоева О. В., Унагасов А. А., Хамов А. А.* Анализ вычислительной трудоемкости федеративных алгоритмов нейрокогнитивного управления имитационными феногенетическими моделями растений (метаданные) // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. № 5(121). С. 107–128.

4. *Нагоев З. В.* Мультиагентные экзистенциальные отображения и функции // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 4(54). С. 64–71.

REFERENCES

1. Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intellectics, or Thinking in Living and Artificial Systems]. Nalchik: Publishing House of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013. 235 p. (In Russian)

2. Nagoev Z.V. Ontoneuromorphogenetic modeling. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 4(54). Pp. 56–63. (In Russian)

3. Abazokov M.A., Anchekov M.I., Bzhikhatlov K.Ch., Kurashev Zh.Kh., Nagoev Z.V., Nagoeva O.V., Unagasov A.A., Khamov A.A. Analysis of the Computational Complexity of Federation Algorithms for Neurocognitive Control of Simulation Phenogenetic Models of Plants (Metadata). *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. No. 5(121). Pp. 107–128. (In Russian)

4. Nagoev Z. V. Multi-agent existential mappings and functions. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 4(54). Pp. 64–71. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Нагоев Залимхан Вячеславович, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

вед. науч. сотр., Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823, SPIN-код: 6279-5857

Information about the author

Zalimkhan V. Nagoev, Candidate of Engineering Sciences, General Director of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

Leading Researcher, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823, SPIN-code: 6279-5857

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 004.89 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-197-207
EDN: LJLDER

Универсальная экспертная система на базе онтоэписоциофилогенетического обучения федераций интеллектуальных нейрокогнитивных агентов

З. В. Нагоев[1], М. И. Анчёков[1], Ж. Х. Курашев[1], О. В. Нагоева✉[2], И. А. Пшенокова[1], А. А. Хамов[1]

[1]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2
[2]Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. Работа посвящена решению научной проблемы разработки концептуального обоснования возможности автономного обучения интеллектуальных экспертных систем на основе онтоэписоциофилогенетического обучения нейрокогнитивных агентов. Цель исследования состоит в разработке основных принципов создания универсальных экспертных систем на базе онтоэписоциофилогенетического обучения федеративных интеллектуальных нейрокогнитивных агентов. Разработаны основные принципы онтоэписоциофилогенетического обучения универсальных федеративных экспертных систем. Показано, что функциональная специализация интеллектуальных агентов в составе федерации при условии их кооперации с целью максимизации совокупного приращения значений целевых функций позволяет преодолеть ограничения по эффективности. Обосновано применение эпигенетических алгоритмов для закрепления в поколениях эволюционной оптимизации онтологических знаний интеллектуальных агентов в составе федерации. Обоснована возможность построения многопоколенных популяций с целью повышения общей эффективности универсальной экспертной федеративной системы.

Ключевые слова: искусственный интеллект, мультиагентные системы, нейрокогнитивные архитектуры, онтоэписоциофилогенетические алгоритмы, машинное обучение, универсальные экспертные системы

Поступила 28.11.2024, одобрена после рецензирования 09.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Нагоев З. В., Анчёков М. И., Курашев Ж. Х., Нагоева О. В., Пшенокова И. А., Хамов А. А. Универсальная экспертная система на базе онтоэписоциофилогенетического обучения федераций интеллектуальных нейрокогнитивных агентов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 197–207. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-197-207

© Нагоев З. В., Анчёков М. И., Курашев Ж. Х., Нагоева О. В., Пшенокова И. А., Хамов А. А., 2024

MSC: 68T42 Original article

Universal expert system based on ontoepisosociophylogenetic training of federations of intelligent neurocognitive agents

Z.V. Nagoev[1], M.I. Anchekov[1], Zh.Kh. Kurashev[1], O.V. Nagoeva✉[2], I.A. Pshenokova[1], A.A. Khamov[1]

[1]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street
[2]Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Abstract. The work is devoted to solve a scientific problem of developing a conceptual justification for the possibility of autonomous training of intelligent expert systems based on ontoepisociophylogenetic training of neurocognitive agents. The aim of the study is to develop basic principles of creating universal expert systems based on ontoepisociophylogenetic training of federated intelligent neurocognitive agents. The basic principles of ontoepisociophylogenetic training of universal federated expert systems have been developed. It is shown that the functional specialization of intelligent agents within a federation, subject to their cooperation in order to maximize the combined increment of the values of the target functions, allows overcoming efficiency limitations. The use of epigenetic algorithms for fixing ontological knowledge of intelligent agents within a federation in generations of evolutionary optimization is substantiated. The possibility of constructing multi-generational populations in order to increase the overall efficiency of a universal expert federated system is substantiated.

Keywords: artificial intelligence, multi-agent systems, neurocognitive architectures, ontoepisociophylogenetic algorithms, machine learning, universal expert systems

Submitted 28.11.2024, approved after reviewing 09.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Nagoev Z.V., Anchekov M.I., Kurashev Zh.Kh., Nagoeva O.V., Pshenokova I.A., Khamov A.A. Universal expert system based on ontoepisosociophylogenetic training of federations of intelligent neurocognitive agents. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 197–207. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-197-207

Введение

В [1] разработаны основные принципы онтоэписоциофилогенетического обучения интеллектуальных агентов на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Показано, что такие алгоритмы являются составными (включающими в себя подмножества алгоритмов различных типов) и обладают наибольшей степенью структурного соответствия алгоритмам обучения естественных интеллектуальных социальных агентов в реальной среде. В частности, онтологические алгоритмы определяют содержание и формы обучения интеллектуальных программных агентов в процессе их индивидуального развития (в процессе «жизни» таких агентов). Эпигенетические алгоритмы задают множественные межпоколенные обратные связи от объектов и контрагентов в реальной среде. Социальные (социоонтологические) алгоритмы детерминированы практикой коммуникации в составе социального коллектива (например, человеко-машинного коллектива) с использованием всех доступных разнообразных форм коммуникации. Филогенетические алгоритмы основаны на применении методологии эволюционного программирования для организации многопоколенной оптимизации интеллектуальных агентов.

Как показано в процитированных работах, возможность конструктивного объединения всех этих типов алгоритмов в составе единого онтоэписоциофилогенетического алгоритма

(*ОЭСФГ-алгоритма*) возникает в связи с рассмотрением мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры в качестве основы метафоры проектирования системы управления агента универсального искусственного интеллекта. Такая нейрокогнитивная архитектура, представляющая собой множество нейрокогнитивных узлов обработки информации (т.н. нейрокогнитонов) различной специализации, упорядоченное взаимодействие которых реализует алгоритм управления поведением интеллектуального агента, направленным на решение проблем универсального спектра в системе «интеллектуальный агент – реальная среда», динамически изменяет свой состав и топологию связей структурно-функциональных элементов в своем составе (рис. 1). На рисунке 1 агнейроны различных типов, находящиеся в разных нейрокогнитонах, реализующие различные функции, представлены двумерными пиктограммами со сплошным контуром. Сообщения (символьные токены), с помощью которых агнейроны координируют согласованное поведение, представлены на рисунке в овалах, оконтуренных пунктирной линией.

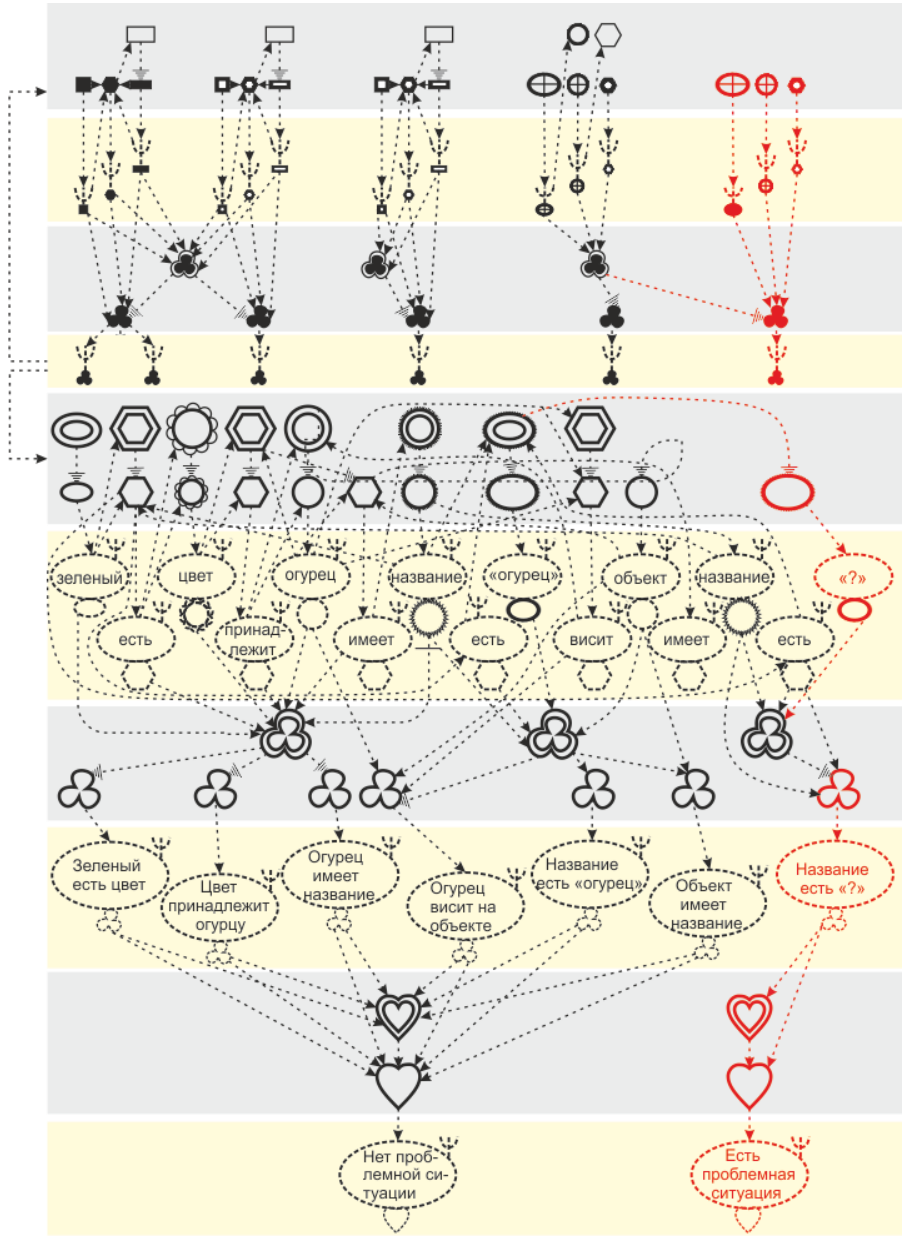


Рис. 1. *Фрагмент управляющей мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента*

Fig. 1. *Fragment of the controling multi-agent neurocognitive architecture of an intelligent agent*

Эти изменения детерминированы на всех четырех уровнях рассмотрения ОЭСФГ-алгоритмов обучения, так как, во-первых, у интеллектуального агента есть генотип (рис. 2), состоящий из геномов агентов-нейронов (агнейронов) – программных агентов, рассматриваемых в качестве имитационных моделей нейронов головного мозга [2]. Генотип используется средой имитационного моделирования для реализации алгоритмов синтеза и развития самой управляющей мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента и для описания его общей структуры и функциональности.

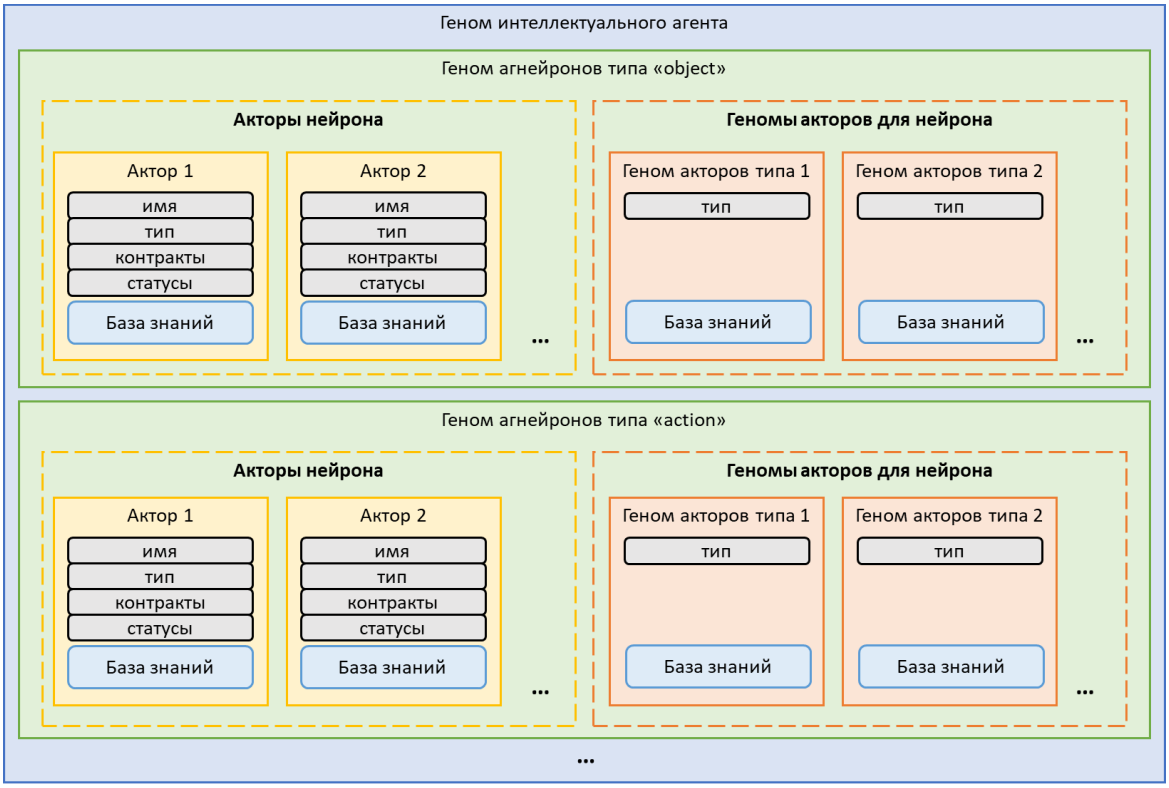


Рис. 2. *Примерная структура генотипа нейрокогнитивного агента*

Fig. 2. *Approximate structure of the genotype of a neurocognitive agent*

Во-вторых, сам интеллектуальный агент представляет собой т.н. систему искусственной жизни (Artificial Life), основанную на некоторой имитационной модели условной экзистенции, что по определению задает для него периодизацию, сущность и формы онтологического развития и позволяет рассматривать время и гомеостатические границы его «жизни» в качестве соответственно периода и условий реализации функционального назначения.

В-третьих, нейрокогнитивная архитектура интеллектуального агента развивается на основе т.н. алгоритма онтонейроморфогенеза [3], связывающего филогенетические процессы ее роста и развития с ситуациями (системно значимыми состояниями), через которые проходит этот агент в процессе синтеза и реализации управления своим поведением в реальной среде, что, соответственно, позволяет идентифицировать эпигенетические факторы и строить в этой нейрокогнитивной архитектуре их функциональные репрезентации.

В-четвертых, агент универсального искусственного интеллекта под управлением нейрокогнитивной архитектуры в целом позиционируется как часть некоторого человеко-машинного коллектива, в составе которого он выполняет поведение, согласованное с другими интеллектуальными агентами на основе обмена высказываниями на подмножестве естественного языка, ограниченном семантикой конкретной предметной области.

Таким образом, интеллектуальные программные агенты под управлением мультиагентных нейрокогнитивных архитектур гипотетически могут образовывать сообщества, в которых реализуются все типы алгоритмов обучения, применяемые для обучения в сообществах естественных агентов универсального искусственного интеллекта.

Кроме того, на базе таких систем также может быть реализован и уникальный тип обучения – т.н. федеративное обучение [4], которое естественным интеллектуальным агентам доступно только в форме, опосредованной некоторым промежуточным носителем информации. Такая комплексность и эффективность алгоритмов обучения делает федеративные сообщества нейрокогнитивных онтоэписоциофилогенетических агентов универсального искусственного интеллекта весьма привлекательной метафорой проектирования экспертных систем, в которых трудоемкие дорогостоящие процедуры формализации, синтеза и актуализации экспертных знаний, выполняемые в «ручном режиме», заменяются на алгоритмы автоматического извлечения и пополнения.

Основная *научная проблема*, решению которой посвящена настоящая работа, заключается в необходимости разработки концептуального обоснования возможности автономного обучения интеллектуальных экспертных систем на основе онтоэписоциофилогенетического обучения нейрокогнитивных агентов.

Актуальность работы определяется требованиями разработки платформенных решений интеллектуальных экспертных систем на основе самообучающихся программных агентов в составе человеко-машинных коллективов универсальной направленности.

Цель исследования состоит в разработке основных принципов создания универсальных экспертных систем на базе онтоэписоциофилогенетического обучения федеративных интеллектуальных нейрокогнитивных агентов.

Основной *задачей* исследования является разработка алгоритма онтоэписоциофилогенетического обучения федераций интеллектуальных нейрокогнитивных агентов.

1. Проблема организации обучения федераций нейрокогнитивных агентов универсального искусственного интеллекта

Под *рациональным программным агентом* в данной работе понимается программный агент, интегрированный в реальную среду с помощью системы многомодальных сенсоров и эффекторов и способный в автономном режиме синтезировать управление своим поведением, направленным на обеспечение построения траектории в пространстве состояний системы «агент – среда», доставляющей максимум сложной целевой функции (функции энергии) этого агента при движении от последовательности состояний (ситуация), приводящей к потере энергии (проблема, проблемная ситуация), к ситуации, в которой энергия не уменьшается либо прибавляется.

Множество, равное прямому произведению всех значений сигналов всех сенсоров и всех состояний всех сенсоров агента, назовем *пространством поведения* этого агента.

Агентом универсального искусственного интеллекта (УИИ) назовем рационального программного агента, способного самостоятельно идентифицировать, онтологизировать и строить решения проблемных ситуаций. В общем случае алгоритмы идентификации, онтологизации и синтеза решения представляют собой траектории в пространстве поведения интеллектуального агента.

Агент УИИ под управлением нейрокогнитивной архитектуры реализует синтез траектории в пространстве поведения с помощью т.н. инварианта нейрокогнитивной архитектуры [3], определяющего ее на основе проактивного выбора, субоптимального по критерию целевой функции интеллектуального агента (рис. 3).

Рис. 3. *Инвариант нейрокогнитивной архитектуры принятия решений*

Fig. 3. *Invariant of a neurocognitive architecture of decision making*

Агнейроны в составе функциональных узлов нейрокогнитивной архитектуры кооперируются друг с другом на основе обмена энергии, которой они располагают, на информацию, в которой они нуждаются для синтеза своих локальных траекторий движения в локальных пространствах поведения и которой обладают контрагенты. Возможность ситуативно обусловленного синтеза и деградации устойчивых связей подобного рода (т.н. нейрокогнитивных контрактов, контрактов) [3] лежит в основе алгоритма онтонейроморфогенеза – онтологического алгоритма обучения интеллектуальных агентов.

Применение таких алгоритмов для перманентного обучения интеллектуальных агентов в процессе имитации индивидуального развития в реальной коммуникативной среде позволило сформулировать концепцию и разработать методы и алгоритмы освоения и использования такими агентами элементов естественного языка из подмножества, ограниченного конкретной предметной областью [5].

В [4] предложены основные принципы создания федеративных систем (*федераций*), состоящих из интеллектуальных агентов, построенных на основе метафоры проектирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. В частности, показано, что возможность прямого обмена знаниями, синтезированными такими агентами на основе алгоритмов онтологического обучения, многократно увеличивает скорость обучения этих агентов.

Однако, как показано в [6], интеллектуальные агенты выполняют на параллельных вычислителях (для реализации с помощью которых они и предназначены) основные алгоритмы синтеза траекторий в пространстве поведения за линейное время только в случае, когда установлены и действую ограничения в размере памяти, необходимой для размещения агнейронов в составе быстро растущих нейрокогнитивных архитектур. В противном случае время выполнения этих алгоритмов становится экспоненциальным, что радикально снижает применимость нейрокогнитивных интеллектуальных агентов для решения реальных задач.

Таким образом, требования фиксированного размера памяти для размещения активных элементов нейрокогнитивных архитектур существенным образом ограничивают эффективность федераций, состоящих из интеллектуальных агентов, построенных на их основе, так

как основное преимущество таких федераций, состоящее в производительной унификации знаний агентов, нивелируется невозможностью обеспечения применения этих знаний в режиме реального времени в силу высокой алгоритмической трудоемкости.

По нашему мнению, применение онтоэписоциофилогенетических алгоритмов для организации обучения интеллектуальных агентов в составе федераций может составить основу решения этой проблемы, так как создает условия для сохранения вариативности и применимости общего состава знаний (*ноома*) интеллектуальных агентов федерации при одновременном снижении емкости памяти, требуемой для размещения элементов управляющих нейрокогнитивных архитектур, кодирующих знания отдельных интеллектуальных агентов на основе тематической специализации.

Следует отметить, что переход к подобным федерациям, фокусирующимся на алгоритмах автономного формирования функциональных систем (по Анохину), обеспечивающих узкую тематическую («профессиональную») специализацию интеллектуальных агентов, и методах поддержки кооперации этих агентов в интересах делегирования полномочий принятия решения от лица всего коллектива мультиагентной федерации, в значительной степени углубляет аналогию между искусственными интеллектуальными агентами на базе нейрокогнитивных архитектур и естественными интеллектуальными агентами, так как воспроизводит основные принципы процессов накопления и использования знаний в социальных объединениях, состоящих из таких интеллектуальных агентов.

Для таких федераций интеллектуальных агентов универсализм – это не вопрос полноты их баз знаний, а, скорее, вопрос наличия в федерации профильного специализированного агента и действия в ней алгоритмов делегирования этому агенту прав на принятие решения от лица всего мультиагентного коллектива.

2. Алгоритмы онтоэписоциофилогенетического обучения универсальных экспертных систем на базе федераций нейрокогнитивных агентов

Если принять за основу, что интеллектуальный агент под управлением нейрокогнитивной архитектуры кооперируется с другими интеллектуальными агентами в составе человеко-машинного коллектива, в качестве которого можно рассматривать современную экспертную систему, на основе алгоритмов мультиагентного взаимодействия путем обмена сообщениями, то, учитывая специфику работы инварианта нейрокогнитивной архитектуры, можно сделать вывод, что такая кооперация должна быть выгодна интеллектуальному агенту с точки зрения реализации принципа максимизации своей целевой функции. Соответственно, управляющая нейрокогнитивная архитектура этого агента синтезирует траекторию его движения в пространстве поведения, такую, что в некоторых своих точках эта траектория частично пересекается (по совпадению некоторых координат в локальных пространствах поведения) с траекториями движения других интеллектуальных агентов, и проход через такие точки выгоден интеллектуальному агенту, так как кооперация направлена на реализацию совместного плана поведения, выполнение которого в свою очередь максимизирует уже совокупную энергию, извлекаемую из внешней среды всеми интеллектуальными агентами в составе федерации.

Если также исходить из того, что необходимость перебора значительной по размеру базы знаний влечет за собой затраты энергии на выполнение большого количества операций, то в случае, когда общее вознаграждение в виде энергии, передаваемой интеллектуальным агентам в составе федерации из внешней среды, распределяется между этими агентами соразмерно вкладу каждого из них в решение текущей проблемы, то можно сделать вывод, что интеллектуальному агенту выгодно стремиться к минимизации размера базы

знаний при одновременном повышении удельной эффективности их применения, интерпретируемой как количество энергии, которое агент получает в его результате.

Таким образом, идея профессиональной специализации интеллектуального агента естественным образом реализуется на основе работы инварианта нейрокогнитивной архитектуры.

Так как алгоритм онтонейроморфогенеза основан на обмене порциями энергии между агнейронами в составе нейрокогнитивных архитектур интеллектуальных агентов, цепочки контрактов между агнейронами, расположенными в различных функциональных узлах нейрокогнитивной архитектуры, динамически перестраиваются, изменяя общую топологию ассоциативных связей, определяющую в конечном счете варианты синтеза управляющих воздействий на эффекторы и опосредованно задающих тем самым траекторию движения интеллектуального агента в пространстве поведения.

В случае онтоэписоциофилогенетического обучения успешные интеллектуальные агенты, сформировавшие нейрокогнитивные архитектуры, синтезирующие поведение, эффективное с точки зрения выполнения функций экспертной специализации, могут быть сохранены в составе федерации при смене поколений в эволюционном алгоритме.

Кроме того, так как сформированные в результате онтологического обучения (с помощью алгоритма онтонейроморфогенеза) знания представлены в нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента в явном виде, а все параметры, задающие состав и топологию этой нейрокогнитивной архитектуры, кодируются генотипом интеллектуального агента, лучшие из специализированных агентов могут быть скрещены на шаге многопоколенной оптимизации и размещены в той же самой федерации. Таким образом, в ее составе в этом случае будут накапливаться специализированные интеллектуальные агенты различных поколений, которые в дальнейшем также могут быть подвержены филогенетическому обучению на основе генетического алгоритма.

Так как описанные принципы обосновывают возможность функциональной специализации интеллектуальных агентов в составе федерации универсальной направленности, целесообразно для взаимодействия с пользователями экспертной системы синтезировать интеллектуального агента, специализирующегося на анализе тематики запросов и их распределении между агентами профильной специализации в составе федерации (*агент-брокер*). На рис. 4 приведена схема взаимодействия интеллектуальных агентов в составе универсальной федеративной экспертной системы с пользователями и друг с другом.

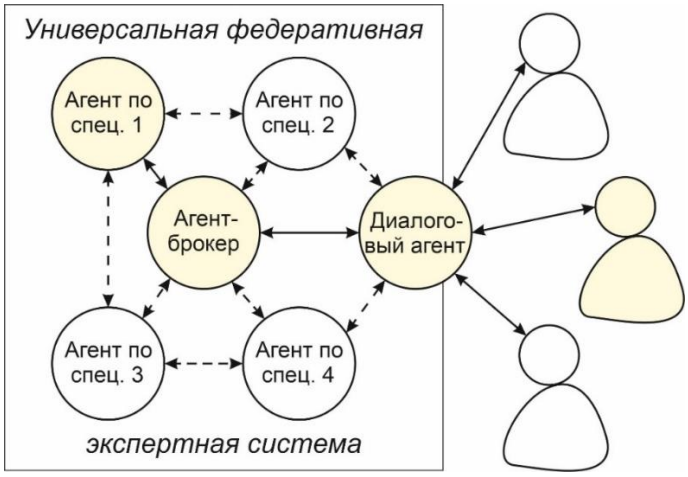


Рис. 4. *Схема мультиагентного взаимодействия в универсальной федеративной экспертной системе*

Fig. 4. *Scheme of multi-agent interaction in a universal federal expert system*

На рисунке 4 приведен также диалоговый агент, обеспечивающий высокоуровневый интерфейс с операторами на основе подмножества естественного языка, ограниченного областями специализации экспертной системы.

Заключение

Разработаны основные принципы онтоэписоциофилогенетического обучения универсальных федеративных экспертных систем.

Показано, что применение мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры в качестве метафоры проектирования системы управления поведением интеллектуального агента в составе федерации формирует алгоритмическую базу для автономного обучения агентов по отдельным направлениям специализации функционала назначения.

Также показано, что функциональная специализация интеллектуальных агентов в составе федерации при условии их кооперации с целью максимизации совокупного приращения значений целевых функций позволяет преодолеть ограничение по эффективности, связанное с переходом от линейных к экспоненциальным оценкам времени выполнения основных алгоритмов работы нейрокогнитивных архитектур в случае нарушения ограничения на фиксированный размер памяти, выделенной в агнейронах для хранения локальной базы знаний.

Обосновано применение эпигенетических алгоритмов для закрепления в поколениях эволюционной оптимизации онтологических знаний интеллектуальных агентов в составе федерации.

Обоснована возможность построения многопоколенных популяций с целью повышения общей эффективности универсальной экспертной федеративной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нагоев З. В., Анчёков М. И., Бжихатлов К. Ч., Нагоева О. В., Пшенокова И. А.* Онтоэписоциофилогенетическое развитие систем общего искусственного интеллекта на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 61–75.

2. *Нагоев З. В., Анчёков М. И., Апшев А. З., Бжихатлов К. Ч., Канкулов С. А., Нагоева О. В., Пшенокова И. А., Хамов А. А., Энес А. З.* Формальная модель генома агента общего искусственного интеллекта на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 5(115). С. 11–24.

3. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 235 с.

4. *Нагоев З. В., Бжихатлов К. Ч., Загазежева О. З.* Нейрокогнитивные методы и алгоритмы федеративного обучения интеллектуальных интегрированных информационно-управляющих систем в реальной коммуникативной среде // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 1(237). С. 111–121.

5. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2022. 150 с.

6. *Абазоков М. А., Анчеков М. И., Бжихатлов К. Ч., Курашев Ж. Х., Нагоев З. В., Нагоева О. В., Унагасов А. А., Хамов А. А.* Анализ вычислительной трудоемкости федеративных алгоритмов нейрокогнитивного управления имитационными феногенетическими моделями растений (метаданные) // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. № 5(121). С. 107–129.

REFERENCES

1. Nagoev Z.V., Anchekov M.I., Bzhikhatlov K.Ch., Nagoeva O.V., Pshenokova I.A. Ontoepisociophylogenetic development of general artificial intelligence systems based on multi-agent neurocognitive architectures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 61–75. (In Russian)

2. Nagoev Z.V., Anchekov M.I., Apshev A.Z., Bzhikhatlov K.Ch., Kankulov S.A., Nagoeva O.V., Pshenokova I.A., Khamov A.A., Enes A.Z. Formal model of the genome of an agent of general artificial intelligence based on multi-agent neurocognitive architectures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 5(115). Pp. 11–24. (In Russian)

3. Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intellectics, or Thinking in Living and Artificial Systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 235 p. (In Russian)

4. Nagoev Z.V., Bzhikhatlov K.Ch., Zagazezheva O.Z. Neurocognitive methods and algorithms for federated learning of intelligent integrated information and control systems in a real communication environment. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Southern Federal University. Engineering Sciences]. 2024. No. 1(237). Pp. 111–121. (In Russian)

5. Nagoev Z.V., Nagoeva O.V. *Obosnovaniye simvolov i mul'tiagentnyye neyrokognitivnyye modeli semantiki yestestvennogo yazyka* [Symbol Grounding and Multi-Agent Neurocognitive Models of Natural Language Semantics]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2022. 150 p. (In Russian)

6. Abazokov M.A., Anchekov M.I., Bzhikhatlov K.Ch., Kurashev Zh.Kh., Nagoev Z.V., Nagoeva O.V., Unagasov A.A., Khamov A.A. Analysis of the computational complexity of federated algorithms for neurocognitive control of simulation phenogenetic models of plants (metadata). *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. No. 5(121). Pp. 107–129. (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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Нагоев Залимхан Вячеславович, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823, SPIN-код: 6279-5857

Анчёков Мурат Инусович, науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

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

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X, SPIN-код: 3299-0927

Курашев Жираслан Хаутиевич, зав. лабораторией «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-6122, SPIN-код: 8549-2620

Нагоева Ольга Владимировна, науч. сотр. отдела «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

nagoeva_o@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2341-7960, SPIN-код: 9478-3325

Пшенокова Инна Ауесовна, канд. физ.-мат. наук, стар. науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр 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

Хамов Анзор Азаматгериевич, мл. науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

opitnoe2014@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3269-4572

Information about the authors

Zalimkhan V. Nagoev, Candidate of Engineering Sciences, General Director of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823, SPIN-code: 6279-5857

Murat I. Anchekov, Researcher of the Laboratory of Molecular Breeding and Biotechnology, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X, SPIN-code: 3299-0927

Zhiraslan Kh. Kurashev, Head of the Laboratory of Molecular Breeding and Biotechnology, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-6122, SPIN-code: 8549-2620

Olga V. Nagoeva, Researcher of the Department of Multiagent Systems, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

nagoeva_o@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2341-7960, SPIN-code: 9478-3325

Inna A. Pshenokova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research of the Laboratory of Molecular Breeding and Biotechnology, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

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

Anzor A. Khamov, Junior Researcher of the Laboratory of Molecular Breeding and Biotechnology, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

opitnoe2014@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3269-4572

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК: 004.896 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-208-218
EDN: JSKNGG

Модификация алгоритма глубокого обучения для распределения функций и задач между робототехническим комплексом и человеком в условиях неопределенности и переменности окружающей среды

М. А. Шереужев[✉ 1, 2], У Го[2], В. В. Серебренный[2]

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

Аннотация. В реальном мире условия редко бывают стабильными, что требует от робототехнических комплексов (РТК) способности к адаптации в условиях неопределенности. Синергия человека и робота повышает производительность, однако для этого необходимы эффективные методы распределения задач, учитывающие особенности обеих сторон. Целью работы является определение оптимальных стратегий распределения задач между людьми и РТК и адаптивное управление РТК в условиях неопределенности и изменяющейся среды. Методы исследования. В работе предложен графовый подход к распределению задач, основанный на возможностях человека и робота. В алгоритм обучения с подкреплением встроен механизм памяти LSTM (Long short-term memory) для решения проблемы частичной наблюдаемости, вызванной неточностью измерений сенсоров и шумом окружающей среды. Метод HER (Hindsight Experience Replay) применен для преодоления проблемы скудных вознаграждений. Результаты. Обученная модель продемонстрировала стабильную сходимость, достигая высокого уровня успешности манипуляции объектами. Интеграция методов LSTM и HER в обучение с подкреплением позволяет успешно решать вопросы распределения задач между человеком и роботом в условиях неопределенности и изменяющейся среды. Предложенный метод можно применять в различных сценариях для РТК в сложных и изменяющихся условиях.

Ключевые слова: взаимодействие человека и робота, адаптивный алгоритм управления, распределение задач, обучение с подкреплением

Поступила 13.11.2024, одобрена после рецензирования 06.12.2024, принята к публикации 11.12.2024

Для цитирования. Шереужев М. А., Го У, Серебренный В. В. Модификация алгоритма глубокого обучения для распределения функций и задач между робототехническим комплексом и человеком в условиях неопределенности и переменности окружающей среды // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 208–218. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-208-218

© Шереужев М. А., Го У, Серебренный В. В., 2024

MSC: 68T40 Original article

Modification of a deep learning algorithm for distributing functions and tasks between a robotic complex and a person in conditions of uncertainty and variability of the environment

M.A. Shereuzhev[✉1, 2], Wu Guo[2], V.V. Serebrenny[2]

[1]Moscow State University of Technology STANKIN
127055, Russia, Moscow, build. 1 Vadkovsky street
[2]Moscow State Technical University named after N. E. Bauman
105005, Russia, Moscow, build. 5 corps 1 Baumanskaya street

Abstract. In the real world, conditions are rarely stable, which requires robotic systems to be able to adapt to uncertainty. Human-robot collaboration increases productivity, but this requires effective task allocation methods that consider the characteristics of both parties. The aim of the work is to determine optimal strategies for distributing tasks between people and collaborative robots and adaptive control of a collaborative robot under uncertainty and a changing environment. Research methods. The paper develops a graph-based approach to task allocation based on the capabilities of a human and a robot. The LSTM memory mechanism is built into the reinforcement learning algorithm to solve the problem of partial observability caused by inaccurate sensor measurements and environmental noise. The Hindsight Experience Replay method is used to overcome the problem of sparse rewards. Results. The trained model demonstrated stable convergence, achieving a high level of success rate of manipulation of objects. The integration of LSTM and HER methods into reinforcement learning allows solving the problems of distributing tasks between a human and a robot under uncertainty and a changing environment. The proposed method can be applied in various scenarios for collaborative robots in complex and changing conditions.

Keywords: human robot interaction, adaptive control algorithm, task distribution, reinforcement learning

Submitted 13.11.2024, approved after reviewing 06.12.2024, accepted for publication 11.12.2024

For citation. Shereuzhev M.A., Guo Wu, Serebrenny V.V. Modification of a deep learning algorithm for distributing functions and tasks between a robotic complex and a person in conditions of uncertainty and variability of the environment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 208–218. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-208-218

Введение

В условиях современного тренда на повсеместную цифровизацию и повышение производительности труда за счет внедрения киберфизических систем робототехнические комплексы (РТК) становятся все более важными элементами различных сфер деятельности – от промышленности и медицины до сельского хозяйства и решения специальных задач. Системы, предполагающие взаимодействие РТК и людей в реальном времени, открывают новые горизонты для повышения эффективности труда. Однако несмотря на значительные достижения в области робототехники, многие аспекты распределения функций и задач между РТК и людьми остаются нерешенными, особенно в условиях неопределенности и переменности окружающей среды. В реальном мире условия редко бывают стабильными и предсказуемыми. Традиционные методы планирования и управления, основанные на статических сценариях, не подходят для таких задач, так как они не могут учесть всю возможную вариативность реальных условий [1].

Человек остается незаменимым элементом в системах, где требуется высокая степень гибкости, творчества и принятия решений в условиях неопределенности. РТК в свою очередь обладает способностью выполнять рутинные, опасные и высокоточные задачи с высокой эффективностью и точностью. Синергия между человеком и РТК может значительно повысить общую производительность системы. Однако для достижения этой синергии необходимо разработать эффективные методы распределения задач, которые учитывают сильные и слабые стороны как людей, так и роботов. Например, в задаче сборки промышленной продукции РТК может выполнять точные механические операции, в то время как человек контролирует процесс и принимает решения в случае возникновения нестандартных ситуаций.

Одним из ключевых направлений в области обеспечения взаимодействия человека и РТК является разработка адаптивных алгоритмов управления, которые позволяют РТК изменять свое поведение в зависимости от изменений в окружающей среде. Среди них популярными исследованиями последних лет являются такие алгоритмы, как машинное обучение с учителем и обучение с подкреплением [2–3]. Роботы могут учиться на основе опыта и данных датчиков и становиться более устойчивыми к неопределенности.

Цель данного исследования заключается в определении оптимальных стратегий распределения задач между людьми и РТК и планировании движения РТК в условиях неопределенности и переменности окружающей среды для повышения общей эффективности и надежности выполнения задач.

Общая архитектура системы

На рис. 1 приведена общая структурная схема системы, в которой используются частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений (POMDP) и метод глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL). Компоненты системы: алгоритм DRL, POMDP, интерфейс взаимодействия человек-робот, источник сенсорных данных и система мониторинга.

Рис. 1. *Структурная схема системы управления взаимодействием робота и человека*

Fig. 1. *Structural diagram of the control system for interaction between a robot and a human*

Пользователь взаимодействует с системой через интерфейс взаимодействия человек-робот. Этот интерфейс позволяет пользователю задавать задачи и получать обратную связь от системы. Интерфейс взаимодействия человек-робот обрабатывает команды от пользователя и передает их в систему мониторинга и сенсорных данных. Сенсорные данные и система мониторинга собирают данные из окружающей среды, включая информацию о состоянии роботов и внешних условиях. Эти данные поступают в POMDP для дальнейшего анализа. POMDP анализирует сенсорные данные и оценивает вероятности различных состояний окружающей среды. На основе этой оценки POMDP формирует возможные стратегии действий. Алгоритм DRL используется для адаптации поведения РТК на основе опыта и исторических данных. Этот модуль обучает РТК оптимальным действиям через пробу и ошибку, улучшая их способность адаптироваться к изменениям в окружающей среде. РТК получает команды и стратегии от системы принятия решений и выполняет задачи в реальной среде, взаимодействуя с пользователем через интерфейс.

Формализация задачи планирования

В промышленной среде методы, основанные на графах, более подходят для представления и декомпозиции сложных задач. Например, наиболее распространенный ориентированный ациклический граф (Directed Acyclic Graph, DAG) [4] позволяет наглядно отображать последовательность и зависимость между задачами, а также поддерживает параллельность выполнения задач, что делает его подходящим для сценариев сотрудничества человека и РТК.

Рассмотрим задачу сборки маленького табурета, которая может быть разложена на 10 подзадач: T1 – подготовка сиденья табурета; T2, T3, T4, T5 – установка ножек табурета А, Б, В, Г на сиденье; T6, T7, T8, T9 – закрепление винтов на ножки А, Б, В, Г; T10 – проверка качества. T6 должно быть выполнено после завершения T1 и T2, а T10 зависит от завершения T6 – T9. Участниками являются оператор и два коллаборативных робота. Для гетерогенных систем необходимо учитывать различия в индивидуальных навыках и ограничениях роботов и людей [5]. Можно распределить подзадачи следующим образом: T2, T3, T6, T7 поручаются человеку; T4 и T8 выполняет робот 1; T5 и T9 выполняет робот 2. Эти подзадачи могут выполняться одновременно. Подготовку T1 и проверку качества T10 также можно поручить человеку на основе его компетенций. Результат можно представить в виде, показанном на рис. 2.

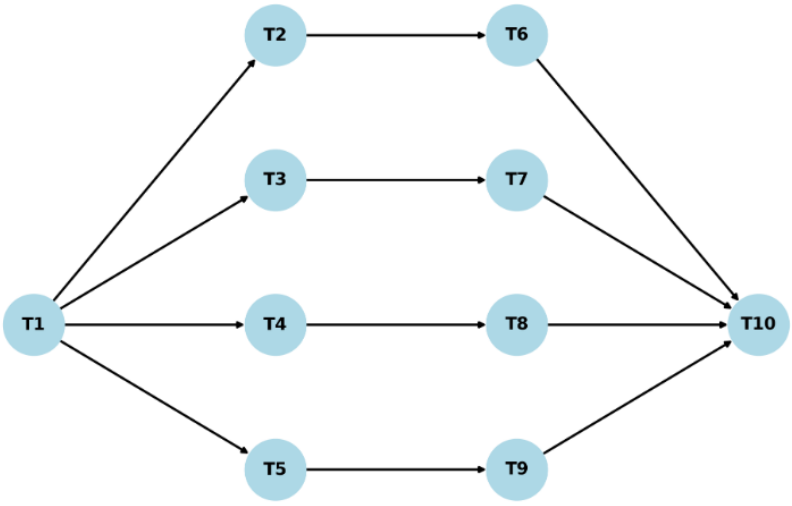


Рис. 2. *Пример декомпозиции задачи в виде DAG*

Fig. 2. *Example of task decomposition in the form of DAG*

Формирование стратегии действий

DAG обычно предполагает, что процесс выполнения каждой задачи заранее известен и контролируем. Однако выполнение задач в реальном мире часто подвергается воздействию неопределенности и изменениям окружающей среды. Например, измеренные данные датчиков могут содержать шум и неточности. Частично наблюдаемый POMDP обрабатывает такие неопределенности с помощью вероятностной модели. Она позволяет системе динамически корректировать стратегию на основе наблюдений и обновления убеждений в условиях изменяющейся среды, чтобы обеспечить оптимальные решения.

POMDP с дискретным временем определяется 7-кратным кортежем (S, A, T, R, O, Z, γ), где S обозначает набор состояний системы, A представляет собой набор действий РТК, $T(s'|s,a)$ обозначает набор условных вероятностей перехода между состояниями, $R(s,a)$ – это функция вознаграждения, $O(z|s',a)$ представляет собой набор условных вероятностей наблюдения, Z обозначает набор возможных наблюдений, $\gamma \in [0,1)$ – это коэффициент дисконтирования.

Поскольку в модели POMDP истинное состояние системы не может быть полностью наблюдаемым, необходимо ввести состояние убежденности по формуле

$$b_t(s) = T(s_t = s|h_t, b_0),$$

которое представляет собой распределение плотности вероятности на пространстве состояний S и отражает предположение или оценку РТК о возможном состоянии системы s на основе текущих наблюдений и истории взаимодействий.

Формула байесовского обновления [6] определяется как

$$b_{t+1}(s') = \eta \cdot O(z|s',a) \cdot \sum_{s \in S} T(s'|s,a) \cdot b_t(s),$$

где η − нормализующая константа, определяемая как

$$\eta = 1/\sum_{s' \in S} O(z|s',a) \sum_{s \in S} T(s'|s,a) \cdot b_t(s).$$

Задача РТК является выбором оптимальной стратегии $\pi(a \mid b)$ и максимизацией ожидаемого накопленного дисконтированного вознаграждения по формуле

$$V^{\pi}(b_0) = \mathrm{E}[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t)|\pi, b_0].$$

Процесс сборки маленького табурета можно определить как POMDP. Совместное пространство состояний включает информацию о человеке, РТК и непредвиденных обстоятельствах, и каждое состояние s может быть представлено как $s = (s_{r1}, s_{r2}, s_g)$, где s_{r1}, s_{r2} – текущий ход выполнения задачи двух роботов, s_g – состояние объекта, манипулируемого роботом.

Пространство действия РТК A – это декартово смещение концевого эффектора в трех направлениях. Пространство наблюдений совпадает с пространством состояний. Функция вознаграждения настроена следующим образом: при выполнении конечной задачи присуждается вознаграждение 1, при невыполнении – 0.

Адаптация поведения роботов с применением DRL

В среде сотрудничества человека и РТК использование DRL может снизить риск столкновений, связанных с присутствием и движением человека. Задачи с непрерывным пространством действий можно обучать с использованием алгоритма DDPG (Deep

Deterministic Policy Gradients) [7], который сочетает в себе преимущества методов актор-критик (Actor-Critic). DDPG использует две нейронные сети: акторную сеть и критическую сеть. Акторная сеть $\mu(s \mid \theta^{\mu})$ принимает состояние s и выдает действие a, а критическая сеть $Q(s, a \mid \theta^{Q})$ оценивает ценность действия a в состоянии s.

Функция потерь для критической сети определяется по формуле

$$L(\theta^{Q}) = \mathrm{E}_{s,a,r,s'}[(Q(s, a \mid \theta^{Q}) - y)^2],$$

где целевое значение y вычисляется по формуле $y = r + \gamma Q(s', \mu(s' \mid \theta^{\mu}) \mid \theta^{Q})$, и γ – коэффициент дисконтирования.

Обновление акторной сети производится по градиенту политики и определяется по формуле

$$\nabla_{\theta^{\mu}} J \approx E_s\left[\nabla_a Q(s, a \mid \theta^{Q})|_{a=\mu(s)} \nabla_{\theta^{\mu}} \mu(s \mid \theta^{\mu})\right].$$

В задачах, где данные обладают временной зависимостью, стандартный DDPG может не учитывать информацию из предыдущих состояний. Для решения модели POMDP можно интегрировать в акторную и критическую сети слои LSTM (Long Short-Term Memory) [8], которые способны запоминать долгосрочные зависимости и исторические наблюдения. LSTM описывается по формулам:

$$f_t = \sigma\left(W_f[h_{t-1}, x_t] + b_f\right),$$

$$i_t = \sigma(W_i[h_{t-1}, x_t] + b_i),$$

$$o_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, x_t] + b_o),$$

$$\tilde{C}_t = tanh(W_C[h_{t-1}, x_t] + b_C),$$

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t,$$

$$h_t = o_t \odot tanh(C_t),$$

где f_t, i_t, o_t – соответственно сигналы забывания, входа и выхода; C_t – состояние ячейки; h_t – скрытое состояние; σ – сигмоида; $tanh$ – гиперболический тангенс; $\odot$ – покомпонентное умножение. Структура ячейки LSTM показана на рис. 3.

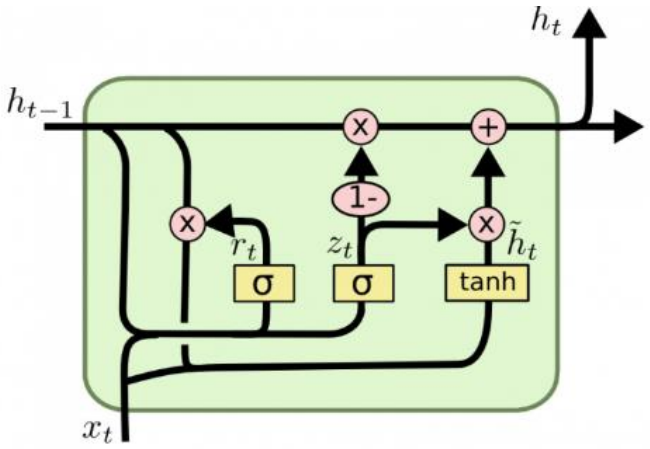


Рис. 3. *Структура ячейки LSTM*

Fig. 3. *LSTM cell structure*

Для учета временной информации нужно модифицировать архитектуру DDPG. Акторная сеть теперь зависит не только от текущего состояния, но и от предыдущего скрытого состояния, определяемая как

$$a_t = \mu(s_t, h_{t-1} \mid \theta^{\mu}).$$

Критическая сеть оценивает ценность текущего действия с учетом последовательности предыдущих состояний $Q(s_t, a_t, h_{t-1} \mid \theta^{Q})$. Обновления параметров сетей производятся с учетом градиентов по временным последовательностям, что позволяет РТК учитывать контекст при принятии решений. LSTM служит механизмом памяти, который преобразует историю взаимодействий $h_t = \{z_0, a_0, z_1, a_1, \ldots, a_{t-1}, z_t\}$, полученную в модели POMDP, в скрытое состояние. Интегрированная с LSTM структура сети DDPG для обучения показана на рис. 4.

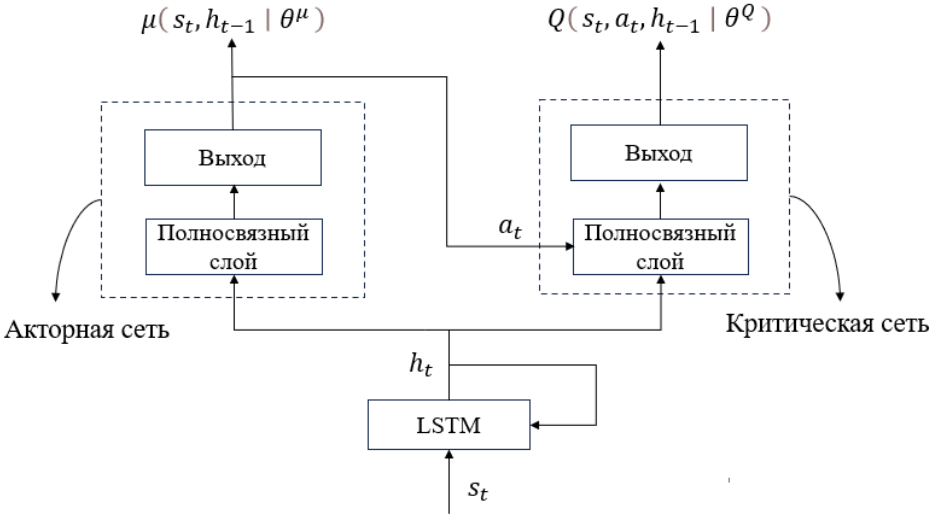


Рис. 4. *Структура сети LSTM-DDPG*

Fig. 4. *LSTM-DDPG network structure*

Для задач с чрезмерно скудными вознаграждениями трудно обучить полезную стратегию. Когда положительные вознаграждения скудные, стандартные алгоритмы могут не получать достаточного количества полезных сигналов для обновления политики, что приводит к медленному и неэффективному обучению. Hindsight Experience Replay (HER) [9] – метод, позволяющий агенту учиться из каждого опыта, даже если изначальная цель не была достигнута. Идея HER заключается в том, чтобы переопределять цели после завершения эпизода, используя фактически достигнутые состояния в качестве новых целей. При использовании HER сохраняются переходы в виде кортежей (s, a, r, s', g), где g – цель. Вознаграждение пересчитывается с учетом новой цели по формуле

$$r = r(s, a, g') = \begin{cases} 0, & \text{если } \phi(s') = g', \\ -1, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $\phi(s')$ – функция, отображающая состояние в достижимую цель. Переопределенные переходы (s, a, r, s', g') используются для обновления политики акторной сети и обучения критической сети.

Методология проведения эксперимента и результаты

Чтобы проверить, может ли предложенная модифицированная структура сети решить проблему POMDP, была выбрана готовая среда 'FetchPickAndPlace-v3', разработанная

OpenAI Gym [10], как показано на рис. 5. Подзадача манипуляции объектами, возложенная на робота, в основном включает захват и перемещение объектов. Цель обучения состоит в том, чтобы научить робота захватывать объект и перемещать его в заданное положение, обозначенное красным шаром. В начале каждого эпизода положение объекта и цели изменяется в небольшом диапазоне.

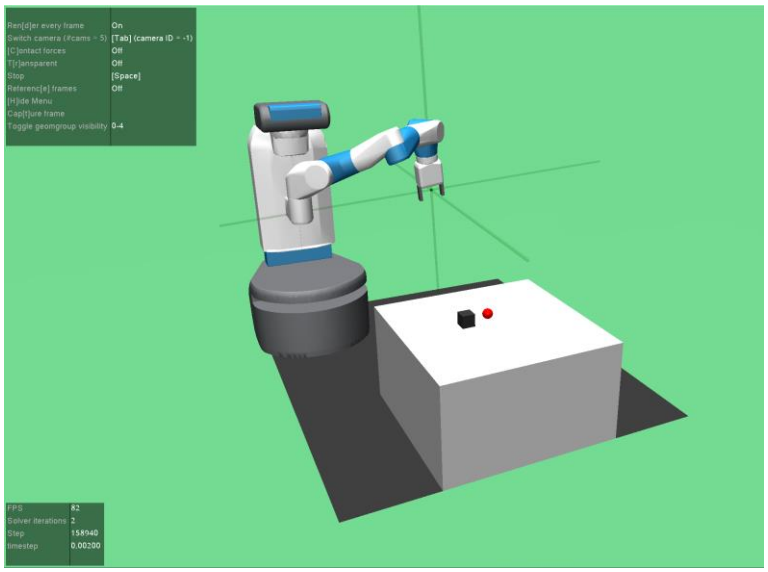


Рис. 5. *Готовая среда для обучения*

Fig. 5. *Ready-made learning environment*

Пространство состояний в этой среде состоит из позиции и ориентации концевого эффектора робота, скорости по каждому из измерений, позиции и ориентации объекта и его относительного положения к концевому эффектору, перемещения и скорости захвата. Пространство действия включает в себя команды по перемещению манипулятора в трехмерном пространстве и позиционное смещение каждого пальца захвата. Каждое непрерывное действие принимает значение из [−1, +1].

Для обучения модифицированной модели LSTM-DDPG были использованы гиперпараметры, показанные в табл. 1.

Таблица 1. Проектирование гиперпараметров модели для обучения

Table 1. Designing the hyperparameters of the model for training

Параметры	**Значение**
Скорость обучения акторной сети	0,001
Скорость обучения критической сети	0,001
Размер пакета	256
Коэффициент дисконтирования	0,95
Параметр мягкого обновления	0,005
Максимальный размер буфера воспроизведения	1000000
Количество переопределений целей	4
Стратегия переопределения целей	'future'
Количество эпизодов обучения	5000
Максимальная длина эпизода	500
Длина последовательности для LSTM	10
Размер скрытого слоя	256

Модель была реализована на платформе машинного обучения Pytorch версии 2.5.1. Программирование осуществлялось на языке Python 3.8.8. Обучение и оценка модели LSTM-DDPG проводились на компьютере с процессором Intel i9-13980HX и графическим процессором NVIDIA GeForce RTX 4060 с памятью 8 ГБ.

Для оценки эффективности модели использовалась метрика «Процент успешных эпизодов». Эта метрика определяется как процент эпизодов из каждых 100, в которых РТК успешно захватил и переместил объект в заданное положение. Формально уровень успеха рассчитывается так:

$$\text{Процент успешных эпизодов} = \left(\frac{\text{Количество успешных эпизодов}}{100}\right) \times 100\%.$$

На рис. 6 представлены результаты обучения модели в виде зависимости уровня успеха от количества эпизодов. Из графика видно, что уровень успеха постепенно увеличивается по мере обучения модели. На начальных этапах обучения успехи редки из-за сложности задачи и скудности вознаграждений. Однако благодаря использованию HER и LSTM модель начинает успешно выполнять задачу после определенного количества эпизодов.

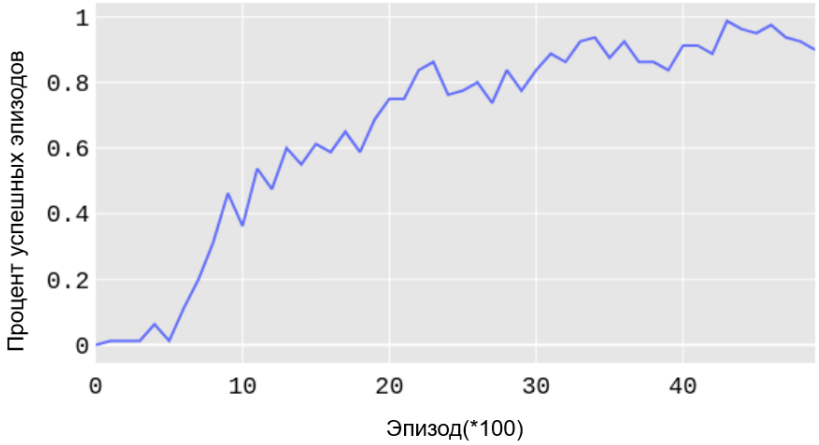


Рис. 6. *График зависимости уровня успеха от количества эпизодов*

Fig. 6. *Graph of success rate versus number of episodes*

Модель, обученная с использованием исходного алгоритма DDPG, на протяжении всего процесса обучения показывала нулевой уровень успешности, что свидетельствует о неспособности алгоритма выучить полезную стратегию. После обучения модель с модифицированным алгоритмом продемонстрировала стабильную сходимость, достигая высокого уровня успеха, близкого к 1. Когда объект и цель находятся в любом месте стола, манипулятор может схватить объект и переместить его в заданное место. Использование HER оказалось особенно полезным для задачи манипуляции объектами, поскольку в средах с чрезмерно скудными вознаграждениями сложно выработать полезные стратегии. Интеграция LSTM и HER в архитектуру DDPG показала превосходство над базовым алгоритмом DDPG, особенно в условиях скудных вознаграждений и частичной наблюдаемости среды. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной модифицированной структуры сети в решении задачи POMDP.

Заключение

В работе представлен метод распределения задач между человеком и роботом в условиях неопределенности в изменяющейся среде. Задачи разбиваются на основе

графового подхода и распределяются в зависимости от возможностей человека и РТК. Предложено решение, в котором механизм памяти LSTM встроен в алгоритм обучения с подкреплением для решения проблемы частичной наблюдаемости, вызванной неточностью измерений сенсоров и шумом в окружающей среде. Метод HER использован для решения проблемы скудных вознаграждений. Результаты обучения подтверждают эффективность интеграции LSTM и HER в архитектуру DDPG для решения задач POMDP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Fiore M., Clodic A., Alami R. On planning and task achievement modalities for human-robot collaboration. *In Experimental Robotics: The 14th International Symposium on Experimental Robotics*. Marrakech, Morocco: Springer. 2016. Pp. 293–306.

2. Ghadirzadeh A., Chen X., Yin W. et al. Human-centered collaborative robots with deep reinforcement learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 6(2). Pp. 566–571. DOI: 10.48550/arXiv.2007.01009

3. Qureshi A.H., Nakamura Y., Yoshikawa Y., Ishiguro H. Robot gains social intelligence through multimodal deep reinforcement learning. In IEEE-RAS. *16th International Conference on Humanoid Robots (humanoids)*. 2016. Pp. 745–751. DOI: 10.48550/arXiv.1702.07492

4. Kwok Y.K., Ahmad I. Static scheduling algorithms for allocating directed task graphs to multiprocessors. *ACM Computing Surveys*. 1999. Vol. 31(4). Pp. 406–471. DOI: 10.1145/344588.344618

5. Malik A.A., Bilberg A. Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly. *Industrial Robot: International Journal of Robotics Research and Application*. 2019. Vol. 46(4). Pp. 471–480. DOI: 10.1108/IR-11-2018-0231

6. Lucignano L., Cutugno F., Rossi S., Finzi A. A dialogue system for multimodal human-robot interaction. *Proceedings of the 15th ACM on International Conference on Multimodal Interaction*. 2013. Pp. 197–204. DOI: 10.1145/2522848.2522873

7. Qiu C., Hu Y., Chen Y., Zeng B. Deep deterministic policy gradient (DDPG)-based energy harvesting wireless communications. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6(5). Pp. 8577–8588. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2921159

8. Hochreiter S. Long Short-term Memory. Neural Computation MIT-Press. 1997.

9. Andrychowicz M., Wolski F., Ray A. et al. Hindsight experience replay. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30.

10. Towers M., Kwiatkowski A., Terry J. et al. Gymnasium: A standard interface for reinforcement learning environments. *arXiv:2407.17032. 2024.* DOI: 10.48550/arXiv.2407.17032

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование выполнено на базе МГТУ «СТАНКИН» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSFS-2024-0012).

Funding. The study was carried out at MSTU STANKIN with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project No. FSFS-2024-0012).

Информация об авторах

Шереужев Мадин Артурович, кан. тех. наук, мл. науч. сотр., Центр когнитивных технологий и систем технического зрения, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1;

старший преподаватель, кафедра «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

m.shereuzhev@stankin.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2352-992X; SPIN-код: 1734-9056

У Го, аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

ug@student.bmstu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8424-4421; SPIN-код: 9189-9658

Серебренный Владимир Валерьевич, кан. тех. наук, доцент, зав. кафедрой «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

vsereb@bmstu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1182-2117, SPIN-код: 5410-8433

Information about the authors

Madin A. Shereuzhev, Candidate of Engineering Sciences, Junior Research, Center for Cognitive Technologies and Machine Vision Systems, Moscow State University of Technology STANKIN;

127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane;

Senior Teacher, The Department of Robotic Systems and Mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld 1;

m.shereuzhev@stankin.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2352-992X; SPIN-code: 1734-9056

Wu Guo, Post-graduate Student at the Department of Robotic Systems and Mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld 1;

ug@student.bmstu.ru,ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8424-4421; SPIN-code: 9189-9658

Vladimir V. Serebrenny, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Robotic Systems and Mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld 1;

vsereb@bmstu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1182-2117, SPIN-code: 5410-8433

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

УДК 633.15:631.51 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-219-226
EDN: KRMPRB

Продуктивность кукурузы на зерно при разных способах основной обработки почвы

С. А. Магомедалиев, М. Р. Мусаев, М. Г. Абдулнатипов✉

Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова
367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180

Аннотация. Цель исследования – изучение влияния различных способов основной обработки почвы на продуктивность кукурузы на зерно. В статье отражены результаты полевого опыта по выявлению целесообразности применения разных способов основной обработки почвы на посевах гибридов кукурузы. Установлено, что максимальную площадь листовой поверхности на уровне 44,9 тыс. м^2/га гибриды кукурузы обеспечили на варианте с отвальной обработкой почвы. В случае проведения безотвальной обработки листовая поверхность снизилась на 4,7 %. Анализ данного показателя в зависимости от изучаемых гибридов показал, что наибольшая величина (45,5 тыс. м^2/га) отмечена при возделывании Машук 355 МВ. При возделывании гибридов РОСС 299 МВ, Краснодарский 298 МВ, Краснодарский 427 СВ отмечено снижение соответственно на 6,8; 2,7 и 5,3 %. Параметр чистой продуктивности фотосинтеза в среднем по гибридам максимальным оказался при отвальной обработке почвы – 11,0 г/м^2·сутки, что больше варианта с безотвальной обработкой почвы на 13,4 %. Данный показатель максимальным был у гибрида Машук 355 МВ – 11,6 г/м^2·сутки, на делянках с другими гибридами (РОСС 299 МВ, Краснодарский 298 МВ, Краснодарский 427 СВ) снижение варьировало в пределах 18,4; 9,4 и 22,1 %. Наиболее рациональной оказалась отвальная обработка, где в среднем по гибридам урожайность зерна составила 7,6 т/га, разница с данными варианта с безотвальной обработкой отмечена на уровне 10,1 %. Наибольшую продуктивность в рассматриваемых условиях обеспечил гибрид Машук 355 МВ – 8,1 т/га. Превышение по сравнению с гибридом РОСС 299 МВ составило 22,7 %, с данными гибрида Краснодарский 298 МВ – 9,5%, а по сравнению с Краснодарским 427 С – 19,1 %. Таким образом, в среднем за годы проведения полевого эксперимента установлено, что гибриды кукурузы наибольшую эффективность сформировали на фоне применения отвальной обработки почвы. Среди гибридов наибольшую продуктивность сформировал Машук 355 МВ.

Ключевые слова: Приморско-Каспийская подпровинция, кукуруза на зерно, гибриды, способ обработки почвы, площадь листьев, чистая продуктивность фотосинтеза, урожайность

Поступила 15.11.2024, одобрена после рецензирования 09.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Магомедалиев С. А., Мусаев М. Р., Абдулнатипов М. Г. Продуктивность кукурузы на зерно при разных способах основной обработки почвы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 219–226. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-219-226

Original article

Corn for grain productivity with different methods of basic cultivation

S.A. Magomedaliev, M.R. Musaev, M.G. Abdulnatipov✉

Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov
367032, Russia, Makhachkala, 180 Magomet Gadzhiev street

© Магомедалиев С. А., Мусаев М. Р., Абдулнатипов М. Г., 2024

Abstract. The purpose of the study is to investigate the effect of different methods of primary cultivation on the grain productivity of corn. The article presents the results of a field experiment to identify the feasibility of using different methods of primary cultivation on hybrid corn crops. It was found that the maximum leaf surface area of 44.9 thousand m2 / ha was provided by corn hybrids in the variant with moldboard tillage. In the case of non-moldboard tillage, the leaf surface decreased by 4.7 %. Analysis of this indicator depending on the studied hybrids showed that the highest value (45.5 thousand m2 / ha) was noted when cultivating Mashuk 355 MV. When cultivating hybrids ROSS 299 MV, Krasnodarsky 298 MV, Krasnodarsky 427 SV, a decrease of 6.8; 2.7 and 5.3 %, respectively, was noted. The parameter of net productivity of photosynthesis on average for hybrids was maximum with moldboard tillage – 11.0 g/m2•day, which is 13.4 % more than the variant with no-moldboard tillage. This indicator was maximum for the hybrid Mashuk 355 MV – 11.6 g/m2•day, in plots with other hybrids (ROSS 299 MV, Krasnodarsky 298 MV, Krasnodarsky 427 SV) the decrease varied within 18.4; 9.4 and 22.1 %. Moldboard tillage turned out to be the most rational, where on average for hybrids the grain yield was 7.6 t/ha, the difference with the data of the variant with no-moldboard tillage was noted at the level of 10.1 %. The highest productivity in the considered conditions was provided by the hybrid Mashuk 355 MV – 8.1 t/ha. The excess in comparison with the hybrid ROSS 299 MV was 22.7%, with the data of the hybrid Krasnodar 298 MV – 9.5 %, and in comparison with Krasnodar 427 S – 19.1 %. Thus, on average, over the years of the field experiment, it was established that the corn hybrids formed the greatest efficiency against the background of the use of moldboard tillage. Among the hybrids, Mashuk 355 MV formed the greatest productivity.

Keywords: Primorsko-Caspian subprovince, corn for grain, hybrids, cultivation methods, leaf area, net photosynthetic productivity, crop yield

Submitted 15.11.2024, approved after reviewing 09.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Magomedaliev S.A., Musaev M.R., Abdulnatipov M.G. Corn for grain productivity with different methods of basic cultivation . *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 219–226. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-219-226

Введение

Необходимый комплекс условий для жизнедеятельности растений – накопление, сохранение и рациональное использование влаги, создание лучшего строения почвы, определяющее оптимизацию водно-физических, агрохимических условий, очищение ее от сорняков, вредителей и болезней растений – создается с помощью механической обработки почвы.

Кукуруза является очень трудоемкой и энергоемкой культурой. С подбором правильной соответствующей обработки почвы связано наряду с другими вопросами решение проблемы устойчивости зернового хозяйства и расширенного воспроизводства плодородия почвы в условиях острого дефицита влаги [1–7].

Некоторые исследователи указывают на необходимость проведения отвальной обработки почвы [8, 9]. В то же время другие рекомендуют использовать в практике сельскохозяйственного производства наиболее эффективную и наименее дорогостоящую технологию выращивания кукурузы на зерно [10–13].

В этой связи проведенное исследование актуально, так как направлено на повышение урожайности зерна кукурузы. Цель исследования – изучить влияние различных способов основной обработки почвы на продуктивность кукурузы на зерно.

Материалы и методы. Научные опыты проводились на каштановых почвах Южного Дагестана в период с 2021 по 2023 г.

Полевые опыты закладывались в 3 повторностях. Общая площадь делянки – 50 м^2, учетная площадь – 25 м^2. Расположение вариантов в повторениях рендомизированное. Технология возделывания кукурузы в опытах соответствовала принятой для вышеуказанной зоны.

Результаты и их обсуждение

Исследованием установлено, что способы обработки почвы оказали разное влияние на продуктивность кукурузы на зерно, при этом наиболее приемлемой оказалась отвальная обработка почвы. Так, в среднем по опыту площадь листьев в среднем по гибридам на этом варианте отмечена на уровне 44,9 тыс. м^2/га. В случае применения безотвальной обработки снижение составило 4,7% (рис. 1). Среди гибридов наибольший показатель (45,5 тыс. м^2/га) отмечен на посевах Машук 355 МВ.

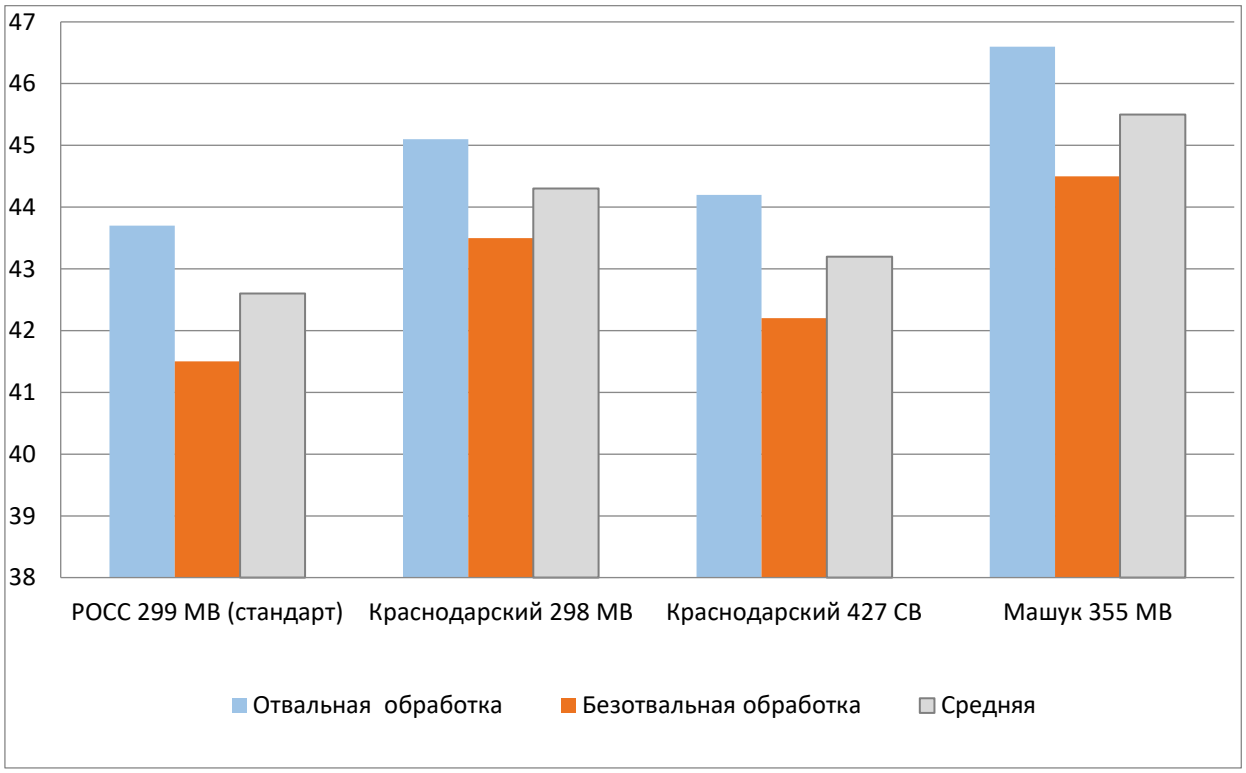


Рис. 1. *Площадь листьев гибридов кукурузы (средняя за 2021–2023 гг., тыс. м^2/га)*

Fig. 1. *Leaf area of corn hybrids (average for 2021–2023, thousand m^2/ha)*

Снижение данного показателя составило 6,8; 2,7 и 5,3% на посевах РОСС 299 МВ, Краснодарского 298 МВ и Краснодарского 427 СВ. Минимальные значения наблюдались у гибрида РОСС 299 МВ. Аналогичная ситуация сложилась с показателями чистой продуктивности фотосинтеза, фотосинтетического потенциала и накопления сухого вещества.

Анализ чистой продуктивности фотосинтеза (ЧПФ) показал, что в данном случае сложилась примерно такая же динамика, как и с площадью листовой поверхности (рис. 2). Так, при отвальном способе основной обработки почвы ЧПФ составила 11,1 г/м^2·сутки, что на 13,3 больше данных варианта с безотвальной обработкой (9,8 г/м^2·сутки).

При возделывании гибрида Машук 355 МВ чистая продуктивность фотосинтеза составила в среднем по вариантам опыта 11,6 г/м^2·сутки. Снижение данного показателя в

пределах 17,2; 8,4 и 22,1 % зафиксировано на посевах РОСС 299 МВ, Краснодарского 298 МВ и Краснодарского 427 СВ.

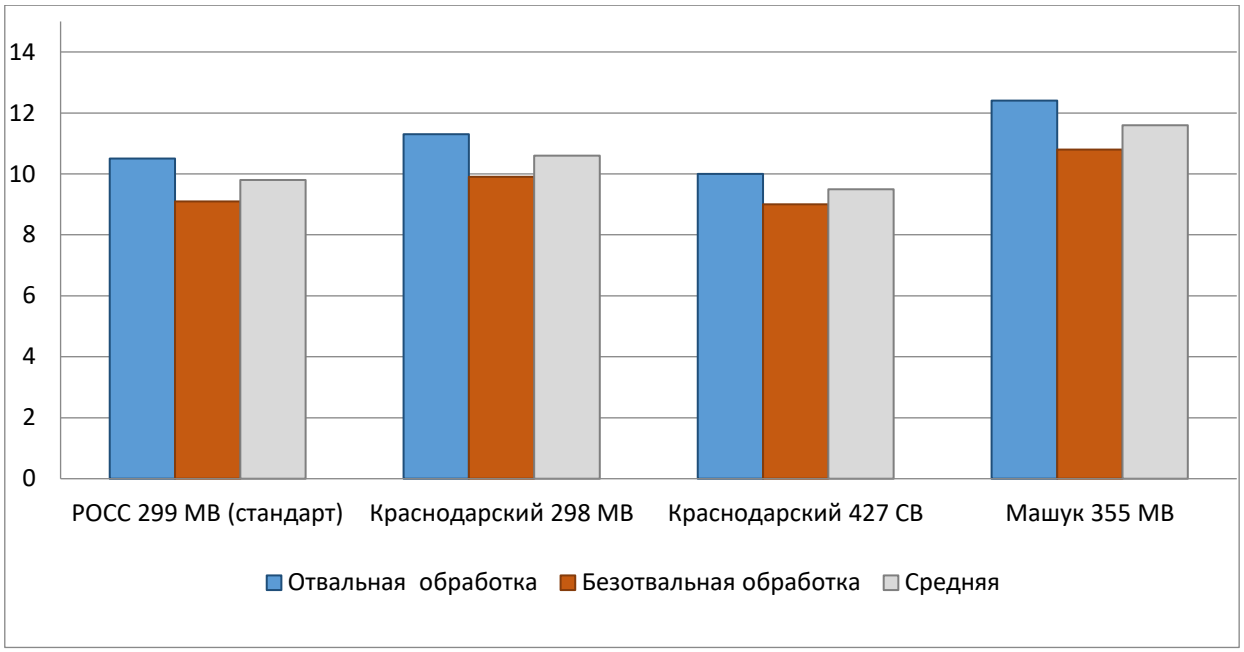


Рис. 2. *Чистая продуктивность фотосинтеза (средняя за 2021–2023 гг., г/м^2·сутки)*

Fig. 2. *Net productivity of photosynthetic processes (average for 2021–2023, g/m^2·day)*

Проведение отвальной обработки почвы на глубину 0,25–0,27 м обеспечило урожай зерна 7,6 т/га (табл. 1). Снижение продуктивности на 10,1 % зафиксировано при проведении безотвальной обработки почвы.

Таблица 1. Урожайность гибридов кукурузы (средняя за 2021–2023 гг., т/га)

Table 1. Yield of corn hybrids (average for 2021–2023, t/ha)

Гибрид	Вариант опыта		Средняя
	Отвальная обработка	Безотвальная обработка	
РОСС 299 МВ (стандарт)	6,9	6,3	**6,6**
Краснодарский 298 МВ	7,8	7,1	**7,4**
Краснодарский 427 СВ	7,2	6,5	**6,8**
Машук 355 МВ	8,7	7,6	**8,1**
Средняя	**7,6**	**6,9**	
НСР$_{05}$ – 2021 2022 2023	**0,3 0,2 0,6**	**0,2 0,3 0,4**	

Проведенные исследования показали, что наибольшую урожайность обеспечил гибрид Машук 355 МВ – 8,1 т/га, прибавка по сравнению с данными гибридов РОСС 299 МВ, Краснодарский 298 МВ и Краснодарский 427 С составила соответственно 22,7; 9,5 и 19,1 %.

Между параметрами площади листовой поверхности и урожайности, а также чистой продуктивности фотосинтеза и урожайности выявлены тесные зависимости, которые

приведены в таблицах 2, 3. В первом случае на варианте с отвальной обработкой почвы у стандарта отмечена средняя зависимость – r=0,6018, а на делянках с гибридом Машук 355 МВ сильная взаимосвязь – r=0,8163.

Таблица 2. Результаты корреляционного анализа зависимости площади листовой поверхности (x) от урожайности (y)

Table 2. Results of the correlation analysis of the dependence of the leaf surface area (x) on the yield (y)

Гибрид	Коэффициент корреляции	y по x
Отвальная обработка		
РОСС 299 МВ	0,6018	y = 0,1429x + 0,7808
Машук 355 МВ	0,8163	y = 0,8867x – 32,707
Безотвальная обработка		
РОСС 299 МВ	0,6094	y = 0,5122x – 15,009
Машук 355 МВ	0,757	y = 0,5041x – 13,454

При проведении безотвальной обработки вышеуказанные показатели зафиксированы в пределах: у гибрида РОСС 299 МВ на уровне r = 0,6094, а у Машук 355 МВ r = 0,757. Аналогичная ситуация наблюдалась также между параметрами чистой продуктивности фотосинтеза и урожайностью (табл. 3).

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа зависимости чистой продуктивности фотосинтеза (x) от урожайности (y)

Table 3. Results of the correlation analysis of the dependence of net productivity of photosynthesis (x) on crop yield (y)

Гибрид	Коэффициент корреляции	y по x
Отвальная обработка		
РОСС 299 МВ	0,6413	y = 0,9508x – 3,4975
Машук 355 МВ	0,8045	y = 0,7899x – 1,09844
Безотвальная обработка		
РОСС 299 МВ	0,6052	y = 1,0086x – 1,6791
Машук 355 МВ	0,7524	y = 0,7682x – 0,5096

Как видно из приведенных данных, достаточно сильная взаимосвязь обнаружена у гибрида Машук 355 МВ на варианте с отвальной обработкой почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяемые способы основной обработки почвы оказали влияние на продуктивность кукурузы, при этом наибольшие данные были получены на фоне проведения отвальной обработки почвы. За период вегетации максимальную урожайность продемонстрировал Машук 355 МВ, а минимальную – РОСС 299 МВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Накаева А. А., Оказова З. П.* Потенциальные возможности кукурузы и вредоносность сорных растений в лесостепной зоне Чеченской Республики // International Agricultural Journal. 2022. Т. 65. № 6. С. 811–521. DOI: 10.55186/25876740_2022_6_6_1

2. *Мнатсаканян А. А., Чуварлеева Г. В.* Урожайность и качество зерна кукурузы в зависимости от доз и кратности внесения кремнийсодержащего препарата // Новые технологии. 2020. Т. 16. № 5. С. 71–79. DOI: 10.47370/2072-0920-2020-16-5-71-79

3. *Еремин Д. И., Демин Е. А.* Выращивание кукурузы в лесостепной зоне Зауралья: от теоретического обоснования к практическим результатам // Аграрный вестник Урала. 2017. № 12(166). С. 9–16. EDN: VTLNZR

4. Ханиева И. М., Шибзухов З. Г. С., Тиев Р. А. и др. Совершенствование элементов технологии возделывания сахарной кукурузы в Кабардино-Балкарской Республике // Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса горных и предгорных территорий: сб. науч. тр. по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Владикавказ, 2023. С. 218–221. EDN: AOEZXG

5. *Ханиева И. М., Шогенов Ю. М., Шибзухов З. Г. С. и др.* Продуктивность раннеспелых гибридов кукурузы на зерно в зависимости от минеральных удобрений и микроэлементов в условиях КБР // International Agricultural Journal. 2023. Т. 66. № 3. DOI: 10.55186/25876740_2023_7_3_8

6. *Мамсиров Н. И., Мнатсаканян А. А., Малич И. Ю.* Оценка эффективности возделывания высокоурожайных и перспективных гибридов кукурузы в Адыгее // Эффективный АПК. 2021. № 2(4). С. 54–56. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10315

7. *Тойгильдин А. Л., Подсевалов М. И., Аюпов Д. Э., Тюрин А. В.* Продуктивность гибридов кукурузы на зерно в зависимости от приемов возделывания в условиях лесостепной зоны Поволжья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4(52). С. 56–64. DOI: 10.18286/1816-4501-2020-4-56-64

8. *Власова О. И., Смакуев А. Д., Трубачева Л. Д.* Влияние приемов основной обработки почвы на эффективность возделывания гибридов кукурузы в условиях Карачаево-Черкесской Республики // Земледелие. 2019. № 7. С. 32–34. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10708

9. *Воронин А. Н., Никитин В. В., Навольнева Е. В.* Влияние удобрений и способов основной обработки почвы на урожай зерна кукурузы // Кукуруза и сорго. 2018. № 2. С. 32–34. DOI: 10.25715/KS.2018.2.16247

10. *Мелихов В. В., Фролова М. В., Лысенко И. А.* Продуктивность зерновой кукурузы в зависимости от способов основной обработки почвы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 1(65). С. 20–29. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-01-01

11. *Kondratieva O. V., Fedorov A. D., Voityuk V. A.* Current engineering support of corn cultivation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engiheering.* 2021. С. 035647. DOI: 10.1088/1755-1315/954/1012074

12. *Lauenroth D., Gokhale Ch. S.* Theoretical assessment of persistence and adaptation in weeds with complex life cycles // *Nature Plants.* 2023. Vol. 9. No. 8. Pp. 1267–1279. DOI: 10.1038/s41477-023-01482-1

13. *Shpanev A. M., Smuk V. V.* The contribution of factors to the formation of pollution of grain-grass-rowed crops in the north-west of the Russian Federation // *Russian Agricultural Sciences*. 2023. No 4. Pp. 38–42. DOI: 10.31857/S2500262723040075

REFERENCES

1. Nakaeva A.A., Okazova Z.P. The potential of corn and the harmfulness of weeds in the forest-steppe zone of the Chechen Republic. *International Agricultural Journal*. 2022. Vol. 65. No. 6. Pp. 811–521. DOI: 10.55186/25876740_2022_6_6_1. (In Russian)

2. Mnatsakanyan A.A., Chuvarleeva G.V. Productivity and quality of corn grain depending on doses and multiplicity of application of a silicon-containing preparation. *Novyye tekhnologii* [New Technologies]. 2020. Vol. 16. No. 5. Pp. 71–79. DOI: 10.47370/2072-0920-2020-16-5-71-79. (In Russian)

3. Eremin D.I., Demin E.A. Growing corn in the forest-steppe zone of the Trans-Urals: from theoretical justification to practical results. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2017. № 12 (166). Pp. 9–16. EDN: VTLNZR. (In Russian)

4. Khanieva I.M., Shibzukhov Z.G.S., Tiev R.A. et al. Improvement of the elements of the technology of cultivation of sugar corn in the Kabardino-Balkarian Republic. *Nauchnoye obespecheniye ustoychivogo razvitiya agropromyshlennogo kompleksa gornykh i predgornykh territoriy* [Scientific support for sustainable development of the agro-industrial complex of mountainous and foothill territories]: *sb. nauch. tr. po materialam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. Vladikavkaz, 2023. Pp. 218–221. EDN: AOEZXG. (In Russian)

5. Khanieva I.M., Shogenov Yu.M., Shibzukhov Z.G.S. et al. Productivity of early-maturing corn hybrids for grain depending on mineral fertilizers and trace elements in CBD conditions. *International Agricultural Journal*. 2023. Vol. 66. No. 3. DOI: 10.55186/25876740_2023_7_3_8. (In Russian)

6. Mamsirov N.I., Mnatsakanyan A.A., Malich I.Yu. Evaluation of the effectiveness of cultivation of high-yielding and promising corn hybrids in Adygea. *Effective Agroindustrial Complex*. 2021. № 2(4). Pp. 54–56. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10315. (In Russian)

7. Toigildin A.L., Podsevalov M.I., Ayupov D.E., Tyurin A.V. Productivity of corn hybrids for grain depending on cultivation techniques in the conditions of the forest-steppe zone of the Volga region. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy]. 2020. № 4(52). Pp. 56–64. DOI: 10.18286/1816-4501-2020-4-56-64. (In Russian)

8. Vlasova O.I., Smakuev A.D., Trubacheva L.D. The influence of basic tillage techniques on the efficiency of cultivation of corn hybrids in the conditions of the Karachay-Cherkess Republic. *Zemledeliye*. 2019. No. 7. Pp. 32–34. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10708. (In Russian)

9. Voronin A.N., Nikitin V.V., Navolneva E.V. The influence of fertilizers and methods of basic tillage on the yield of corn grain. *Kukuruza i sorgo* [Corn and sorghum]. 2018. No. 2. Pp. 32–34. DOI: 10.25715/KS.2018.2.16247. (In Russian)

10. Melikhov V.V., Frolova M.V., Lysenko I.A. Productivity of grain corn depending on the methods of basic tillage. *Proceedings of Lower Volga Agro-university complex: science and higher education.* 2022. № 1(65). Pp. 20–29. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-01-01. (In Russian)

11. Kondratieva O.V., Fedorov A.D., Voityuk V.A. Current engineering support of corn cultivation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2021. C. 035647. DOI: 10.1088/1755-1315/954/1012074

12. Lauenroth D., Gokhale Ch.S. Theoretical assessment of persistence and adaptation in weeds with complex life cycles. *Nature Plants.* 2023. Vol. 9. No. 8. Pp. 1267–1279. DOI: 10.1038/s41477-023-01482-1

13. Shpanev A.M., Smuk V.V. The contribution of factors to the formation of pollution of grain-grass-rowed crops in the north-west of the Russian Federation. *Russian Agricultural Sciences.* 2023. No 4. Pp. 38–42. DOI: 10.31857/S2500262723040075

Вклад авторов:

С. А. Магомедалиев – закладка и выполнение полевых опытов, сбор данных, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи;

М. Г. Абдулнатипов – участие в проведении опытов, критический анализ текста;

М. Р. Мусаев – финальная доработка текста статьи.

Contribution of the authors:

S.A. Magomedaliev – laying and performing field experiments, data collection, data analysis and interpretation, preparation of the manuscript;

M.G. Abdulnatipov – participation in conducting experiments, critical analysis of the text;

M.R. Musaev – final revision of the text of the article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Магомедалиев Седретдин Агларович, соискатель кафедры землеустройства и кадастров, Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова;

367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180

Мусаев Магомед Расулович, д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой землеустройства и кадастров, Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова;

367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180;

SPIN-код: 8010-9719

Абдулнатипов Муслим Гайирбегович, канд. тех. наук, доцент, кафедра сельскохозяйственных машин и ТКМ, начальник отдела аспирантуры и докторантуры, Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова;

367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180;

SPIN-код: 7139-2512

Information about the authors

Sedretdin A. Magomedaliev, Applicant of the Department of Land Management and Cadastre, Dagestan State Agrarian University named after M. M. Dzhambulatov;

367032, Russia, Makhachkala, 180 Magomet Gadzhiev street;

Magomed R. Musaev, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Land Management and Cadastre, Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov;

367032, Russia, Makhachkala, 180 Magomet Gadzhiev street;

SPIN-code: 8010-9719

Muslim G. Abdulnatipov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, The Department of Agricultural Machinery and TCM, Head of the Postgraduate and Doctoral Studies Department, Dagestan State Agrarian University named after M. M. Dzhambulatov;

367032, Russia, Makhachkala, 180 Magomet Gadzhiev street;

SPIN-code: 7139-2512

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

УДК 632.51(470.54) Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-227-236
EDN: LYMFRD

Эффективность химпрополки в борьбе с амброзией полыннолистной и другими сорняками на посевах подсолнечника в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики

Х. Ш. Тарчоков, Ф. Х. Бжинаев, Д. А. Тутукова✉

Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224

Аннотация. Исследования проводили в 2021–2023 гг. с целью подавления сорняков, в том числе и особо опасного объекта внутреннего карантина в нашей стране – амброзии полыннолистной (Ambrosia artemisiaflia L.) на посевах подсолнечника (Helianthus annuus L.). В 2021–2023 гг. изучали влияние гербицидов Гаур, КЭ (240 г/л) и Гезагард, КС (500 г/л) на засоренность посевов подсолнечника сорта Мастер в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики. Схема опыта предусматривала сравнение вариантов с гербицидным фоном и без него при разных нормах их внесения: 1 – контроль (хозяйственный); 2 – контроль без сорняков (сорные растения удалялись вручную по мере их появления на посевах в течение вегетации подсолнечника); 3, 4, 5 – внесение различных дозировок гербицидов в почву. Отмечена высокая степень подавления амброзии полыннолистной (85,0–90,8 %) и других видов сорняков (73,0–89,6 %) на фоне применения гербицида почвенного действия Гаур, КЭ в дозировках 0,8 и 1,0 л/га, внесенного в почву под «слепое» боронование. Это сохраняет от потерь до 0,5–0,9 т/га семян подсолнечника по сравнению с данными в хозяйственном контроле (1,7 т/га). Проведенные расчеты показали, что на фоне изменения сорно-полевого ценоза проявилась экономическая эффективность химпрополки. В вариантах с применением гербицидов стоимость вырученных денежных средств составляла 21000–23000 руб./га против 15000 руб./га на хозяйственном контроле. На фоне применения Гаура, КЭ в дозах 0,8 и 1,0 л/га уровень рентабельности составлял 114 и 122 % соответственно.

Ключевые слова: подсолнечник (Helianthus annuus L.), амброзия (Ambrosia artemisiaflia L.), гербициды, агроэкосистемы, сорные растения, засоренность посевов.

Поступила 15.11.2024, одобрена после рецензирования 02.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Тарчоков Х. Ш., Бжинаев Ф. Х., Тутукова Д. А. Эффективность химпрополки в борьбе с амброзией полыннолистной и другими сорняками на посевах подсолнечника в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 227–236. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-227-236

Original article

Efficiency of chemical weeding in the fight against ragweed and other weeds on sunflower crops in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic

Kh.Sh. Tarchokov, F.Kh. Bzhinaev, D.A. Tutukova✉

Institute of Agriculture –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street

© Тарчоков Х. Ш., Бжинаев Ф. Х., Тутукова Д. А., 2024

Abstract. The studies were conducted in 2021–2023 to suppress weeds, including a particularly dangerous object of internal quarantine in our country, common ragweed (Ambrosia artemisiaflia L.) in sunflower (Helianthus annuus L.) crops. In 2021–2023, the effect of Gaur, KE (240 g/l) and Gezagard, KS (500 g/l) herbicides on weed infestation of Master sunflower crops was studied in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic. The experimental design included comparison of variants with and without a herbicide background at different application rates: 1 – control (economic); 2 – control without weeds (weeds were removed manually as they appeared on crops during the sunflower growing season); 3, 4; 5 – application of different doses of herbicides to the soil. A high degree of suppression of common ragweed (85.0–90.8 %) and other species (73.0–89.6 %) was noted against the background of application of the soil herbicide Gaur, KE in doses of 0.8 and 1.0 l/ha, applied to the soil under "blind" harrowing. This protects against losses of up to 0.5–0.9 t/ha of sunflower seeds compared to the data in the farm control (1.7 t/ha). The calculations showed that against the background of changes in the weed-field cenosis, the economic efficiency of chemical weeding was revealed. In the variants with the use of herbicides, the cost of proceeds was 21,000–23,000 rubles/ha against 15,000 rubles/ha in the farm control. When using Gaur and EC at doses of 0.8 and 1.0 l/ha, the profitability level was 114 and 122 %, respectively.

Keywords: sunflower (Helianthus annuus L.), ragweed (Ambrosia artemisiaflia L.), herbicides, agroecosystems, weeds, crop infestation.

Submitted 15.11.2024, approved after reviewing 02.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Tarchokov Kh.Sh., Bzhinaev F.Kh., Tutukova D.A. Efficiency of chemical weeding in the fight against ragweed and other weeds on sunflower crops in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 227–236. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-227-236

Введение

Исследованиями ряда авторов установлено, что для нормального обеспечения населения земли продовольствием необходимо увеличить производство продукции сельского хозяйства к первой половине текущего столетия на 75 % [1].

Это подтверждается систематическим ростом площадей посевов в России в 3,7 раза к 2022 г. по сравнению с данными 1990 г. Расширение площадей под посевами в различных регионах Российской Федерации будет экономически целесообразным при условии научно обоснованных методов удаления сорняков на посевах [2].

Одним из ведущих методов решения этой проблемы является ликвидация вредоносности сорняков на посевах основных полевых культур, в том числе и подсолнечника. Подсолнечник культурный (Helianthus annuus L.) семейства астровых, род подсолнечник – основная культура для производства масла в отрасли пищевой промышленности.

Отходы подсолнечника в виде жмыха широко применяются в кондитерской промышленности, служат ценной добавкой к корму животных и обеспечивают высокую сбалансированность рациона животных по протеину, что снижает перерасход средств в процессе производства продукции животноводства. Подсолнечник – главнейшее полевое растение, возделываемое во многих регионах Российской Федерации, в том числе и в Кабардино-Балкарии, с целью производства в основном растительного пищевого масла. По данным Минсельхоза Российской Федерации (2022), посевы этой культуры занимали 10,0 млн/га [3].

В структуре посевных площадей Кабардино-Балкарии подсолнечнику отводится из посевной площади в 280,0 тыс./га не более 20–22 тыс./га при средней урожайности маслосемян по зонам 2,61 т/га.

Однако эта продуктивность подсолнечника в условиях его выращивания на предкавказских черноземах не «дотягивает» до оптимальных параметров урожая семян, потенциально

заложенных в сортах (гибридах) оригинаторами. И одной из ведущих причин этого является высокая засоренность посевов культуры. Среди представителей сорно-полевого сообщества в полевом агроценозе степной природно-климатической зоны Кабардино-Балкарии особое место занимает амброзия полыннолистная – объект внутреннего карантина в нашей стране.

Однако в посевах подсолнечника в полевом земледелии обозначенной зоны республики вредоносность таких видов сорняков, как щирица запрокинутая (Amaranthus retroflexus L.), марь белая (Chenopodium album L.), щетинники – сизый (Setaria glauca L.) и зеленый (Setaria virioles L.), просо куриное (Echinochloa crus- galli L.), горчица полевая (Sinapis arvensis L.), дымянка лекарственная (Fumaria officinalis L.) и др. очень высока, они проявляют серьезную конкуренцию для культуры за элементы питания, влагу и свет.

Наряду с основными элементами технологии (обработка почвы, применение оптимальных доз питательных элементов, научно обоснованные нормы высева, своевременное и качественное использование средств защиты растений и др.) особое внимание должно быть уделено уровню засоренности участка, где будут размещены посевы подсолнечника [4].

Однако в сорно-полевом сообществе в агроценозах полевых культур, в том числе и подсолнечника, особое место по вредоносности отводится амброзии полыннолистной: она является объектом внутреннего карантина, и ее произрастание и плодоношение на полях севооборотов, обочинах дорог, приусадебных участках недопустимо; развивая мощную корневую систему и надземную массу, она занимает ведущее положение по расходу воды (более 900 единиц) на образование единицы сухого вещества, что превышает в два раза расходуемое культурными злаками количество воды [5]; во время цветения амброзия может вызывать у людей заболевание, именуемое сенной лихорадкой.

Поэтому разработка эффективных способов исключения вредоносности сорняков, в том числе и амброзии, на посевах подсолнечника в условиях степной природно-климатической зоны Кабардино-Балкарии весьма актуальна.

Независимость от зарубежной продукции также актуальна и «рождает» новые адаптивные методы совершенствования технологии возделывания подсолнечника с использованием гербицида отечественного производства в борьбе с амброзией полыннолистной и другими видами малолетних сорняков в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии. На это нацелены научно-исследовательские работы по «Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период – 2021–2023 гг.» [6].

Цель исследований – определить влияние сорных растений, в том числе и амброзии, на семенную продуктивность выращивания подсолнечника сорта Мастер в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии. Для достижения этой цели решали следующие задачи:

− определить уровень засоренности посевов подсолнечника в вариантах с агротехническими и химическими приемами подавления сорняков;

− изучить техническую эффективность отечественного гербицида Гаур, КЭ в различных дозах с препаратом зарубежного производства (Гезагард, КС в дозе 3,0 л/га);

− установить хозяйственную и экономическую эффективность различных приемов ухода в борьбе с сорняками в посевах подсолнечника.

Материалы и методика исследования

Работу выполняли на экспериментальном участке лаборатории технологии возделывания полевых культур Института сельского хозяйства – филиала «Федерального научного центра «Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук» (ИСХ КБНЦ РАН), расположенном по адресу: Кабардино-Балкарская Республика, Терский район, пос. Опытный. Почва опытного участка – обыкновенный (карбонатный) чернозем тяжелого грануло-

метрического состава с содержанием в пахотном (0…20 см) слое гумуса – 3,0…3,5 %, подвижного фосфора – 15,6…28,7, обменного калия – 360…430 мг/кг (по Мачигину), pH водной вытяжки – 6,8…7,0 ед. Полевой опыт закладывали на подсолнечнике в севообороте с короткой ротацией с чередованием культур кукуруза – подсолнечник – озимая пшеница – горох. Под основную обработку почвы (культурная вспашка на глубину 25…28 см) вносили (NPK по 60 кг/га д.в.). Фосфор и калий – осенью под основную обработку почвы, а азот – весной.

Засоренность посевов определяли количественно-весовым методом трижды: в период полных всходов, спустя 28–30 суток после внесения гербицидов и перед завершением вегетационного периода.

Учет урожая маслосемян проводили методом ручного обмолота растений с учетной площади делянок. Урожайные данные обрабатывали методом дисперсионного анализа [7]. В опыте во все годы исследований высевали сорт подсолнечника Мастер селекции ВНИИМК им. В. С. Пустовойта.

Сорт относится к среднеспелой группе, период от всходов до уборочной спелости – 120–125 суток. Средние значения по сорту: высота растений – 210–220 см, масличность семян – 53–55 %, урожайность семян – 3,6–4,0 т/га, сбор масла – 1,7–1,9 т/га.

Регион допуска – Северо-Кавказский, в том числе и Кабардино-Балкария. Обладает комплексной устойчивостью к ложной мучнистой росе, толерантен к фомопсису, отзывчив на высокий агрофон и влагообеспеченность, экологически пластичен. В качестве эталона использовали Гезагард, КС ООО «Сингента» в дозе 3,0 л/га, внесенный в почву перед всходами подсолнечника под «слепое» боронование. Из группы дифениловых эфиров испытывали Гаур, КЭ АО «Август» отечественного производства в дозах 0,8 и 1,0 л/га. Схема опыта включала следующие варианты:

1. Контроль-1 хозяйственный (два рыхления междурядий – первое в фазе одной-двух пар настоящих листьев подсолнечника; второе – 3-5 листьев).

2. Контроль-2 (без сорняков, сорные растения удалялись вручную по мере их отрастания в течение вегетации подсолнечника).

3. Гезагард, КС – 3,0 л/га (эталон).

4. Гаур, КЭ – 0,8 л/га.

5. Гаур, КЭ – 1,0 л/га.

Гербициды вносили ранцевым опрыскивателем «Автомакс-10» перед всходами подсолнечника под «слепое» боронование с расходом рабочего раствора 250-300 л/га. Варианты в опыте располагались систематическим методом в два яруса 4-кратной повторности. Площади делянок: общая составляла 120, учетная – 80 м^2.

Рыночная стоимость гербицидов на 01.01.2023 г. составила для: Гезагарда – 1336,92 и Гаура – 2278,10 руб./л. Закупочная цена продовольственных семян подсолнечника на эту же дату составила 10,0 руб./кг.

На вариантах приемов ухода без химпрополки проведены два рыхления междурядий: испытываемые дозы гербицидов вносили в почву на этих фонах.

Технология возделывания подсолнечника на семена – общепринятая для степной зоны республики [8].

Метеорологические условия существенно различались по годам и отличались от среднемноголетних данных (табл. 1).

Из приведенных данных видно, что наиболее высокие величины по осадкам были в 2021 и 2023 гг. (509,6 и 613,5 мм соответственно). Они превосходили климатическую норму на 39,6 и 143,5 мм соответственно. В 2022 г. количество выпавших осадков составило 348,5 мм, что меньше нормы на 121,2 мм. Средняя температура воздуха (12,4…13,0 °С) превосходила обычные значения за эти годы на 2,3…2,9 °С при относительной влажности 77,0 % в 2022 г., 79,0 и 78,0 % в 2021 и 2023 гг. при норме 77,0 %.

Таблица 1. Метеоусловия в годы проведения исследований (по данным агрометеорологического поста «Куян», пос. Опытный Терского района КБР)

Table 1. Weather conditions during the years of the study (according to the data of the Kuyan agrometeorological post, village Opytnoe of the Tersk district of the KBR)

Год	Осадки, мм	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %
2021	613,5	13,0	79,0
2022	348,8	12,7	77,0
2023	509,6	12,4	78,0
Среднемноголетние данные (норма)	470,0	10,1	77,0

В посевах подсолнечника произрастало более 30 видов сорняков, относящихся к различным ботаническим семействам. Многолетние сорняки (виды осотов, вьюнок полевой, гумай, пырей ползучий и др.), произраставшие в незначительных количествах и куртинами, в течение вегетации были удалены вручную. Таким путем сформировали малолетний злаково-двудольный тип засоренности посева. Среди этого сорно-полевого сообщества доминировали амброзия полыннолистная, щирица запрокинутая, горчица полевая, лисохвост полевой, марь белая, дымянка лекарственная, овсюг полевой, просо куриное и др.

Амброзия полыннолистная выступает объектом внутреннего карантина в нашей стране. По этой причине в средствах массовой информации южных регионов, в том числе и в Кабардино-Балкарии, ежегодно объявляются (периоды массового цветения сорняка – август-сентябрь) месячники по борьбе с амброзией полыннолистной. Несмотря на это она занимает все больше площадей у земледельцев различных форм собственности.

Результаты и обсуждение

Исследованиями ряда гербологов установлено, что до 30 % сохраненного урожая обеспечивается в результате использования гербицидов [4]. Подобное явление подтверждается тем, что в известных агроэкосистемах с культурными растениями взаимодействуют многие виды организмов, в том числе и сорные растения [9, 10].

Среди сорно-полевого сообщества в полевом растениеводстве особой вредоносностью обладает амброзия полыннолистная. Об этом свидетельствуют и данные наших исследований (табл. 2).

Таблица 2. Засоренность посевов подсолнечника в период всходов в зависимости от приемов ухода (среднее за 2021–2023 гг.)

Table 2. Contamination of sunflower crops during the germination period, depending on care methods (average for 2021–2023)

Вариант	Всего сорняков		В том числе амброзия	
	шт./м^2	% гибели	шт./м^2	% гибели
Контроль-1 (хозяйственный)	108,0	–	27,0	–
Контроль-2 (без сорняков)	–	100	–	100
Гезогард, КС – 3,0 л/га (эталон)	22,0	70,4	15,0	44,5
Гаур, КЭ – 0,8 л/га	18,0	83,3	8,0	70,4
Гаур, КЭ – 1,0 л/га	9,0	91,7	5,0	81,5
$НСР_{05}$	1,3	–	1,6	–

На хозяйственном контроле зафиксировано наибольшее количество сорняков (108,0 шт./м^2) и амброзии полыннолистной (27,0 шт./м^2) в период полных всходов культуры. Опрыскивание посевов гербицидами почвенного действия под «слепое» боронование подавляет значительную часть малолетних сорняков (70,4–91,7 %), в том числе амброзии полыннолистной (44,5–81,5 %). Высокая техническая эффективность испытываемых гербицидов не снижалась и спустя 28–30 суток после химобработки посевов подсолнечника (табл. 3).

Таблица 3. Влияние приемов ухода на засоренность посевов подсолнечника (среднее за 2021–2023 гг.)

Table 3. The effect of care techniques on the contamination of sunflower crops (average for 2021–2023)

Вариант	Амброзия		Другие виды	
	всего	% гибели	всего	% гибели
Численность сорняков через 28-30 суток после внесения гербицидов, шт./м^2				
Контроль-1 (хозяйственный)	35,0	–	160	–
Контроль-2 (без сорняков)	–	100	–	100
Гезагард, КС – 3,0 л/га (эталон)	13,0	63,0	53,0	67,0
Гаур, КЭ – 0,8 л/га	3,0	91,4	11,0	93,0
Гаур, КЭ – 1,0 л/га	1,0	97,1	5,0	96,9
$НСР_{05}$	1,2	–	2,0	–
Масса сорняков перед уборкой урожая, г/м^2				
Контроль-1 (хозяйственный)	87,0	–	260	–
Контроль-2 (без сорняков)	–	100	–	100
Гезагард, КС – 3,0 л/га (эталон)	32,0	63,2	109,0	41,9
Гаур, КЭ – 0,8 л/га	13,0	85,0	70,0	73,0
Гаур, КЭ – 1,0 л/га	8,0	90,8	27,0	89,6
$НСР_{05}$	2,5	–	2,1	–

Для других видов сорняков общая численность на хозяйственном контроле составляла 160,0 шт./м^2 и 260,0 г/м^2 сырой надземной массы. Уровень снижения засоренности посевов подсолнечника по амброзии составил 63,0–97,1 шт./м^2 по количеству и 63,2–90,8 г/м^2 по массе к уборке урожая.

Засоренность посевов несколько возросла по отношению к первоначальному учету по другим видам сорняков (160,0 против 108,0 шт./м^2), тогда как по злостному сорняку амброзии численность сохраняется практически на одном и том же уровне.

При этом в варианте с применением Гаура, КЭ в дозе 1,0 л/га амброзия полыннолистная погибает на 90,0 %, а другие виды сорных малолетников – на 89,6 %. Различная степень засоренности посевов подсолнечника к периоду завершения его вегетации (к уборке урожая семян) повлияла и на его семенную продуктивность (табл. 4).

Так, на хозяйственном контроле урожайность маслосемян не превышала 0,15 т/га в среднем за годы исследований. В варианте контроль-2, где в течение вегетации растения подсолнечника были свободны от конкуренции со стороны сорно-полевого сообщества, урожайность была наивысшей (0,23 т/га). Это обеспечивает сохранение от потерь до 0,89 т/га семян по сравнению с данными на хозяйственном контроле.

Таблица 4. Хозяйственная эффективность различных приемов ухода в борьбе с амброзией и другими сорняками в посевах подсолнечника в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии

Table 4. Economic efficiency of various care methods in the fight against ragweed and other weeds in sunflower crops in the conditions of the steppe zone of Kabardino-Balkaria

Вариант	Урожайность маслосемян в среднем за 2021–2023 гг., т/га	Сохраненный урожай семян в т/га от:	
		контроля-1	эталона
Контроль-1 (хозяйственный)	1,5	–	–
Контроль-2 (без сорняков)	2,3	0,8	+0,2
Гезагард, КС – 3,0 л/га (эталон)	2,1	0,6	–
Гаур, КЭ – 0,8 л/га	2,1	0,6	–
Гаур, КЭ – 1,0 л/га	2,3	0,8	+0,2
$НСР_{05}$	0,2	–	–

В агротехнологиях возделывания полевых культур в борьбе с сорняками важнейшее значение имеет определение величины экономической эффективности производства урожая [9, 10].

В варианте с применением Гаура, КЭ в дозе 0,8 л/га урожай семян формировался такой же по величине этого показателя (2,1 т/га), как и в варианте с применением эталона Гезагард, КС в дозе 3,0 л/га.

По сравнению с результатами на хозяйственном контроле (1,5 т/га) достоверная прибавка семян подсолнечника составляет 0,6 т/га.

В варианте применения Гаура в дозе 1,0 л/га урожайность маслосемян культуры составляла 2,3 т/га, или на уровне данных варианта без сорняков в течение вегетации подсолнечника.

На фоне изменения сорно-полевого ценоза довольно контрастно проявилась экономическая эффективность химпрополки с целью подавления злостного сорняка амброзии полыннолистной и других видов малолетников в посевах подсолнечника на предкавказских (карбонатных) черноземах тяжелого гранулометрического состава в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии (табл. 5).

Таблица 5. Экономическая эффективность применения гербицидов в борьбе с амброзией полыннолистной в посевах подсолнечника в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии (2021–2023 гг.)

Table 5. The economic efficiency of the use of herbicides in the fight against ragweed in sunflower crops in the steppe zone of Kabardino-Balkaria (2021–2023)

Показатель	Контроль-1 (хозяйственный)	Гербицид		
		Гезагард, КС-3,0 л/га (эталон)	Гаур, КЭ-0,8 л/га	Гаур, КЭ-1,0 л/га
Урожайность, т/га	1,5	2,1	2,1	2,3
Стоимость продукции, руб./га	15000	21000	21000	23000
Производственные затраты, руб./га	8100	12200	9820	10370
Условно чистый доход, руб./га	6900	8800	11180	12630
Рентабельность, %	85,0	72,0	114,0	122,0

Стоимость вырученных денежных средств в среднем за годы проведения исследований на хозяйственном контроле не превышала 15000 руб./га.

В вариантах с применением химпрополки величина этого показателя составляла 21000–23000 руб./га, что превышает результаты контроля на 6000–8000 руб./га. Производственные затраты при возделывании культуры (основная, предпосевная обработка почвы, приобретение гербицидов, их доставка в хозяйство и внесение в почву, уборка урожая и его доставка в складские помещения) составляли по вариантам: контроль – 8100 руб./га, Гезагард, КС в дозе 3,0 л/га – 12200 руб./га, Гаур, КЭ в дозах 0,8 и 1,0 л/га – 9820 и 10370 руб./га соответственно. В вариантах опыта формировался различный уровень условно чистого дохода. На хозяйственном контроле величина этого показателя не превышала 6900 руб./га против 11180–12630 руб./га, полученных в вариантах с использованием Гезагарда, КС в дозе 3,0 л/га и Гаура, КЭ в дозах 0,8 и 1,0 л/га, на фоне Гаура, КЭ в дозах 0,8 и 1,0 л/га уровень рентабельности составлял 114 и 122 % соответственно против 72 % в варианте с использованием Гезагарда и 85 % на контроле.

Выводы

В борьбе с амброзией полыннолистной и другими видами малолетних сорняков в посевах подсолнечника в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии доказана высокая эффективность применения гербицидов. При возделывании подсолнечника с целью повышения технической и хозяйственной эффективности вместо препарата зарубежного производства Гезагард, КС в дозе 3,0 л/га следует использовать гербицид отечественного производства Гаур, КЭ в дозе 0,8 л/га.

В такой дозе Гаур, КЭ подавляет амброзию полыннолистную на 96,0 %, а другие виды малолетних сорняков – на 91,4 % по количеству и на 91,7 % по массе к уборке урожая маслосемян культуры. В варианте с внесением Гаур, КЭ в дозе 1,0 л/га урожай семян подсолнечника был наивысшим в опыте – 2,3 т/га против 1,5 т/га в варианте с применением эталона.

Результатами проведенных исследований доказана возможность замены гербицида зарубежного производства Гезагард, КС на препарат отечественного производства Гаур, КЭ в борьбе с амброзией полыннолистной и другими видами малолетних сорняков в посевах подсолнечника в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаренко В. А.* Особенности развития технологий защиты растений в агроэкосистемах в условиях рыночной экономики России // Агрохимия. 2023. № 8. С. 45–57. DOI: 10.31857/S0002188123080112

2. *Вошедский Н. Н., Кулыгин В. А.* Влияние элементов технологии возделывания на урожайность подсолнечника в Ростовской области // Земледелие. 2023. № 8 С. 23–27. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-8-23-27

3. *Кривошлыков К. М., Макарская Е. Ю.* Роль севооборота в экономике производства подсолнечника в Российской Федерации // Масличные культуры. 2023. № 3(195). С. 58–62. DOI: 10.25230/2412-608X-2023-3-195-58-62

4. *Курдюкова О. Н.* Засоренность посевов и продуктивность короткоротационных севооборотов степной зоны // Вестник КрасГАУ. 2022. № 7(184). С. 69–75. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-7-69-76

5. *Васильев Д. С.* Амброзия полыннолистная и борьба с ней // Советская Кубань. Краснодар: Кн. изд-во, 1958. 85 с.

6. *Завалин А. А.* Проблемы и пути решения технологического развития земледелия // Земледелие. 2024. № 2. С. 25–29. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-2-25-29

7. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

8. *Тарчоков Х. Ш.* Агротехнологические методы подавления сорняков на посевах подсолнечника // Научная жизнь. 2019. Т. 14. № 10(98). С. 1539–1546. DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1539-1546

9. *Гасич Е. Л., Гомжина М. М., Хлопунова Л. Б., Ганнибал Ф. Б.* Первая находка Stagonosporopsis heliopsidis (Pleosporales) на территории России и перспективы его применения против амброзии полыннолистной // Микология и фитопатология. 2018. Т. 52. № 4. С. 277–290. DOI: 10.1134/S0026364818040062

10. *Gaevaya E.A., Ilyinskaya I.N., Bezuglova O.S. [et al.]* Soil protection measures during sunflower farming on slopes of Rostov oblast // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 624(1):012223. DOI: 10.1088/1755-1315/624/1/012223

REFERENCES

1. Zakharenko V.A. Features of the development of plant protection technologies in agroecosystems in the conditions of the market economy of Russia. *Agrohimiya* [Agrochemistry]. 2023. No. 8. Pp. 45–57. DOI: 10.31857/S0002188123080112. (In Russian)

2. Voshedskiy N.N., Kulygin V.A. Influence of elements of cultivation technology on the yield of sunflower in the Rostov region. *Zemledelie* [Agriculture]. 2023. No. 8 Pp. 23–27. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-8-23-27. (In Russian)

3. Krivoshlykov K.M., Makarskaya E.Yu. The role of crop rotation in the economy of sunflower production in the Russian Federation. *Maslichnye kul'tury* [Oilseed crops]. 2023. No. 3(195). Pp. 58–62. DOI: 10.25230/2412-608X-2023-3-195-58-62. (In Russian)

4. Kurdyukova O.N. Weed infestation of crops and productivity of short-rotation crop rotations in the steppe zone. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasSAU]. 2022. No. 7(184). Pp. 69–75. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-7-69-76. (In Russian)

5. Vasiliev D.S. *Ambroziya polynnolistnaya i bor'ba s ney* [Common ragweed and its control]. *Sovetskaya Kuban'. Krasnodar: Kn. izd-vo*, 1958. 85 p. (In Russian)

6. Zavalin A.A. Problems and solutions for technological development of agriculture. *Zemledelie* [Agriculture]. 2024. No. 2. Pp. 25–29. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-2-25-29. (In Russian)

7. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Methodology of field experiment]. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p. (In Russian)

8. Tarchokov Kh.Sh. Agrotechnological methods of weed suppression in sunflower crops. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life]. 2019. Vol. 14. No. 10(98). Pp. 1539–1546. DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1539-1546. (In Russian)

9. Gasich E.L., Gomzhina M.M., Khlopunova L.B., Gannibal F.B. The first find of Stagonosporopsis heliopsidis (Pleosporales) in Russia and prospects for its use against common ragweed. *Mikologiya i fitopatologiya* [Mycology and phytopathology]. 2018. Vol. 52. No. 4. Pp. 277–290. DOI: 10.1134/S0026364818040062 (In Russian)

10. Gaevaya E.A., Ilyinskaya I.N., Bezuglova O.S. [et al.] Soil protection measures during sunflower farming on slopes of Rostov oblast. IOP Conference Series Earth and Environmental Science 624(1):012223. DOI: 10.1088/1755-1315/624/1/012223

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Тарчоков Хасан Шамсадинович, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., лаборатория технологии возделывания полевых культур, Институт сельского хозяйства – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

ishkbncran@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6187-7354; SPIN-код: 1654-5614

Бжинаев Феликс Хасанович, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., зав. лабораторией технологии возделывания полевых культур, Институт сельского хозяйства – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

ishkbncran@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6255-0396

Тутукова Джулета Алексеевна, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом научно-технической информации, Институт сельского хозяйства – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

djudi_12@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9682-9117; SPIN-код: 7294-5435

Information about the authors

Khasan Sh. Tarchokov, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Field Crops Cultivation Technology, Institute of Agriculture – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

ishkbncran@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6187-7354; SPIN-code: 1654-5614

Felix Kh. Bzhinaev, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Field Crops Cultivation Technology, Institute of Agriculture – Branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

ishkbncran@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6255-0396

Dzhuleta A. Tutukova, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Scientific and Technical Information, Institute of Agriculture – Branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

djudi_12@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9682-9117; SPIN-code: 7294-5435

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

УДК 633.854.78:631.51/8(470.621) Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-237-248
EDN: PNXYZC

Потенциал гибридов подсолнечника в зависимости от обработки почвы и удобрений

Л. Н. Тхакушинова, Н. И. Мамсиров✉

Майкопский государственный технологический университет
385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191

Аннотация. Подсолнечник – основная масличная культура Республики Адыгея. В наборе агротехнических мероприятий, применяемых при его возделывании, особенно важны использование перспективных гибридов, выбор соответствующих приемов обработки почвы и оптимизация системы питания растений. В связи с этим на том или ином этапе онтогенеза внесение минеральных удобрений наряду с проведением некорневой подкормки позволяет существенно активизировать рост не только корневой системы, но и надземной массы подсолнечника, а это влечет увеличение урожайности семян. Основная цель исследования заключалась в установлении уровня продуктивности и показателей качества семян перспективных гибридов подсолнечника в условиях предгорной зоны Республики Адыгея в зависимости от элементов технологии их возделывания. Экспериментальное исследование по установлению влияния способов основной обработки почвы (отвальная вспашка – 25–27 см и глубокое рыхление – 35–40 см), доз азотно-фосфорных ($N_{30}P_{30}$) удобрений и некорневой подкормки (Биостим масличный, 1,0 л/га и Ультрамаг Бор, 0,5 л/га) на продуктивные и качественные показатели семян гибридов подсолнечника осуществлялось по «Методике опытного дела» Б. А. Доспехова. Повторность опыта – 3-кратная, учетная площадь – 50 м². Размещение вариантов – систематическое. Норма высева – 60 тыс. шт./га. Предшественник – озимая пшеница. В результате исследований установлен наиболее эффективный способ повышения урожайности и качества семян подсолнечника, а именно – возделывание районированных гибридов (Спринт, Горстар, Ирэн и Арис), максимально адаптированных к агроклиматическим условиям региона. Определены оптимальные условия для успешного роста и полноценного развития гибридов подсолнечника. Установлено достижение оптимальных показателей продуктивности на фоне азотно-фосфорных удобрений с некорневой подкормкой ($N_{30}P_{30}$+НП) по отвальной вспашке, где достигается максимальная урожайность, – в среднем 3,0 т/га по гибриду Спринт. Разница в урожайности по обработкам почвы между отвальной вспашкой и глубоким рыхлением была на уровне 8,3 %. В среднем по опыту на вариантах основной обработки почвы масличность семян была на уровне 48,3 и 44,4 % соответственно.

Ключевые слова: подсолнечник, глубокое рыхление, масличность семян, Биостим масличный, Ультрамаг Бор, отвальная вспашка, удобрение, урожайность

Поступила 15.10.2024, одобрена после рецензирования 29.10.2024, принята к публикации 18.11.2024

Для цитирования. Тхакушинова Л. Н., Мамсиров Н. И. Потенциал гибридов подсолнечника в зависимости от обработки почвы и удобрений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 237–248. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-237-248

© Тхакушинова Л. Н., Мамсиров Н. И., 2024

Original article

Potential of sunflower hybrids depending on soil cultivation and fertilizers

L.N. Thakushinova, N.I. Mamsirov✉

Maikop State Technological University
385000, Russia, Maikop, 191 Pervomayskaya street

Abstract. Sunflower is the main oilseed crop of the Republic of Adygea. The use of promising hybrids and the choice of appropriate soil cultivation techniques as well as optimization of the plant nutrition system are especially important among the set of agro-technical measures used in its cultivation. In this regard, the introduction of mineral fertilizers along with topdressing at some stage of ontogenesis, allows to activate the growth of not only the root system, but also the aboveground mass of sunflower, and this entails an increase in seed yield. The main objective of the research is establishing the productivity level and seed quality indicators of promising sunflower hybrids in the conditions of the foothill zone of the Republic of Adygea, depending on the elements of their cultivation technology. Experimental studies on establishing the effect of primary soil cultivation methods (moldboard plowing – 25–27 cm and deep loosening – 35–40 cm), doses of nitrogen-phosphorus ($N_{30}P_{30}$) fertilizers and topdressing (oilseed Biostim, 1.0 l/ha and Ultramag Bor, 0.5 l/ha) on the productivity and quality indicators of sunflower hybrid seeds was carried out according to B.A. Dospekhov's Methodology of Experimental Work. The repetition of an experiment was threefold, the accounting area was 50 m². The placing of options was systematic. The seeding rate was 60 thousand pcs./ha. Winter wheat served as a predecessor. As a result of the research the most effective way to increase the yield and quality of sunflower seeds has been established, namely, the cultivation of zoned hybrids (Sprint, Gorstar, Irene and Aris), that are maximally adapted to the agroclimatic conditions of the region. Optimal conditions for the successful growth and full development of sunflower hybrids have been determined. It has been established that optimal indicators are achieved against the background of nitrogen-phosphorus fertilizers with topdressing ($N_{30}P_{30}$+FF) by moldboard plowing, where the maximum yield achieved is an average of 3.0 t/ha for the Sprint hybrid. The difference in the yield depending on soil was marked at the level of 8.3 %. On average, according to the experiment, in the variants of primary soil cultivation, the oil content of seeds was at the level of 48.3 and 44.4 %, respectively.

Keywords: sunflower, deep loosening, oil seeds, oilseed Biostim, Ultramag Bor, moldboard plowing, fertilizer, yield

Submitted 15.10.2024, approved after reviewing 29.10.2024, accepted for publication 18.11.2024

For citation. Thakushinova L.N., Mamsirov N.I. Potential of sunflower hybrids depending on soil cultivation and fertilizers. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 5. Pp. 237–248. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-237-248

Введение

Подсолнечник является основным масличным растением в нашей стране. Концентрация подсолнечника в южных регионах России превысила все рекомендуемые нормы в структуре посевных площадей. В Республике Адыгея общая посевная площадь под подсолнечником составляет более двадцати тысяч гектаров. В структуре посевных площадей до 2015 года он занимал 13 %, а к 2023 году в отдельных районах и многих хозяйствах – от 28 до 46 %. Эти структурные изменения привели к тому, что хозяйства производили посев этой культуры по одноименному предшественнику через 2-3 года, вследствие чего растения на больших площадях поражались на 30–40 % и более ложной

мучнистой росой и склеротиниозом (белой гнилью). По этой причине значительные площади его пересевались другими культурами, а основные массивы оставались изреженными. Эту проблему возможно решить, сократив долю его включения в севообороты фермерских хозяйств и достигнув необходимого валового сбора за счет отработки основных элементов оптимальной агротехники выращивания потенциально продуктивных и высокомасличных гибридов подсолнечника, адаптированных к экологическим условиям конкретной зоны [1].

Возделывание подсолнечника экономически выгодно сельхозтоваропроизводителям Республики Адыгея и Кубани [2]. По результатам производства семян подсолнечника в последние годы рентабельность в регионе была довольно высокой и при средней себестоимости 16,0–17,0 тыс. руб./тонну по республике составила 55–58 %, а у передовых хозяйств уровень рентабельности доходил до 96,0–110,0 % [3, 4].

Использование адаптивных технологий – основа увеличения урожайности культуры не только в Адыгее, но и в других зонах России. Решить подобную стратегическую задачу можно путем постоянного роста культуры земледелия и максимально возможного повышения плодородия почв наряду с бережным и экономически рациональным расходованием ресурсов, уменьшением уровня потерь урожая вследствие негативного воздействия вредителей, болезней и сорной растительности [5, 6]. Адаптивные технологии по существу своему предполагают оптимизацию всех факторов, способных повлиять на урожайность и качественные характеристики растений [7].

Способы подготовки почвы зависят прежде всего от показателей засоренности и видового состава сорной растительности, от того, какое место занимает подсолнечник в севообороте. Безусловно, немаловажную роль играют агрофизические свойства почв, а также природно-климатические условия в зоне возделывания и, наконец, то, какая агротехнология будет применяться [8]. Наиболее высоки требования, предъявляемые к основной обработке почвы адаптивной технологией возделывания [9].

Особое внимание при разработке систем районирования следует уделять улучшению физических свойств почвы, которые впоследствии оказывают влияние на общий уровень урожайности культуры. Так, механическая обработка – важный фактор поддержания баланса гумуса в почве, а также плодородия почвы как такового [10, 11].

Увеличение урожайности подсолнечника отмечается в результате внесения удобрений – и органических, и минеральных. Согласно исследованиям ученых ФГБНУ «ФНЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», навоз, внесенный в дозе 20–40 т/га, дает повышение урожайности на 0,2–0,5 т/га, минеральные удобрения ($N_{45}P_{60}K_{45}$) – на 0,34 т/га [12]. Целесообразно внесение навоза в районах возделывания подсолнечника в качестве основной технической культуры севооборота. Хороший эффект наблюдается и от внесения его под культуру-предшественник. Минеральные удобрения ($N_{40}P_{60}$) вносят в степной и лесостепной зонах [2, 13].

Учитывая значительный рост посевных площадей под культурой, обусловленный высоким спросом на масличное сырье, наблюдающийся в России в последние годы, а также появление на рынке новых отечественных гибридов подсолнечника и органоминеральных удобрений, особо актуальным остается вопрос реализации потенциальной продуктивности подсолнечника в зависимости от этих факторов при возделывании по различным способам основной обработки почвы. Это позволит увеличить выход высококачественного масличного сырья в Республике Адыгея и в полной мере обеспечит им маслоперерабатывающую промышленность региона.

Цель исследования – установление уровня продуктивности и показателей качества семян перспективных гибридов подсолнечника в условиях предгорной зоны Республики Адыгея в зависимости от элементов технологии их возделывания.

Научная новизна исследования состоит в том, что на выщелоченном черноземе Республики Адыгея изучено влияние способов основной обработки почвы и удобрений на продуктивность различных гибридов подсолнечника, выявлены особенности роста и развития растений, уточнены элементы технологии возделывания и определено их влияние на биохимический состав семян.

В **задачу исследования** входило определение влияния способов основной обработки почвы (отвальная вспашка на глубину 25–27 см и глубокое рыхление на глубину 35–40 см), доз азотно-фосфорных удобрений ($N_{30}P_{30}$) и некорневой подкормки (Биостим масличный, 1,0 л/га + Ультрамаг Бор, 0,5 л/га) на рост, развитие, урожайность и масличность новых перспективных гибридов (Арис, Горстар, Ирэн и Спринт) подсолнечника.

Методы исследования

Исследования проведены в 2019–2021 гг. в АО «Заря» Шовгеновского района Республики Адыгея на выщелоченных черноземах. Объектом исследования являются гибриды подсолнечника селекции ФГБНУ «ФНЦ ВНИИМК им. В. С. Пустовойта»: Арис, Горстар, Ирэн и Спринт. В качестве предшественника выступает сорт озимой пшеницы Алексеич. Размещение вариантов по Б. А. Доспехову – систематическое [14]. Норма высева – 60 тыс. шт./га при трехкратной повторности на площади 105 м^2.

Для достижения поставленной цели проведен трехфакторный опыт:

1. Фактор А (гибрид) – Спринт, Горстар, Ирэн и Арис.

2. Фактор В (обработка почвы) – отвальная вспашка (глубина – 25–27 см); глубокое рыхление (глубина – 35–40 см).

3 Фактор С (доза удобрения) – контроль, без удобрений; Биостим масличный, 1,0 л/га и Ультрамаг Бор, 0,5 л/га (некорневая подкормка); $N_{30}P_{30}$ локально при посеве; $N_{30}P_{30}$ локально при посеве + Биостим масличный, 1,0 л/га и Ультрамаг Бор, 0,5 л/га (некорневая подкормка – НП).

Агротехника – общепринятая в предгорной зоне Адыгеи. Против сорной растительности на вариантах опыта использовали баковую смесь гербицидов Ацетал Про, КЭ (2,5 л/га) + Бриг, КС (3,0 л/га).

В годы исследований посев гибридов проходил в первой декаде мая. Всхожесть семян в полевых условиях предопределялась различием показателей температур и влагообеспеченности. Так, в среднем период от всходов до начала цветения у исследуемых гибридов подсолнечника составил около 62 суток у среднеспелого – Арис, 55 суток у среднеранних – Горстар и Ирэн и 48 суток у ультрараннего – Спринт. Период цветение – созревание у гибридов различался значительно и составлял 58; 42; 39 и 42 суток соответственно по гибридам.

Урожайность подсолнечника напрямую зависела от природно-климатических и погодных условий в период вегетации и достигала 2,81–3,15 т/га для испытуемых гибридов. Потенциальная продуктивность у них на достаточно высоком уровне, но достичь ее, согласно проведенному исследованию (рис. 1–2), возможно лишь при грамотном использовании внутренних и внешних факторов, а именно – обработки почв, минерального питания при соответствующем температурном режиме и осадках.

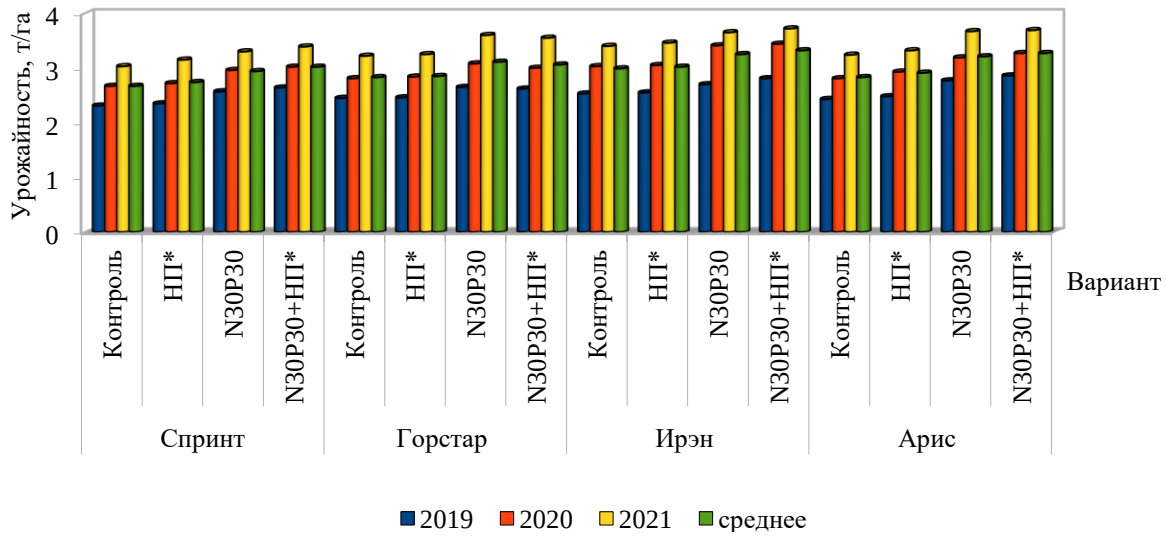


Рис. 1. Влияние удобрений на урожайность гибридов подсолнечника при отвальной вспашке, т/га (2019–2021 гг.)

Fig. 1. Effect of fertilizers on the yield of sunflower hybrids with moldboard plowing, t/ha (2019–2021)

Согласно полученным данным, наиболее оптимальным вариантом питания растений подсолнечника на фоне отвальной вспашки является $N_{30}P_{30}$+НП (Биостим масличный, 1,0 л/га + Ультрамаг Бор, 0,5 л/га (некорневая подкормка). На данном варианте опыта максимальная урожайность по всем гибридам зафиксирована в 2021 году – по гибриду Спринт – 3,39 т/га, Горстар – 3,55 т/га, Ирэн – 3,72 т/га и Арис – 3,69 т/га. При этом за годы исследования $НСР_{05}$ для частных средних составила 0,12 т/га. В среднем за 2019–2021 гг. урожайность исследуемых гибридов по вспашке составила 3,00 т/га ($НСР_{05}$ – 0,03 т/га). В среднем по гибридам она была: Спринт – 2,84 т/га, Горстар – 2,96 т/га, Ирэн – 3,15 т/га и Арис – 3,06 т/га ($НСР_{05}$ – 0,04 т/га). По доле влияния удобрений средняя урожайность гибридов выявлена на уровне 2,83; 2,88; 3,13 и 3,17 т/га ($НСР_{05}$ – 0,04 т/га).

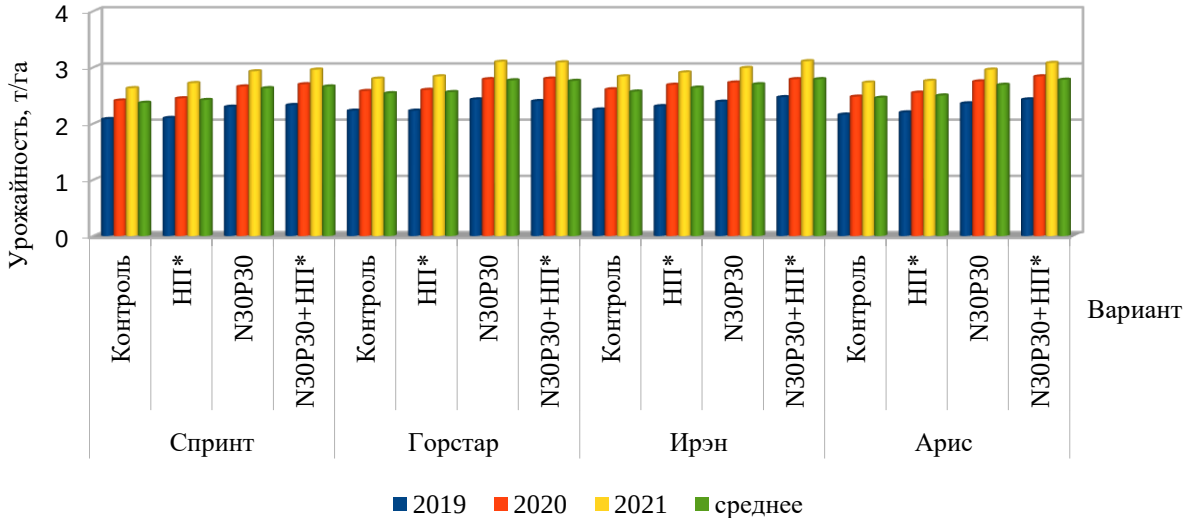


Рис. 2. Влияние удобрений на урожайность гибридов подсолнечника при глубоком рыхлении, т/га (2019–2021 гг.)

Fig. 2. Effect of fertilizers on the yield of sunflower hybrids with deep loosening, t/ha (2019–2021)

Анализ результатов исследования показал, что на фоне глубокого рыхления также наиболее оптимальным вариантом питания растений подсолнечника является $N_{30}P_{30}$+НП. На данном варианте опыта максимальная урожайность по всем гибридам зафиксирована также в 2021 году – наиболее оптимальном по условиям наличия продуктивной почвенной влаги. В целом по опыту получена высокая урожайность по всем исследуемым гибридам: Спринт – 2,96 т/га, Горстар – 3,09 т/га, Ирэн – 3,11 т/га и Арис – 3,08 т/га. При этом за годы исследования $НСР_{05}$ для частных средних – 0,12 т/га. В среднем за 2019–2021 гг. урожайность исследуемых гибридов по обработке почвы была 2,62 т/га ($НСР_{05}$ – 0,03 т/га). В среднем по гибридам она составила: Спринт – 2,68 т/га, Горстар – 2,81 т/га, Ирэн – 2,91 т/га и Арис – 2,96 т/га ($НСР_{05}$ – 0,04 т/га). По доле влияния удобрений в среднем урожайность гибридов оказалась на уровне 2,66; 2,71; 2,91 и 2,83 т/га ($НСР_{05}$ – 0,04 т/га).

Аккумуляция в семенах растений масла – биологически весьма значимое явление, так как оно является не только концентрированным энергетическим запасом, но и своеобразным строительным материалом. В мировом валовом производстве соевое масло занимает 1-е место из пищевых растительных масел, подсолнечное – 2-е место, последующие места занимают арахисовое, хлопковое, рапсовое и др. [2].

Изменения в питании изучаемого генотипа подсолнечника при внесении азотно-фосфорных удобрений с внекорневой подкормкой не привели к сколько-нибудь значимому повышению содержания масла в семенах. Рассматриваемый показатель определялся сортовыми характеристиками растения и используемыми способами основной обработки (рис. 3–4).

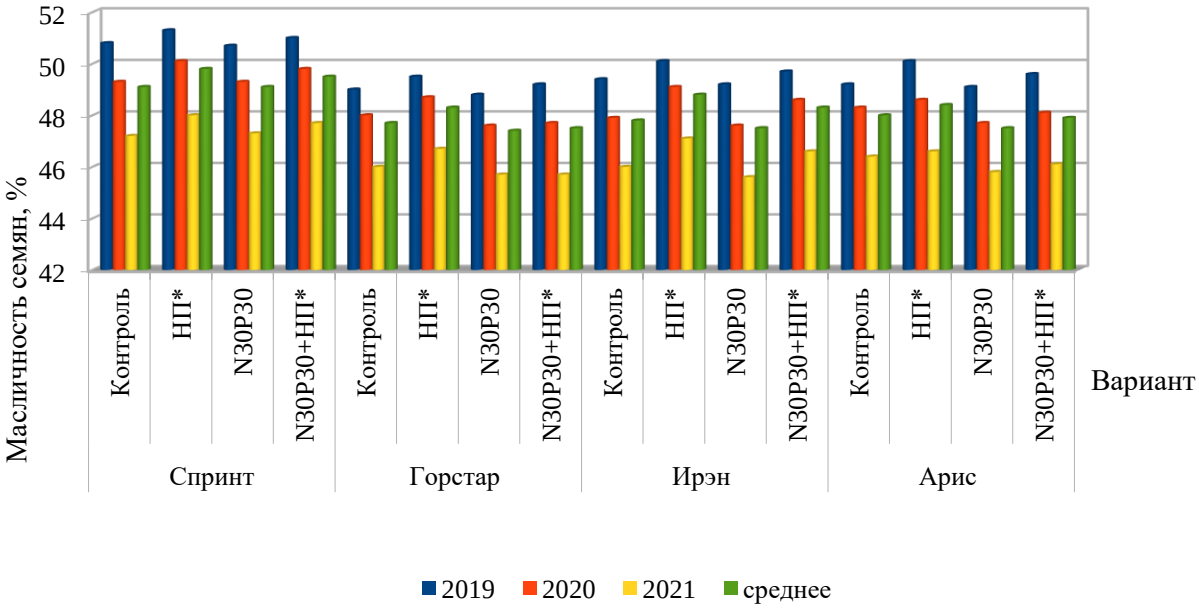


Рис. 3. *Масличность семян новых гибридов подсолнечника в зависимости от применения удобрений на фоне отвальной вспашки, % (2019–2021 гг.)*

Fig. 3. *Oil content of seeds of new sunflower hybrids depending on the use of fertilizers against the background of moldboard plowing, % (2019–2021)*

В ходе проведенных исследований максимальные показатели масличности семян на фоне вспашки по всем гибридам зафиксированы в наиболее засушливом 2019 году и составили по гибриду Спринт – 51,3 %, Горстар – 49,5 %, Ирэн и Арис – 50,1 %. При этом за годы исследования $НСР_{05}$ для частных средних была 0,3 %. В среднем за 2019–2021 гг.

масличность семян исследуемых гибридов по обработке почвы составила 48,3 % ($НСР_{05}$ – 0,1%). В среднем по гибридам она составила: Спринт – 49,4 %, Горстар – 47,7 %, Ирэн – 48,1 % и Арис – 48,0 % ($НСР_{05}$ – 0,1 %). По доле влияния удобрений в среднем масличность семян исследуемых гибридов составила 48,1; 48,8; 47,9 и 48,3 % ($НСР_{05}$ – 0,1 %).

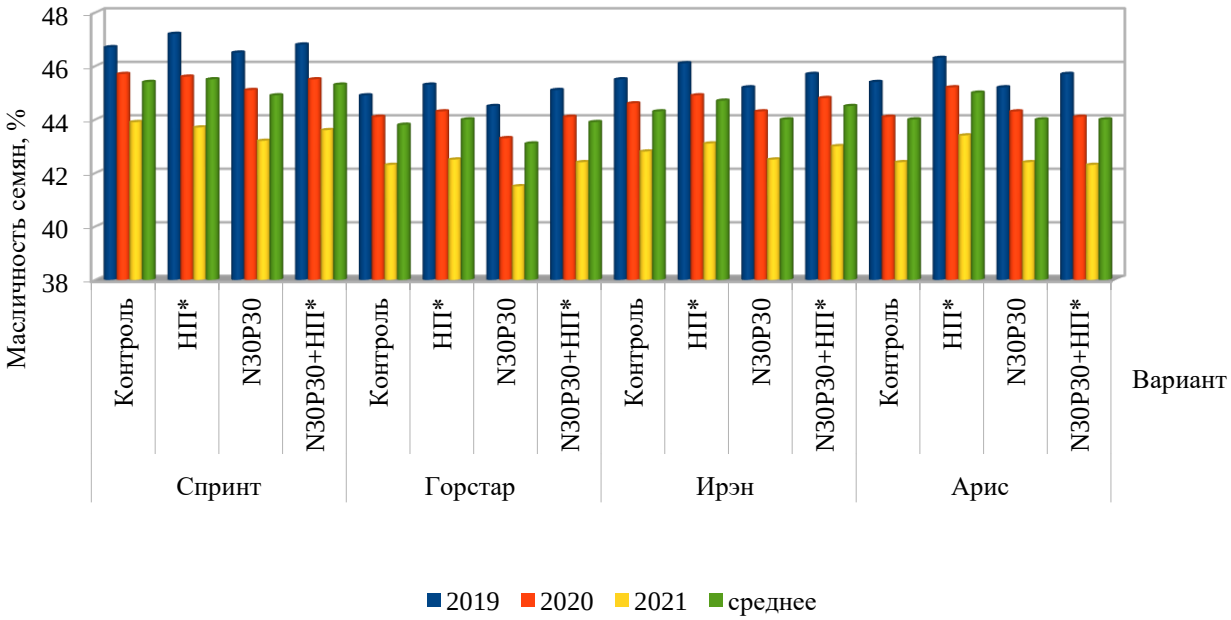


Рис. 4. *Масличность семян новых гибридов подсолнечника в зависимости от удобрений на фоне глубокого рыхления, % (2019–2021 гг.)*

Fig. 4. *Oil content of seeds of new sunflower hybrids depending on fertilizers against the background of deep loosening, % (2019–2021)*

Анализ результатов исследования показал, что на фоне глубокого рыхления максимальная масличность семян по всем гибридам зафиксирована также в 2019 году – наиболее засушливом по условиям увлажнения почвы. В целом получена высокая масличность по всем исследуемым гибридам, хотя и ниже, чем по отвальной вспашке: Спринт – 47,2 %, Горстар – 45,3 %, Ирэн – 46,1 % и Арис – 46,3 %. В среднем за 2019–2021 гг. масличность семян исследуемых гибридов по обработке почвы была 44,4 % ($НСР_{05}$ – 0,1 %). В среднем по гибридам она составила: по Спринту – 45,3 %, Горстар – 43,7 %, Ирэн – 44,4 % и Арису – 44,2 % ($НСР_{05}$ – 0,1 %). По доле влияния удобрений в среднем масличность семян исследуемых гибридов выявлена на уровне 46,2; 46,8; 45,9 и 46,4 % ($НСР_{05}$ – 0,1 %).

В целом установлено, что содержание масла в семенах гибридов подсолнечника варьировало в среднем от 47,7 до 49,4 % при отвальной вспашке и в пределах 43,7–45,3 % в варианте с глубоким рыхлением почвы. Полученные данные позволяют отметить определенное отрицательное воздействие глубокого рыхления почвы на итоговые качественные показатели семян изучаемых гибридов, в частности масличность, в отличие от отвальной вспашки, где этот показатель составляет в среднем 48,3 %, а на фоне рыхления – 44,4 % (разница в 3,9 %). В условиях эксперимента 2019–2021 годов наибольшее содержание масла было у гибрида Спринт, где оно в среднем составило 49,4 %, а при глубоком рыхлении почвы – 45,3 %.

Прежде чем рекомендовать внесение оптимальных доз подкормки растений для производства на больших площадях, что повлечет за собой дополнительные трудовые и денежные затраты, необходимо выяснить их целесообразность опытным путем (табл.)

Таблица. Экономическая эффективность возделывания гибридов подсолнечника в условиях опыта (среднее за 2019–2021 гг.)

Table. Economic efficiency of cultivation of sunflower hybrids under experimental conditions (average for 2019–2021)

Обработка почвы	Гибрид	Удобрения	Урожайность, т/га	Затраты, тыс. руб./га	Выручка от реализ. продукции, тыс. руб./га	Себестоимость семян, тыс. руб./ц	Условный чистый доход, тыс. руб./га	Уровень рентабельности, %
Отвальная вспашка	Спринт	Контроль	2,67	46,0	82,77	17,23	36,77	79,93
		НП	2,74	46,7	84,94	17,04	38,24	81,88
		$N_{30}P_{30}$	2,94	47,2	91,14	16,05	43,94	93,09
		$N_{30}P_{30}$+НП	3,02	47,9	93,62	15,86	45,72	95,45
	Горстар	Контроль	2,83	46,0	87,73	16,25	41,73	90,72
		НП	2,85	46,7	88,35	16,39	41,65	89,19
		$N_{30}P_{30}$	3,11	47,2	96,41	15,18	49,21	104,26
		$N_{30}P_{30}$+НП	3,06	47,9	94,86	15,65	46,96	98,04
	Ирэн	Контроль	2,99	46,0	92,69	15,38	46,69	101,50
		НП	3,02	46,7	93,62	15,46	46,92	100,47
		$N_{30}P_{30}$	3,25	47,2	100,75	14,52	53,55	113,45
		$N_{30}P_{30}$+НП	3,32	47,9	102,92	14,43	55,02	114,86
	Арис	Контроль	2,83	46,0	87,73	16,25	41,73	90,72
		НП	2,91	46,7	90,21	16,05	43,51	93,17
		$N_{30}P_{30}$	3,21	47,2	99,51	14,70	52,31	110,83
		$N_{30}P_{30}$+НП	3,27	47,9	101,37	14,65	53,47	111,63
Глубокое рыхление	Спринт	Контроль	2,37	45,2	73,47	19,07	28,27	62,54
		НП	2,42	45,9	75,02	18,97	29,12	63,44
		$N_{30}P_{30}$	2,63	46,4	81,53	17,64	35,13	75,71
		$N_{30}P_{30}$+НП	2,66	47,1	82,46	17,71	35,36	75,07
	Горстар	Контроль	2,54	45,2	78,74	17,80	33,54	74,20
		НП	2,56	45,9	79,36	17,93	33,46	72,90
		$N_{30}P_{30}$	2,77	46,4	85,87	16,75	39,47	85,06
		$N_{30}P_{30}$+НП	2,76	47,1	85,56	17,07	38,46	81,66
	Ирэн	Контроль	2,57	45,2	79,67	17,59	34,47	76,26
		НП	2,64	45,9	81,84	17,39	35,94	78,30
		$N_{30}P_{30}$	2,70	46,4	83,7	17,19	37,3	80,39
		$N_{30}P_{30}$+НП	2,79	47,1	86,49	16,88	39,39	83,63
	Арис	Контроль	2,46	45,2	76,26	18,37	31,06	68,72
		НП	2,50	45,9	77,5	18,36	31,6	68,85
		$N_{30}P_{30}$	2,69	46,4	83,39	17,25	36,99	79,72
		$N_{30}P_{30}$+НП	2,78	47,1	86,18	16,94	39,08	82,97

Проанализировав экономическую эффективность выращивания рассматриваемых нами гибридов, можно сделать вывод о наибольшей эффективности варианта опыта на фоне отвальной обработки почвы с применением $N_{30}P_{30}$+НП. На данном варианте при максимальной урожайности семян у гибрида Ирэн 3,27 т/га наибольший условный чистый доход получен в пределах 55,02 тыс. руб./га при себестоимости единицы продукции 14,43 тыс. руб./ц и производственной рентабельности 114,86 %, что на 13,36 % выше контроля. Аналогичные данные были получены и по глубокому рыхлению почвы. На варианте $N_{30}P_{30}$+НП по трем гибридам Спринт, Ирэн и Арис получена наибольшая рентабельность –75,07; 83,63 и 82,97 % соответственно. Однако наиболее экономически выгодным для производства здесь оказался гибрид Горстар на варианте применения $N_{30}P_{30}$, где при урожайности 2,77 т/га максимальный условный доход достиг 39,47 тыс. руб./га при уровне рентабельности 85,06 %.

Заключение

По данным оригинатора исследуемых гибридов подсолнечника ФГБНУ «ФНЦ «ВНИИМК им. В. С. Пустовойта» в интенсивных агротехнологиях потенциальная их урожайность достигается: Арис – 4,5 т/га, Спринт – 3,6 т/га, Ирэн и Горстар – 4,3 т/га. Однако неблагоприятные агрофизические свойства, в частности тяжелый механический состав черноземных почв Адыгеи, ограничивают условия получения заявленных оригинатором показателей урожайности гибридов подсолнечника. При оптимизации состояния структурно-агрегатного состава почвы посредством отвальной вспашки на 25–27 см и внесении расчетной дозы минерального удобрения возможно достижение довольно высокой для предгорной зоны региона урожайности – до 2,84 т/га по ультрараннему гибриду Спринт, 2,96 и 3,15 т/га по среднеранним гибридам Горстар и Ирэн и 3,06 т/га по среднеспелому гибриду Арис, с превышением показателей, полученных на фоне глубокого рыхления (35–40 см) на 0,32–0,47 т/га. Также на фоне отвальной вспашки отмечается повышение масличности семян с 3,7–4,1 % в сравнении с показателями глубокого рыхления почвы. Увеличение интенсивности производства подсолнечника за счет применения удобрений НП (Биостим масличный, 1,0 л/га + Ультрамаг бор, 0,5 л/га); $N_{30}P_{30}$; $N_{30}P_{30}$ + НП (Биостим масличный, 1,0 л/га + Ультрамаг бор, 0,5 л/га) позволило повысить урожайность испытуемых гибридов по вспашке от 0,05 до 0,34 т/га и по глубокому рыхлению – от 0,05 до 0,27 т/га. Наибольшая экономическая эффективность производства на всех вариантах опыта получена по всем исследуемым гибридам подсолнечника, а именно на фоне отвальной вспашки на глубине 25–27 см – 81,88–114,86 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мамсиров Н. И., Хатков К. Х., Тхакушинова Л. Н., Тимов М. Р.* Перспективные гибриды подсолнечника для условий Адыгеи // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2017. № 3(206). С. 69–74. EDN: ZWKUYD

2. *Лукомец В. М., Тишков Н. М., Бушнев А. С. и др.* Технологии возделывания масличных культур в Краснодарском крае: методические рекомендации. Краснодар: Просвещение-Юг, 2019. 67 с.

3. *Мамсиров Н. И., Хатков К. Х., Тхакушинова Л. Н.* Совершенствование агротехнологии производства высококачественных семян подсолнечника // Новые технологии. 2021. Т. 17. № 6. С. 150–158. DOI: 10.47370/2072-0920-2021-17-6-150-158

4. *Нещадим Н. Н., Квашин А. А., Малтабар М. А. и др.* Урожайность гибридов масличного подсолнечника при различных агротехнологиях в условиях центральной зоны Кубани // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 100. С. 158–165. DOI: 10.21515/1999-1703-100-158-165

5. *Dos Santos E. G., Hiroko I. M., Dias Guimaraeas A. C. et al.* Influence of chemical control on the floristic composition of weeds in the Initial and pre-harvest development stages of the sunflower crop // Agrochemicals. 2023. Vol. 2. No. 2. Pp. 193–202. DOI: 10.3390/ agrochemicals2020014

6. *Stefanic E., Rasic S., Lucic P. et al.* The critical period of weed control influences sunflower *(Helianthus annuus L.)* yield, yield components but not oil content // Agronomy. 2023. № 13. Pp. 1–13. DOI: 10.3390/agronomy13082008

7. *Куриленко В. А., Бушнев А. С.* Продуктивность новых гибридов подсолнечника в зависимости от условий выращивания (обзорная статья) // В сборнике: Актуальные вопросы биологии, селекции, технологии возделывания и переработки сельскохозяйственных культур. Сборник материалов XII Международной конференции молодых ученых и специалистов. Краснодар, 2023. С. 352–356.

8. *Савенков В. П., Дедов А. В., Хрюкин Н. Н., Епифанцева А. М.* Влагообеспеченность почвы в зависимости от систем основной обработки в первой ротации севооборота с масличными культурами // Масличные культуры. 2020. № 1(181). С. 49–56. DOI: 10.25230/ 2412-608X-2020-1-181-49-56

9. *Нещадим Н. Н., Квашин А. А., Малтабар М. А. и др.* Применение различных агроприемов при выращивании подсолнечника в Краснодарском крае // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 59-1. С. 59–63. DOI: 10.18411/lj-03-2020-12

10. *Kostenkova E., Bushnev A., Pashtetsky V.* Scientific justification of technological practices of confectionery sunflower cultivation // International Scientific and Practical Conference "Current Issues of Biology, Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops" (CIBTA2022). Conference Proceedings. United States, 2023. P. 020025-1-020025-5.

11. *Yuldasheva Z., Bushnev A., Ergasheva N.* Effect of plant density on sunflower yield under irrigated conditions in Uzbekistan // International Scientific and Practical Conference "Current Issues of Biology, Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops" (CIBTA2022). Conference Proceedings. United States, 2023. P. 020078-1-020078-5.

12. *Мамырко Ю. В., Бушнев А. С., Курилова Д. А., Котлярова И. А.* Особенности формирования высокопродуктивного посева нового гибрида подсолнечника Фогор // Масличные культуры. 2024. № 1(197). С. 76–82. DOI: 10.25230/2412-608X-2024-1-197-76-82

13. *Тишков Н. М., Еремин Г. И.* Эффективность применения жидких комплексных удобрений под подсолнечник на черноземах Краснодарского края // Масличные культуры. 2020. № 2(182). С. 51–61. DOI: 10.25230/2412-608X-2020-2-182-51-61

14. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований: монография. 5-е издание, дополн. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

REFERENCES

1. Mamsirov N.I., Khatkov K.H., Tkhakushinova L.N., Timov M.R. Promising sunflower hybrids for Adygea conditions. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Series: Natural, mathematical and technical sciences]. 2017. No. 3 (206). Pp. 69–74. EDN: ZWKUYD. (In Russian)

2. Lukomets V.M., Tishkov N.M., Bushnev A.S. et al. Technologies of cultivation of oilseeds in the Krasnodar territory: *methodological recommendations*. Krasnodar: Prosveshchenie-Yug, 2019. 67 p. (In Russian)

3. Mamsirov N.I., Khatkov K.Kh., Tkhakushinova L.N. Improvement of agrotechnology of production of high-quality sunflower seeds. *New technologies*. 2021. Vol. 17. No. 6. Pp. 150–158. DOI: 10.47370/2072-0920-2021-17-6-150-158. (In Russian)

4. Neschadim N.N., Kvashin A.A., Maltabar M.A. et al. Yield of oil sunflower hybrids under different agro-technologies in conditions of the Kuban central zone. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Kuban State Agrarian University]. 2022. No. 100. Pp. 158–165. DOI: 10.21515/1999-1703-100-158-165. (In Russian)

5. Dos Santos E.G., Hiroko I.M., Dias Guimaraeas A.C. et al. Influence of chemical control on the floristic composition of weeds in the Initial and pre-harvest development stages of the sunflower crop. *Agrochemicals*. 2023. Vol. 2. No. 2. Pp. 193–202. DOI: 10.3390/ agrochemicals2020014

6. Stefanic E., Rasic S., Lucic P. et al. The critical period of weed control influences sunflower (*Helianthus annuus L.*) yield, yield components but not oil content. *Agronomy*. 2023. No. 13. Pp. 1–13. DOI: 10.3390/agronomy13082008

7. Kurylenko V.A., Bushnev A.S. Productivity of new sunflower hybrids depending on growing conditions (review article). In the collection: Topical issues of biology, breeding, technology of cultivation and processing of agricultural crops. Collection of materials of the 12th International Conference of Young Scientists and Specialists. Krasnodar, 2023. Pp. 352–356. (In Russian)

8. Savenkov V.P., Dedov A.V., Khryukin N.N., Epifantseva A.M. Soil water availability depending on primary soil treatment in crop rotation with oil crops. *Oil crops*. 2020. No. 1(181). Pp. 49–56. DOI: 10.25230/2412-608X-2020-1-181-49-56. (In Russian)

9. Neschadim N.N., Kvashin A.A., Maltabar M.A. et al. The use of various agricultural techniques in sunflower cultivation in the Krasnodar Territory. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education]. 2020. No. 59–1. Pp. 59–63. DOI: 10.18411/lj-03-2020-12. (In Russian)

10. Kostenkova E., Bushnev A., Pashtetsky V. Scientific justification of technological practices of confectionery sunflower cultivation. *International Scientific and Practical Conference "Current Issues of Biology, Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops" (CIBTA2022)*. Conference Proceedings. United States, 2023. P. 020025-1-020025-5.

11. Yuldasheva Z., Bushnev A., Ergasheva N. Effect of plant density on sunflower yield under irrigated conditions in Uzbekistan. *International Scientific and Practical Conference "Current Issues of Biology, Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops" (CIBTA2022). Conference Proceedings*. United States, 2023. P. 020078-1-020078-5

12. Mamyrko Yu.V., Bushnev A.S., Kurilova D.A., Kotlyarova I.A. Features of the formation of highly productive crops of a new sunflower hybrid Fogor. *Oils crops*. 2024. No. 1(197). Pp. 76–82. DOI: 10.25230/2412-608X-2024-1-197-76-82. (In Russian)

13. Tishkov N.M., Eremin G.I. Efficiency of application of liquid complex fertilizers under sunflower on black soil of the Krasnodar region. *Oil crops*. 2020. No. 2 (182). Pp. 51–61. DOI: 10.25230/2412-608X-2020-2-182-51-61. (In Russian)

14. Dospekhov B.A. Methodology of field experience with the basics of statistical processing of research results. Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Тхакушинова Людмила Нурбиевна, аспирант, преподаватель кафедры технологии производства сельскохозяйственной продукции, Майкопский государственный технологический университет;
385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;
milathakusinova@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5930-9359; SPIN-код: 9116-1563
Мамсиров Нурбий Ильясович, д-р с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой технологии производства сельскохозяйственной продукции, Майкопский государственный технологический университет;
385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;
nur.urup@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4581-5505; SPIN-код: 1929-9219

Information about the authors

Lyudmila N. Tkhakushinova, Postgraduate Student, Teacher at the Department of Agricultural Production Technology FSBEI HE Maikop State Technological University.
385000, Russia, Maykop, 191 Pervomaiskaya street;
milathakusinova@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5930-9359; SPIN-код: 9116-1563
Nurbiy I. Mamsirov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Agricultural Production Technology, Maikop State Technological University;
385000, Russia, Maykop, 191 Pervomaiskaya street;
nur.urup@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4581-5505; SPIN-код: 1929-9219

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

УДК 631.527.41 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-249-259
EDN: SVEGHY

Повышение эффективности подбора родительских пар в селекции картофеля

А. В. Митюшкин, А. А. Журавлев, Е. А. Симаков✉, Ал-р В. Митюшкин, А. С. Гайзатулин, В. А. Жарова, В. А. Семенов, С. В. Овечкин

Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха
Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23

Аннотация. Успешный селекционный отбор генотипов картофеля с комплексом хозяйственно ценных признаков во многом обуславливается удачным подбором родительских пар при проведении гибридизации. Цель настоящего исследования – установить степень частоты отбора хозяйственно ценных генотипов в гибридных комбинациях, обусловленную уровнем показателя средней урожайности. За анализируемый период (2010–2022 гг.) полный селекционный процесс завершен по трем группам гибридных комбинаций, выращивание сеянцев которых проведено в 2010, 2011 и 2016 гг., а первая оценка гибридов по хозяйственно ценным признакам в 2011, 2012 и 2017 гг. соответственно. Сеянцы выращивали в горшечной культуре защищенного грунта и при уборке формировали наборы генотипов в пределах каждой гибридной комбинации. В первом клубневом поколении отбор гибридов проводили на основе визуальной оценки по комплексу признаков: отсутствию поражения вирусами, фитофторозом и паршой, урожайности, типу гнезда, длине столонов, форме клубней, глубине залегания глазков. Селекционную ценность гибридных комбинаций оценивали по количеству генотипов, отобранных для включения в питомники основного и конкурсного испытаний и переданных в Госсортоиспытание. В первой группе гибридных комбинаций, изученных в 2011 г., частота отбора хозяйственно ценных форм варьировала от 2,0 до 28,5 %, а в 2012 г. – от 1,8 до 21,4 %. По этим группам гибридных комбинаций наблюдается связь между показателями отбора хозяйственно ценных гибридов и конечными результатами селекционного процесса. До его завершения сохраняются гибриды тех комбинаций, которые характеризовались высокой частотой отбора хозяйственно ценных гибридов при оценке в первом клубневом поколении. Особенно четко эта закономерность проявляется при сравнении гибридных комбинаций, полученных по схеме топкросса с участием одного общего родителя – тестера, использованного в качестве материнской или отцовской формы. Частота встречаемости хозяйственно ценных форм в первом клубневом поколении является надежным критерием определения селекционной ценности гибридных комбинаций. Показатели средней урожайности комбинаций не коррелируют с частотой отбора хозяйственно ценных гибридов.

Ключевые слова: картофель, селекция, родительские формы, гибридные комбинации, сеянцы, гибриды 1-го клубневого поколения, частота отбора, хозяйственно ценные генотипы

Поступила 14.11.2024, одобрена после рецензирования 04.12.2024, принята к публикации 09.12.2024

Для цитирования. Митюшкин А. В., Журавлев А. А., Симаков Е. А., Митюшкин Ал-р В., Гайзатулин А. С., Жарова В. А., Семенов В. А., Овечкин С. В. Повышение эффективности подбора родительских пар в селекции картофеля // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 249–259. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-249-259

© Митюшкин А. В., Журавлев А. А., Симаков Е. А., Митюшкин Ал-р В., Гайзатулин А. С., Жарова В. А., Семенов В. А., Овечкин С. В., 2024

Original article

Improving the efficiency of the selection of parent pairs in potato breeding

A.V. Mityushkin, A.A. Zhuravlev, E.A. Simakov✉, Al-r V. Mityushkin, A.S. Gaizatullin, V.A. Zharova, V.A. Semenov, S.V. Ovechkin

Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh
140051, Russia, Moscow region, Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street

Abstract. Successful selection of potato genotypes with a complex of economically valuable traits largely depends on the successful selection of parental pairs during hybridization. The purpose of this study is to establish the frequency of selection of economically valuable genotypes in hybrid combinations, determined by the level of the average yield indicator. During the analyzed period (2010-2022), the full selection process was completed for three groups of hybrid combinations, the seedlings of which were grown in 2010, 2011 and 2016, and the first assessment of hybrids for economically valuable traits in 2011, 2012 and 2017, respectively. The seedlings were grown in pot culture in protected ground and during harvesting, sets of genotypes were formed within each hybrid combination. In the first tuber generation, hybrid selection was carried out based on a visual assessment of a set of characteristics: absence of virus, late blight and scab damage, yield, nest type, stolon length, tuber shape, and eye depth. The selection value of hybrid combinations was assessed by the number of genotypes selected for inclusion in the nurseries of the main and competitive tests and transferred to the State Variety Testing. In the first group of hybrid combinations studied in 2011, the frequency of selection of economically valuable forms varied from 2.0 to 28.5%, and in 2012 – from 1.8 to 21.4%. For these groups of hybrid combinations, a relationship is observed between the selection indicators of economically valuable hybrids and the final results of the selection process. Until its completion, hybrids of those combinations are preserved that were characterized by a high frequency of selection of economically valuable hybrids during the assessment in the first tuber generation. This pattern is especially clear when comparing hybrid combinations obtained using the topcross scheme with one common parent – the tester used as the maternal or paternal form. The frequency of occurrence of economically valuable forms in the first tuber generation is a reliable criterion for determining the breeding value of hybrid combinations. Average yield indicators of combinations do not correlate with the frequency of selection of economically valuable hybrids.

Keywords: potato, selection, parental forms, hybrid combinations, seedlings, 1st tuber generation hybrids, selection frequency, economically valuable genotypes

Submitted 14.11.2024, approved after reviewing 04.12.2024, accepted for publication 09.12.2024

For citation. Mityushkin A.V., Zhuravlev A.A., Simakov E.A., Mityushkin Al-r V., Gaizatullin A.S., Zharova V.A., Semenov V.A., Ovechkin S.V. Improving the efficiency of the selection of parent pairs in potato breeding. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 249–259. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-249-259

Введение

Классическая селекция картофеля, осуществляемая в различных направлениях, основывается на трех фундаментальных составляющих: подборе родительских пар, их гибридизации и отборе генотипов в процессе полевых испытаний [1, 2]. Причем поиск компонентов скрещивания является наиболее сложной творческой частью селекционной работы, а их удачный подбор во многом обуславливает потенциальный успех селекционного отбора желаемых генотипов при оптимальном объеме гибридного мате-

риала. Особую значимость приобретает правильный подбор родительских форм в селекционных программах картофеля, реализуемых в направлении комплекса хозяйственно полезных признаков. Поэтому в качестве основополагающего метода в селекции картофеля используется подбор по фенотипу с учетом родословной родителей [3, 4]. Однако фенотип только в той или иной степени может соответствовать генотипу, хотя степень этого соответствия существенно варьирует в зависимости от различных хозяйственно полезных признаков. Объективная возможность оценки генотипа по фенотипу определяется коэффициентом наследуемости хозяйственно полезных признаков. Наиболее высокие значения коэффициента наследуемости соответствуют таким признакам, как количество клубней на куст, крахмалистость клубней, устойчивость к потемнению мякоти клубней и полевая устойчивость к фитофторозу [5–7]. В частности, вероятность появления высококрахмалистых генотипов в гибридном потомстве низкокрахмалистых родительских форм также мала, как и возможность отбора мелкоглазковых форм в скрещиваниях родителей с глубокими глазками клубней. Объективное заключение о генотипе по данным оценки фенотипа у картофеля возможно по следующим количественным признакам: содержание крахмала и сухого вещества в клубнях; полевая устойчивость к фитофторозу, вирусам и парше обыкновенной; форма и окраска мякоти клубней; глубина глазков; длина столонов и срок созревания. При селекции в направлении этих признаков необходим подбор родительских форм, характеризующихся высокой степенью их фенотипического проявления. Однако оценка генотипа по фенотипу в отношении урожайности не всегда объективна, так как очень часто при скрещивании низкоурожайных компонентов вполне могут выделяться высокоурожайные формы. Уровень урожайности гибридного потомства во многом зависит от комбинационной способности родительских форм, поэтому для удачного подбора родителей необходим предварительный анализ гибридных комбинаций по частоте встречаемости урожайных форм, позволяющий включать в селекционную проработку только наиболее ценные родительские формы. Безусловно, с этой целью можно применять уже апробированные методы оценки общей (ОКС) и специфической (СКС) комбинационной способности исходных родительских форм, основанные на дисперсионном анализе показателей средней популяционной конкретного признака. При этом определение эффектов ОКС и СКС в системах топкросса или диаллельных скрещиваний у картофеля проводится по разным признакам, но чаще всего – по урожайности [7, 8].

В последние годы для этой цели все шире применяются методы маркер-вспомогательной селекции на этапах поиска источников хозяйственно полезных признаков, основанных на использовании генетического разнообразия культурных и диких видов картофеля [9, 10]. Так, в США исследуются маркированные локусы, связанные с урожайностью, показателями продуктивности (количество, формирование массы клубней, их удельной массы) и другими количественными признаками. Для тетраплоидного картофеля выявлены маркеры, связанные с генами, отвечающими за продуктивность, выход клубней с гектара, содержание крахмала в клубнях [11, 12]. В реальной селекционной практике научных учреждений и агропредприятий РФ к настоящему времени методы маркер-вспомогательной селекции используются только для подбора сортообразцов с генами устойчивости к грибным и вирусным заболеваниям в качестве родительских форм и оценки гибридов основного конкурсного испытания с их участием [12]. В связи с тем, что селекция картофеля базируется на индивидуальном отборе, цель настоящего исследования – установить связь частоты отбора хозяйственно ценных форм в гибридных комбинациях с уровнем показателей урожайности.

Материал и методы исследований

В качестве материала для исследований использовали результативность отбора хозяйственно ценных форм среди 4860 генотипов более 30 гибридных комбинаций, по которым завершена 8–10-летняя селекционная проработка. Селекционную ценность гибридных комбинаций оценивали по количеству генотипов, отобранных для включения в питомники основного и конкурсного испытаний и переданных в Госсортиспытание. За анализируемый период (2010–2022 гг.) полный селекционный процесс завершен по двум группам гибридных комбинаций, выращивание сеянцев которых проведено в 2010 и 2011 гг., а по третьей группе – в 2016 г. Первая оценка гибридов по хозяйственно ценным признакам проведена в 2011, 2012 и 2017 гг. соответственно. Данные группы гибридных комбинаций использовали как для генетического анализа, так и для проведения систематического отбора и последующих этапов селекционного испытания отобранных гибридов в рамках настоящего исследования.

Расчет эффектов ОКС и СКС родительских форм проводили с использованием данных предварительной оценки только третьей группы гибридных комбинаций по показателям средней урожайности (учет урожайности покустный с взвешиванием в поле). Результаты обрабатывали методом двухкратного дисперсионного анализа с учетом взаимодействия. Оценку КС наследуемости в узком смысле проводили по методике В. К. Савченко [13]. Наследуемость в широком смысле вычисляли по методике П. Ф. Ракицкого и А. И. Добиной [15].

Оценку гибридных комбинаций и отбор выделившихся гибридов по комплексу хозяйственно ценных признаков проводили в первом клубневом поколении. Сеянцы выращивали в горшечной культуре по общепринятой методике [15]. При уборке сеянцев браковку не проводили и от каждого сеянца отбирали по одному клубню для формирования наборов генотипов в пределах каждой гибридной комбинации. В первом клубневом поколении гибриды высаживали по комбинациям (семьям) ярусами на двухрядковых делянках и оценивали растения каждого гибрида. Отбор лучших гибридов проводили на основе визуальной оценки по следующим признакам: отсутствие поражения ботвы вирусными болезнями и фитофторозом, урожайность, тип гнезда, длина столонов, форма клубней, глубина глазков и отсутствие поражения паршой.

Результаты и обсуждение

В первой группе гибридных комбинаций, изученных в 2011 г., частота отбора селекционно ценных форм варьировала от 2,0 до 28,5 %, а в 2012 г. – от 1,8 до 21,4 %. По всем группам изученных гибридных комбинаций прослеживается связь между показателями отбора хозяйственно ценных гибридов и конечными результатами селекционного процесса. Как правило, до его завершения сохранялись гибриды тех комбинаций, которые характеризовались высокой частотой отбора хозяйственно ценных гибридов при оценке в первом клубневом поколении. Эта закономерность особенно четко проявляется при сравнении гибридных комбинаций, полученных по схеме топкросса с участием одного общего родителя – тестера, взятого в качестве материнской или отцовской формы (с сортами Аусония, Сантана, гибридами 128-6, 96.5-7 и др.) (табл. 1). Для каждой группы топкроссных комбинаций характерен свой показатель наличия хозяйственно ценных гибридов, из числа которых отдельные гибриды сохранялись до завершения селекционного процесса. В частности, по данным 2011 г., для комбинаций с гибридом 96.5-7 этот показатель составил 28,1 %, с сортом Аусония – 25,3 % и с гибридом 128-6 – 28,2 %.

Таблица 1. Результативность отбора хозяйственно ценных форм в гибридных комбинациях на различных этапах селекционного процесса (2011–2018 гг.)

Table 1. Efficiency of selection of economically valuable forms in hybrid combinations at various stages of the selection process (2011–2018)

Происхождение гибридных комбинаций	Количество изученных гибридов, шт.	Отобрано гибридов		Количество выделившихся гибридов на завершающих этапах селекционного процесса, шт.		
		шт.	%	Основное испытание	Конкурсное испытание	Передано на госиспытание
Нида х Аусония	292	74	25,3	1	0	0
Конкорд х Аусония	150	3	2,0	0	0	0
128-6 х Аусония	48	11	22,9	3	0	0
96.5-7 х Аусония	102	14	13,7	0	0	0
96.5-7 х Маэстро	210	59	28,1	2	2	2*)
96.5-7 х Вымпел	178	48	27,0	0	0	0
96.5-7 х Инноватор	125	22	17,6	0	0	0
Сантана х Инноватор	81	4	4,9	0	0	0
Сантана х Вымпел	172	49	28,5	0	0	0
Сантана х Феррари	168	21	12,5	0	0	0
Инноватор х Сантана	108	3	2,8	0	0	0
Белларoза х Сантана	156	24	15,4	0	0	0
Инара х Феррари	108	26	24,1	0	0	0
Гала х Сантана	79	7	8,9	0	0	0
128-6 х Феррари	110	31	28,2	1	1	0
128-6 х Розара	119	28	23,5	0	0	0
128-6 х ВР 808	121	6	5,0	0	0	0
Табор х 128-6	52	10	19,2	0	0	0
Европрима х Севим	142	24	16,9	0	0	0
Севим х Европрима	76	7	9,2	0	0	0
Ирбитский х Европрима	101	16	15,8	0	0	0
Всего	2698	487	18,1	7	3	2

*) сорта Краса Мещеры и Садон

В отдельных гибридных комбинациях, характеризующихся достаточно высокой частотой отбора хозяйственно ценных форм (96.5-7 х Вымпел, Сантана х Вымпел, Инара х Феррари, 128-6 х Розара, Табор х 128-6), к завершению селекционного процесса не осталось ни одного гибрида. Однако эти комбинации все же могут использоваться в практической селекции, так как при более значительном увеличении общего количества гибридов среди них возможно появление хозяйственно ценных форм, способных успешно конкурировать с сортами-стандартами при проведении отбора.

Согласно данным таблицы 2 только в отдельных гибридных комбинациях единичные гибриды остаются до завершения селекционного процесса. Эти гибриды наряду с другими положительными хозяйственно ценными признаками характеризуются стабильно высокой урожайностью в различные по метеоусловиям годы, что определяется широкой нормой реакции на воздействие факторов внешней среды. В первом клубневом поколении в число отобранных попадают также все положительные модификации, выделившиеся в условиях данного вегетативного периода, которые при последующем испытании, как правило, выбраковываются. Фенотипы со стабильной урожайностью могут быть выявлены лишь в процессе селекционного испытания, но вероятность их появления наиболее

высокая в тех гибридных комбинациях, которые характеризуются наибольшей частотой хозяйственно ценных форм при первичном отборе в первом клубневом поколении.

Таблица 2. Оценка гибридных комбинаций по урожайности и частоте отбора хозяйственно ценных форм в результате селекционного испытания (2012–2019 гг.)

Table 2. Evaluation of hybrid combinations by yield and frequency of selection of economically valuable forms as a result of selection testing (2012–2019)

Происхождение гибридных комбинаций	Количество изученных гибридов, шт.	Средняя урожайность гибридов, г/куст	Частота отбора, %	Количество гибридов на завершающих этапах селекционного процесса, шт.		
				Основное испытание	Конкурсное испытание	Передано на госиспытание
Ред Скарлетт х Белларoза	62	718 ± 52,4	12,4	0	0	0
Ред Скарлетт х Крепыш	115	752 ± 41,7	11,5	1	1	0
Пароли х Ред Скарлетт	42	760 ± 64,3	21,4	1	0	0
Пароли х Инноватор	94	637 ± 39,7	15,9	1	1	0
Инноватор х 1275-5	50	591 ± 41,4	6,0	0	0	0
Кенза х 1275-5	141	710 ± 57,7	19,1	1	1	0
Коскар х 1275-5	221	724 ± 40,5	19,9	2	1	1*)
Аугустин х Джувел	60	660 ± 51,2	15,0	1	1	0
Гранд х Джувел	48	704 ± 62,3	20,8	0	0	0
Лили х Бриз	55	1011 ± 50,7	1,8	0	0	0
Беттина х Гала	52	825 ± 47,2	9,6	0	0	0
Чароит х Крепыш	112	818 ± 50,1	18,7	1	0	0
Всего	1025	689±45,1	16,4	8	5	1

*) сорт Ариэль

Экологические условия, в которых проводится оценка гибридных комбинаций, безусловно влияют на частоту отбора и, следовательно, на определение их селекционной ценности. Так, в гибридной комбинации Коскар х 1275-5 в условиях супесчаных почв экспериментальной базы «Пышлицы» ФИЦ картофеля им А. Г. Лорха отобрано 19,9 % хозяйственно ценных форм. В то же время при оценке аналогичной комбинации на легкосуглинистой почве Брянской опытной станции не выделилось ни одного гибрида. Это является подтверждением того, что предварительный анализ родительских форм по потомству с целью подбора пар для скрещивания должен осуществляться в каждой экологической точке, где проводится селекционная работа по картофелю.

Анализ данных таблицы 2 позволяет сопоставить значения средней урожайности гибридных комбинаций с частотой отбора хозяйственно ценных форм. Согласно представленным результатам оценки связь между этими показателями выражается слабоположительным коэффициентом корреляции, равным 0,21. Из некоторых высокоурожайных комбинаций (Лилли х Бриз, Беттина х Гала, Ред Скарлетт х Белларoза) к завершению селекционного процесса не сохранилось ни одного гибрида. И, наоборот, в отдельных комбинациях с относительно низким значением средней урожайности (Пароли х Инноватор, Кенза х 1275-5, Аугустин х Джувел) отобраны хозяйственно ценные гибриды, которые по урожайности оказались на уровне сортов-стандартов.

Не выявлена положительная зависимость между показателями средней урожайности и частотой отбора в гибридных комбинациях, оцененных в 2017 г. (табл. 3). При этом коэффициент корреляции между этими показателями оказался отрицательным и составил 0,66. Следовательно, предварительная оценка гибридных комбинаций по средней урожайности и рассчитанным на ее основе эффектам ОКС и СКС родительских форм также

не может иметь практического значения в селекционной работе. Такая оценка представляет интерес только в качестве дополнительной характеристики родительских форм, потомство которых отличается высокой частотой отбора хозяйственно ценных форм.

Таблица 3. Оценка гибридных комбинаций с участием родительских форм с высоким уровнем эффектов ОКС и СКС по урожайности и частоте отбора хозяйственно ценных форм (2017 г.)

Table 3. Evaluation of hybrid combinations involving parental forms with a high level of OKS and SKS effects in terms of yield and frequency of selection of economically valuable forms (2017)

Происхождение гибридных комбинаций	Количество изученных гибридов, шт.	Средняя урожайность гибридов, г/куст	Частота отбора, %
Оксания х Кенза	78	585 ± 52,7	29,5
Ред Скарлетт х Кенза	69	795 ± 62,1	20,3
Лабелла х Кенза	54	1011 ± 72,3	28,9
Наташа х Гала	78	848 ± 57,2	23,0
Королева Анна х Гала	50	885 ±53,7	44,0
Гусар х Гала	210	522 ±36,2	14,8
Гусар х Дубрава	182	561 ±30,7	22,5
Гусар х Русский Сувенир	118	572 ± 29,8	21,2
Лабадиа х Фрителла	75	538 ± 27,0	34,7
Белая ночь х Гала	78	472 ± 30,1	44,9
Всего	1100	679±31,7	26,4

Результаты проведенного анализа показывают, что данные частоты отбора в первом клубневом поколении гибридных комбинаций позволяют более объективно и достаточно надежно определять их селекционную ценность. Такая оценка по частоте отбора гибридов вполне может предшествовать практической селекции, составляя ее предварительный этап. Причем результативность этого этапа работы, несомненно, возрастает, если дополнительно к визуальной оценке гибридных комбинаций и отбору хозяйственно ценных форм проводить их испытание на устойчивость к болезням на фоне искусственного заражения и механическим повреждениям, на кулинарные качества и пригодность к переработке на картофелепродукты в лабораторных условиях.

Выводы

Родительские пары для предварительной оценки по гибридному потомству картофеля необходимо комбинировать с учетом их фенотипических показателей и закономерностей наследования хозяйственно ценных признаков. При подборе по фенотипу прежде всего учитывается основной хозяйственно ценный признак, который необходим сорту, – раннеспелость, устойчивость к конкретному патогену или какой-то другой. Большинство родительских форм имеют те или иные недостатки, поэтому подбор по фенотипу целесообразно проводить с учетом их положительных и отрицательных признаков по принципу взаимного исключения последних. При таком подходе резко сокращается количество возможных вариантов скрещивания, а из числа подобранных по фенотипу комбинаций наиболее перспективные выделяются по частоте отбора хозяйственно ценных форм в первом клубневом поколении. Наиболее ценные, стабильные по урожайности гибриды, конкурирующие с сортами-стандартами, выделяются из тех комбинаций, которые характеризуются высокими показателями отбора в первом клубневом поколении. Частота встречаемости хозяйственно ценных форм на данном этапе селекционного процесса является надежным критерием определения селекционной ценности гибридных комбинаций. Показатели средней урожайности комбинаций не коррелируют с частотой отбора хозяйственно ценных гибридов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беккер Х.* Селекция растений. М.: КМК, 2015. 425 с.

2. *Яшина И. М.* Генетика, генные технологии. В кн.: Картофель: монография / Под ред. С. В. Жеворы. М.: ФИЦ картофеля имени А. Г. Лорха, 2022. С. 145–161.

3. *Дорожкин Б. Н., Дергачева Н. В.* Селекция картофеля в Западной Сибири: принципы, методы, генетические источники. Саарбрукен: Lap Lambert, 2012. 172 с.

4. *Шанина Е. П., Клюкина Е. М., Стафеева М. А. et al.* Сравнительный анализ сортов картофеля коллекционного питомника в зависимости от географического происхождения // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 6. С. 75–78. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10614

5. *Кирпичева Т. В., Хорольская Ю. В.* Исходный материал для селекции картофеля на скороспелость, продуктивность и устойчивость к болезням и вредителям // Наука и образование. 2018. Т. 1. № 2. С. 63.

6. *Lindhout P., Mejer D., Schotte T.* Hybrid potato breeding for improved varieties // Potato Res., 2018. Vol. 54. Pp. 301–312.

7. *Шанина Е. П., Стафеева М. А.* Комбинационная способность сортов и гибридов картофеля в селекции на хозяйственно ценные признаки // Аграрный вестник Урала. 2015. № 6(136). С. 29–33. EDN: UFFIFB

8. *Гимаева Е. А., Сташевски З. А., Вологин С. Г. и др.* Изучение комбинационной способности по признаку продуктивности и оценке устойчивости гибридов картофеля к фитофторозу в условиях Республики Татарстан // Нива Татарстана. 2017. № 3/4. С. 41–45. EDN: ZDEVQZ

9. *Ramakrishnan A.P., Ritland C.E., Sevillano R.H.B., Riseman A.* Review of potato molecular markers to enhance trait selection // Am. J. Potato Res. 2015. Vol. 92. Pp. 455–472. DOI: 10.1007/s12230-015-9455-7

10. *Li L., Xu J., Duan S. et al.* Mapping and QTL analysis of early-maturity traits in tetraploid potato (S.tuberosum) // Int. J. Mol. Sci. 2018. Vol. 19(10). Pp. 306–315.

11. *Li L., Tacke E., Hofferbert H.-R. et al.* Validation of candidate gene marker-assisted selection of potato cultivars with improved tuber quality // Theor. Appl. Genet. 2013. Vol. 116(4). Pp. 1039–1052.

12. *Бирюкова В. А., Шмыгля И. В., Жарова В. А.* Маркер-вспомогательная селекция на устойчивость к фитопатогенам // В кн.: Селекция и семеноводство картофеля. Чебоксары, 2020. С. 55–61.

13. *Савченко В. К.* Метод оценки комбинационной способности генетически разнокачественных наборов родительских форм // В сб.: Методики генетико-селекционного и генетического экспериментов. Минск: Наука и техника, 1973. С. 21–28.

14. *Рокицкий П. Ф., Добина А. И.* Вычисление коэффициента наследуемости количественных признаков // В сб.: Теория отбора в популяциях растений. Новосибирск: Наука, 1976. С. 48–54.

15. *Симаков Е. А., Склярова Н. П., Яшина И. М.* Методические указания по технологии селекционного процесса картофеля. М.: Достижения науки и техники АПК, 2006. 70 с.

REFERENCES

1. Becker Kh. *Selektsiya rasteniy* [Plant breeding]. Moscow: KMK, 2015. 425 p. (In Russian)

2. Yashina I.M. *Genetika, gennyye tekhnologii* [Genetics, gene technologies]. In the book: Potato. Monograph. Ed. by S.V. Zhevora. Moscow: FGBNU FITS kartofelya imeni A.G. Lorkha, 2022. Pp. 145–161. (In Russian)

3. Dorozhkin B.N., Dergacheva N.V. *Selektsiya kartofelya v Zapadnoy Sibiri: printsipy, metody, geneticheskiye istochniki* [Potato breeding in Western Siberia: principles, methods, genetic sources]. Saarbrucken: Lap Lambert, 2012. 172 p. (In Russian)

4. Shanina E.P., Klyukina E.M., Stafeeva M.A. et al. Comparative analysis of potato varieties of a collection nursery depending on their geographical origin. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology in the agro-industrial complex]. 2020. Vol. 34. No. 6. Pp. 75–78. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10614. (In Russian)

5. Kirpicheva T.V., Khorolskaya Yu.V. Source material for breeding potatoes for early maturity, productivity, and resistance to diseases and pests. *Nauka i obrazovaniye* [Science and education]. 2018. Vol. 1. No. 2. P. 63. (In Russian)

6. *Lindhout P., Mejer D., Schotte T.* Hybrid potato breeding for improved varieties. Potato Res., 2018. Vol. 54. Pp. 301–312.

7. Shanina E.P., Stafeeva M.A. Combination ability of potato varieties and hybrids in breeding for economically valuable traits. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2015. No. 6 (136). Pp. 29–33. EDN: UFFIFB. (In Russian)

8. Gimaeva E.A., Stashevsky Z.A., Vologin S.G. et al. Study of combination ability based on productivity trait and assessment of potato hybrid resistance to late blight in the Republic of Tatarstan. *Niva Tatarstana*. 2017. No. 3/4. Pp. 41–45. EDN: ZDEVQZ. (In Russian)

9. Ramakrishnan A.P., Ritland C.E., Sevillano R.H.B., Riseman A. Review of potato molecular markers to enhance trait selection. *Am. J. Potato Res.* 2015. Vol. 92. Pp. 455–472. DOI: 10.1007/s12230-015-9455-7

10. Li L., Xu J., Duan S. et al. Mapping and QTL analysis of early-maturity traits in tetraploid potato (S.tuberosum). *Int. J. Mol. Sci.* 2018. Vol. 19(10). Pp. 306–315.

11. Li L., Tacke E., Hofferbert H.-R. et al. Validation of candidate gene marker-assisted selection of potato cultivars with improved tuber quality. *Theor. Appl. Genet*. 2013. Vol. 116(4). Pp. 1039–1052.

12. Biryukova V.A., Shmyglya I.V., Zharova V.A. *Marker-vspomogatel'naya selektsiya na ustoychivost' k fitopatogenam* [Marker-assisted selection for resistance to phytopathogens]. In the book: Potato breeding and seed production. Cheboksary, 2020. Pp. 55–61. (In Russian)

13. Savchenko V.K. *Metod otsenki kombinatsionnoy sposobnosti geneticheski raznokachestvennykh naborov roditel'skikh form* [Method for assessing the combining ability of genetically diverse sets of parental forms]. In the collection: Methods of genetic-breeding and genetic experiments. Minsk: Nauka i tekhnika, 1973. Pp. 21–28. (In Russian)

14. Rokitsky P.F., Dobina A.I. *Vychisleniye koeffitsiyenta nasleduyemosti kolichestvennykh priznakov* [Calculation of the heritability coefficient of quantitative traits]. In the collection: Theory of selection in plant populations. Novosibirsk: Nauka, 1976. Pp. 48–54. (In Russian)

15. Simakov E.A., Sklyarova N.P., Yashina I.M. *Metodicheskiye ukazaniya po tekhnologii selektsionnogo protsessa kartofelya* [Methodical instructions on the technology of the potato selection process]. Moscow: Dostizheniya nauki i tekhniki APK, 2006. 70 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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Митюшкин Алексей Владимирович, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., отдел селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8287-3507, SPIN-код: 2518-8302

Журавлев Алексей Алексеевич, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., отдел селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6921-104X, SPIN-код: 3252-8529

Симаков Евгений Алексеевич, д-р с.-х. наук, зав. отделом селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

vniikh@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0577-020X, SPIN-код: 8129-9036

Митюшкин Александр Владимирович, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., отдел селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1051-3953, SPIN-код: 1978-9320

Гайзатулин Александр Сергеевич, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., отдел селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3810-5273, SPIN-код: 3640-5340

Жарова Вера Алексеевна, канд. с.-х. наук, науч. сотр., отдел селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7854-2526

Семенов Владимир Алексеевич, науч. сотр., отдел селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5267-3225, SPIN-код: 6593-3230

Овечкин Сергей Валентинович, канд. с.-х. наук, науч. сотр., отдел селекции, Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха;

Россия, Московская область, г.о. Люберцы, п. Красково, ул. Лорха, 23;

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0029-1210, SPIN-код: 2576-8820

Information about the authors

Alexey V. Mityushkin, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, The Breeding Department, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8287-3507, SPIN-code: 2518-8302

Alexey A. Zhuravlev, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, The Breeding Department, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6921-104X, SPIN-code: 3252-8529

Evgeny A. Simakov, Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Breeding, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

vniikh@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0577-020X, SPIN-code: 8129-9036

Alexander V. Mityushkin, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, The Breeding Department, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1051-3953, SPIN-code: 1978-9320

Alexander S. Gaizatulin, Candidate of Agricultural Sciences, Researcher, The Department of Breeding, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3810-5273, SPIN-code: 3640-5340

Vera A. Zharova, Candidate of Agricultural Sciences, Researcher, The Breeding Department, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7854-2526

Vladimir A. Semenov, Researcher, The Breeding Department, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5267-3225, SPIN-code: 6593-3230

Sergey V. Ovechkin, Candidate of Agricultural Sciences, Researcher, The Breeding Department, Federal Research Center of Potato named after A.G. Lorkh;

140051, Russia, Moscow region., Lyubertsy, Kraskovo settlement, 23 Lorkh street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0029-1210, SPIN-code: 2576-8820

АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ

УДК: 633.31:631.82 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-260-267
EDN: SYTITK

Влияние некорневых подкормок на продуктивность сои в условиях Республики Адыгея

О. А. Благополучная✉, Н. И. Девтерова

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства
«Майкопский государственный технологический университет»
385064, Россия, г. Майкоп, п. Подгорный, ул. Ленина, 48

Аннотация. В Республике Адыгея на выщелоченных слитых черноземах проводились исследования (2021–2023 гг.) по влиянию некорневых подкормок микроудобрениями, содержащими бор и молибден, на рост, развитие и урожайность сои, а также на качество полученной продукции. Целью данного эксперимента являлось изучение влияния различных доз листовой подкормки на продуктивность и качество семян сои. Применялась обработка почвы с оборотом пласта на 25–27 см. Обработка растений сои (сорт Ментор) бором (В) и молибденом (Мо) проводилась в фазу начала цветения в дозировке В – 300; 900 мг/га, Мо – 100; 300 мг/га. В результате установлено, что обработка по листу в фазе начала цветения повышала урожайность на 9,4–30,7 % по отношению к контрольному варианту. Некорневые подкормки оказали положительное влияние на формирование лучших физических показателей качества зерна сои на вариантах с утроенной дозой бора и молибдена. Масса тысячи семян превышала контроль на 7,2 и 6,1 % на вариантах с трехкратным увеличением дозировки бора и молибдена соответственно. Содержание протеина колебалось в зависимости от вариантов опыта от 25,10 до 25,55 %, содержание масла в образцах варьировало в пределах 24,4–24,5 %. Обработка наибольшими дозами В и Мо способствовала увеличению чистого дохода – 54,0 и 51,3 тыс. руб. с одного гектара соответственно. Уровень рентабельности производства по вариантам опыта составил 86,0–125,8 %. За три года исследований разработаны рекомендации по применению различных доз микроудобрений, по обработке почвы с оборотом пласта, которые обеспечили повышение урожайности сои на 10–31 % и качества полученной продукции на 5–10%.

Ключевые слова: обработка почвы, запасы продуктивной влаги, объемная масса, агрегатный состав, соя, некорневая подкормка, микроудобрения, бор, молибден, урожайность, протеин, масличность

Поступила 07.11.2024, одобрена после рецензирования 02.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Благополучная О. А., Девтерова Н. И. Влияние некорневых подкормок на продуктивность сои в условиях Республики Адыгея // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 260–267. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-260-267

Original article

The influence of foliar feeding on soybean productivity in the Republic of Adygea

O.A. Blagopoluchnaya✉, N.I. Devterova

Research Institute of Agriculture
Maykop State Technological University
385064, Russia, Maykop, Podgorny, 48 Lenin street

© Благополучная О. А., Девтерова Н. И., 2024

Abstract. In the Republic of Adygea, on leached drained chernozems, studies were conducted (2021–2023) on the effect of foliar feeding with microfertilizers containing boron and molybdenum on the growth, development and yield of soybeans, as well as on the quality of the resulting products. The purpose of this experiment was to study the effect of different doses of foliar feeding on the productivity and quality of soybean seeds. Soil cultivation with a layer turnover of 25–27 cm was used. Soybean plants (Mentor variety) were treated with boron (B) and molybdenum (Mo) in the early flowering phase, at a dosage of B 300; 900 mg / ha, Mo 100; 300 mg / ha. As a result, it was found that foliar treatment in the early flowering phase increased the yield by 9.4–30.7 % compared to the control variant. Foliar feeding had a positive effect on the formation of the best physical indicators of soybean grain quality in the variants with a triple dose of boron and molybdenum. The thousand-seed weight exceeded the control by 7.2 and 6.1 % in the variants with a three-fold increase in the dosage of boron and molybdenum, respectively. The protein content fluctuated depending on the experimental variants from 25.10 to 25.55 %, the oil content in the samples varied within 24.4–24.5 %. Treatment with the highest doses of B and Mo contributed to an increase in net income: 54.0 and 51.3 thousand rubles per hectare, respectively. The level of profitability of production in the experimental variants was 86.0 – 125.8 %. Over three years of research, recommendations were developed for the use of various doses of microfertilizers, for soil cultivation with layer turnover, which ensured an increase in soybean yield by 10 – 31 % and the quality of the resulting products by 5–10 %.

Keywords: soil cultivation, productive moisture reserves, bulk density, aggregate composition, soybeans, foliar feeding, microfertilizers, boron, molybdenum, yield, protein, oil content

Submitted 07.11.2024, approved after reviewing 02.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Blagopoluchnaya O.A., Devterova N.I. The influence of foliar feeding on soybean productivity in the Republic of Adygea. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 260–267. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-260-267

Введение

Соя – одна из наиболее перспективных и рентабельных сельскохозяйственных культур. Ее семена состоят примерно на 40 % из белков, на 30 % из углеводов и на 20 % из масел [1, 2].

2021 год для сои ознаменовался расширением посевных площадей, по сравнению с 2020 годом они увеличились на 5,7 %, что составило 3021,0 тыс. га в Российской Федерации.

В течение вегетации растений сои – во время цветения, формирования бобов и в начале налива зерна – потребление питательных элементов происходит неравномерно. В эти фазы развития расходуется ≈ 60 % азота, 65 % фосфора и 70 % калия [3].

В Республике Адыгея исследованиями по изучению возделывания сои на зерно занимались ученые Адыгейского НИИСХ Л. П. Борина, В. П. Щепеткова, которыми были рекомендованы дозы внесения минеральных удобрений: 40 кг д.в. – N, 60 – P и 60 – K [4].

Соя – требовательная культура к режиму минерального питания. Микроудобрения для листовой подкормки растений сои должны содержать как микроэлементы (бор, железо, марганец, цинк и молибден), так и биологически активные вещества [5].

О положительном влиянии применения некорневых подкормок сои биопрепаратами и микроудобрениями свидетельствуют многочисленные исследования ученых, применявших их в различных агроклиматических условиях [6–8].

Соя отзывчива на молибденовые и борные удобрения, которые положительно влияют на азотфиксацию [9–11].

Молибден – один из важных элементов при выращивании сои, который благотворно влияет на развитие корневой системы и размножение корневых клубеньков, увеличение количества стручков, завязывание семян, содержание протеина в семенах, повышение урожайности культуры.

Бор – микроэлемент, который играет существенную роль в процессе роста, оплодотворения растений сои, улучшает снабжение растительных тканей и корней кислородом [12].

В научных трудах ученых ГНУ ВНИИ масличных культур [13] по применению некорневой подкормки микроудобрений, содержащих бор и молибден, рекомендуются следующие дозировки:

- бор – 300–900 г/га;
- молибден – 100–300 г/га.

Цель исследований: выявить влияние различных доз бора и молибдена на урожайность и качество зерна сои.

В наши задачи входило: определить влияние различных доз микроудобрений на продуктивность и качество сельскохозяйственных культур; изучить агрофизические и агрохимические показатели почвы; дать экономическую оценку эффективности возделывания сельскохозяйственных культур по различным вариантам.

Изучение влияния применения различных доз микроудобрений для некорневой подкормки растений, обеспечивающих повышение урожайности сои, является актуальным для нашего региона.

Материалы и методика исследований

Полевой опыт закладывался на полях НИИСХ ФГБОУ ВО «МГТУ» по общепринятой методике Б. А. Доспехова [14]. Объект исследований – сорт Ментор. Для некорневой подкормки применялись следующие элементы: бор в форме борной кислоты H_3BO_3; молибден в форме молибдата аммония $(NH_4)_2MoO_4$. Листовую подкормку проводили в фазу начала цветения растений.

Схема опыта:

1. Контроль (общий фон N_{24} P_{104}).
2. Фон + некорневая подкормка бором 300 г/га.
3. Фон + некорневая подкормка бором 900 г/га.
4. Фон + некорневая подкормка молибденом 100 г/га.
5. Фон + некорневая подкормка молибденом 300 г/га.

В исследованиях применялась общепринятая агротехника возделывания сои в Адыгее. Осень: двукратное лущение на глубину 12–14 см; отвальная обработка почвы 25–27 см; весна: внесение аммофоса $N_{24}P_{104}$; предпосевная культивация паровым культиватором КПС-4; посев сои сорта Ментор сеялкой Kinze 3000 8х70 с нормой высева 550 тыс. шт./га; внесение аммиачной селитры N_{40} (подкормка); некорневая обработка микроудобрениями с содержанием бора и молибдена ранцевым опрыскивателем; 2 междурядные культивации; внесение гербицида Концепт 0,9 л/га + инсектицид Эсперо 0,2 л/га; учет урожая комбайном Акрос 550.

Сложившиеся климатические условия за годы исследований существенно различались по влагообеспеченности. Менее благоприятными погодными условиями характеризовались 2021 и 2022 гг. Сев сои был проведен в третьей декаде июня, т.к. в мае и июне количество осадков превышало норму в 2,6 и 1,3 раза соответственно. В 2023 г. метеорологические условия были более благоприятными для роста и развития растений.

Результаты исследований

Влага – один из главных факторов, который влияет на рост и развитие растений. Исследованиями установлено, что распределение осадков в период налива бобов носило неравномерный характер, поэтому количество продуктивной влаги в слое почвы 0–60 см (среднее значение) составило 15,0 мм.

Величина объемной массы почвы в среднем за трехлетний период исследований в пахотном слое 0–40 см была в оптимальных пределах 1,25 г/см^3. Объемная масса почвы в посеве сои в фазу активного водопотребления (налив бобов) по слоям составила: 0–10 см – 1,19; 15–25 см – 1,25; 30–40 см – 1,31 г/см^3.

В почвенных образцах, отобранных в третьей декаде июля при фракционировании их в воздушно-сухом состоянии, агрономически ценная фракция (агрегаты размером 3–0,25 мм) в слое почвы 0–10 см составила 38,2 %, 15–25 см – 29,5 %, 30–40 см – 13,5 % (среднее за три года).

Густота стояния растений сои является важнейшей составляющей получения высокого урожая. Количество растений сои в период полных всходов по всем вариантам опыта варьировало в пределах 44,7–49,8 шт./м^2, к уборке густота стояния растений снизилась на 5,6 %.

Максимальная урожайность зерна сои была получена на вариантах с утроенной дозой микроудобрений: бор в дозе 900 г/га – 2,77 т/га и молибден в дозе 300 г/га – 2,66 т/га (табл. 1).

Таблица 1. Влияние некорневой подкормки растений микроудобрениями на урожайность сои 2021–2023 гг.

Table 1. The effect of foliar feeding of plants with microfertilizers on soybean yield in 2021–2023.

Варианты		Урожайность, т/га			Средняя	± к контролю
		2021 г.	2022 г.	2023 г.		
1.	Контроль (N_{24} P_{104})	2,11	2,10	2,16	2,12	-
2.	Фон + N_{40} + некорневая подкормка B 300 г/га	2,19	2,20	2,57	2,32	+0,20
3.	Фон + N_{40} + некорневая подкормка B 900 г/га	2,69	2,74	2,89	2,77	+0,65
4.	Фон + N_{40} + некорневая подкормка Mo 100 г/га	2,25	2,28	2,56	2,36	+0,24
5.	Фон + N_{40} + некорневая подкормка Mo 300 г/га	2,53	2,84	2,62	2,66	+0,54
$НСР_{05}$ +0,56 т/га						

Применение микроудобрений обеспечило прибавку по вариантам опыта от +0,20 до +0,65 т/га. Полученные прибавки достоверны $НСР_{05}$ + 0,56 т/га.

Показатели технологичности растений сои: высота растений, форма куста, прикрепление нижнего боба. Показатели высоты растений по вариантам составили от 55,1 до 59,2 см, высота прикрепления нижних бобов в среднем составила 12,0 см (табл. 2).

Изучаемые дозы некорневых подкормок оказали влияние на элементы структуры урожая сои. Наиболее высокие показатели по элементам структуры урожая семян сои достигнуты на вариантах с применением некорневой подкормки бором 900 г/га и молибденом 300 г/га: количество бобов на растении – 20,6 шт., 20,3 шт.; количество семян с одного растения – 56,2 шт., 50,1 шт.; масса семян с одного растения – 7,59 г, 6,73 г.

Таблица 2. Влияние некорневой подкормки растений микроудобрениями на структуру урожая сои 2021–2023 гг.

Table 2. The effect of foliar feeding of plants with microfertilizers on the structure of the soybean crop in 2021–2023.

Показатели	Варианты				
	Фон (N_{24} P_{104})	Фон + B 300 г/га	Фон + B 900 г/га	Фон + Mo 100 г/га	Фон + Mo 300 г/га
Количество растений на 1 м^2, шт.	55,0	57,7	58,7	55,0	57,0
Высота прикрепления нижних бобов, см	11,9	12,0	12,2	11,9	12,0
Количество ветвей на растении, шт.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Количество бобов с 1 растения, шт.	17,9	19,6	20,6	17,9	20,3
Масса семян с 1 растения, г	5,55	6,59	7,59	5,57	6,73
Количество семян с 1 боба, шт.	2,6	3,0	3,0	2,8	3,0
Количество семян с 1 растения, шт.	42,5	48,7	56,2	43,6	50,1
Масса 1000 зерен, г	132,4	136,8	141,8	139,4	140,4

Масса 1000 семян по вариантам опыта варьировала в пределах от 132,4 до 141,8 г.

Определение показателей качества зерна сои проводили в лаборатории филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Российский сельскохозяйственный центр» по Республике Адыгея. Содержание протеина и масла определяли, используя анализатор инфракрасный «Инфраскан-3150».

По результатам исследований установлено, что содержание протеина – в пределах от 25,10 до 25,55 % в зависимости от вариантов опыта, содержание масла в образцах варьировало от 24,4 до 24,5 %.

Рост урожайности способствовал увеличению прибыли и рентабельности. Повышение экономической эффективности возделывания сои зависит от увеличения данных урожайности [15].

Наибольшая экономическая эффективность отмечена на вариантах с использованием утроенной дозы: бора 2,77 т/га – чистый доход 54,0 тыс. руб./га, уровень рентабельности – 125,8 % и молибдена 2,66 т/га – чистый доход 51,3 тыс. руб./га, рентабельность – 122,7 %.

Выводы

По результатам исследований выявлено, что применение утроенной дозы микроудобрений для некорневой подкормки растений сои в фазе начала цветения способствовало повышению урожайности: бор – +0,65 т/га (к контролю), молибден – +0,54 т/га. Также это позволило увеличить рентабельность с 86,0 до 125,8 %. В итоге по результатам трехлетних исследований выявлено, что применение микроудобрений для подкормки по листу растений в период начала цветения увеличивает урожайность сои от 0,20 до 0,65 т/га по отношению к контролю. Наилучшие физические показатели качества зерна были отмечены на вариантах с наибольшей дозой бора и молибдена. Таким образом, за трехлетний период исследований разработаны рекомендации по применению различных доз микроудобрений на фоне отвальной обработки почвы, обеспечивающих повышение урожайности сои на 10–31 % и качества зерна на 5–10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белышкина М. Е., Шевченко В. А.* Влияние применения некорневых подкормок на симбиотическую деятельность и продуктивность сои северного экотипа // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. № 4(67). С. 206–211. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.206

2. *Рощина Е. Ю.* Эффективность производства сои в сельскохозяйственных организациях Краснодарского края // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018. № 1 (173). С. 78–81. DOI: 10.25230/2412–608X–2018–1–173–78–81

3. *Тишков Н. М., Махонин В. Л., Носов В. В.* Содержание и вынос элементов питания растениями сои в зависимости от применения удобрений // Масличные культуры. 2019. № 4 (180). С. 70–79. DOI: 10.25230/2412-608X-2019-4-180-70-79

4. *Щепеткова В. П.* Соя в чистом виде и в смесях с кукурузой // Возделывание кормовых культур на слитых черноземах Адыгеи. Майкоп: Отд. кн. изд-ва, 1981. 112 с.

5. *Минченко Ж. Н.* Эффективность различных микроудобрений при возделывании сои // Аграрный вестник Урала. 2022. № 09(224). С. 22–31. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-224-09-22-32

6. *Дубков А. А., Тимошинов Р. В., Кушаева Е. Ж., Клыков А. Г.* Влияние микроудобрений и регуляторов роста на урожайность сои в условиях Приморского края // Аграрная наука. 2023. № 11. Pp. 93–97. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-376-11-93-97

7. *Баранов В. Ф., Махонин В. Л., Уго Аламиро Торо Корреа, Щегольков А. В.* Роль некорневых подкормок в продукционном процессе агрофитоценозов сои и формировании жизнеспособности семян // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2013. № 1(153–154). С. 40–47. EDN: QCHNKV

8. *Тишков Н. М., Дряхлов А. А.* Отзывчивость сои на некорневую подкормку микроудобрениями на черноземе выщелоченном Краснодарского края // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2016. № 1(165). С. 81–87. EDN: VZYQQR

9. *Тишков Н. М., Дряхлов А. А*. Эффективность некорневой подкормки сои микроудобрениями на черноземе выщелоченном Западного Предкавказья // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2014. № 1(157–158). С. 52–55. EDN: SFBQPT

10. *Щегольков А. В.* Продуктивность сои в зависимости от применения некорневых подкормок серным, борным и молибденовым удобрениями на черноземе выщелоченном // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 106 (02). С. 212–224. EDN: TKLWPR

11. *Raj A. B., Raj S. K.* Zinc and boron nutrition in pulses: A review How to Cite // Journal of Applied and Natural Science. 2019. No. 11. Pp. 673–679. DOI: 10.31018/jans.v11i3.2157

12. *Маржохова М. Х., Кашукоев М. В.* Эффективность некорневой подкормки сои микроудобрениями (обзор) // Масличные культуры. 2020. № 2(190). С. 77–88. DOI: 10.25230/2412-608X-2022-2-190-77-88

13. *Костевич С. В., Асокин О. И.* Применение бора и молибдена на посевах сои // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского института масличных культур. 2008. Вып. 2 (139). С. 65–68. EDN: KHNBMB

14. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.

15. *Синеговский М. О., Малашонок А. А.* Анализ влияния экономических факторов на эффективность производства сои в Амурской области // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 10. С. 116–118. EDN: WWRNEB

REFERENCES

1. Belyshkina M.E., Shevchenko V.A. Effect of foliar feeding on symbiotic activity and productivity of northern ecotype soybeans. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020. No. 4(67). Pp. 206–211. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.206. (In Russian)

2. Roshchina E.Yu. Efficiency of soybean production in agricultural organizations of the Krasnodar Territory. *Maslichnyye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskiy byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* [Oilseed crops. Scientific and technical bulletin of the All-Russian Research Institute of Oilseed Crops]. 2018. No. 1(173). Pp. 78–81. DOI: 10.25230/2412–608X–2018–1–173–78–81. (In Russian)

3. Tishkov N.M., Makhonin V.L., Nosov V.V. The content and removal of nutrients by soybean plants depending on the use of fertilizers. *Oil Crops*. 2019. No. 4. (180). Pp. 70–79. DOI: 10.25230/2412-608X-2019-4-180-70-79. (In Russian)

4. Shchepetkova V.P. *Soya v chistom vide i v smesyakh s kukuruzoy* [Soybeans in pure form and in mixtures with corn]. *Vozdelyvaniye kormovykh kul'tur na slitykh chernozemakh Adygei* [Cultivation of forage crops on drained chernozems of Adygea]. Maykop: otd. kn. izd-va, 1981. 112 p. (In Russian)

5. Minchenko Zh.N. Efficiency of various microfertilizers in soybean cultivation. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2022. No. 09 (224). Pp. 22–31. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-224-09-22-32. (In Russian)

6. Dubkov A.A., Timoshinov R.V., Kushaeva E.Zh., Klykov A.G. Influence of microfertilizers and growth regulators on soybean yield in Primorsky Krai. *Agrarnaya nauka* [Agrarian Science]. 2023. No. 376(11). Pp. 93–97. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-376-11-93-97. (In Russian)

7. Baranov V.F., Makhonin V.L., Hugo Alamiro Toro Correa, Shchegolkov A.V. The role of foliar feeding in the production process of soybean agrophytocenoses and the formation of seed viability. *Maslichnyye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskiy byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* [Oilseed crops. Scientific and technical bulletin of the All-Russian Research Institute of Oilseed Crops]. 2013. No. 1(153–154). Pp. 40–47. EDN: QCHNKV. (In Russian)

8. Tishkov N.M., Dryakhlov A.A. Soybean responsiveness to foliar feeding with micronutrients on leached chernozem of the Krasnodar Territory. *Maslichnyye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskiy byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* [Oilseed crops. Scientific and technical bulletin of the All-Russian Research Institute of Oilseed Crops]. 2016. No. 1(165). Pp. 81–87. EDN: VZYQQR (In Russian)

9. Tishkov N.M., Dryakhlov A.A. Efficiency of foliar feeding of soybeans with microfertilizers on leached chernozem of the Western Ciscaucasia. *Maslichnyye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskiy byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* [Oil crops. Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Research Institute of Oil Crops]. 2014. No. 1 (157–158). Pp. 52–55. EDN: SFBQPT. (In Russian)

10. Shchegolkov A.V. Soybean productivity depending on the use of foliar feeding with sulfur, boron and molybdenum fertilizers on leached chernozem. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2015. No. 106 (02). Pp. 212–224. EDN: TKLWPR. (In Russian)

11. Raj A.B., Raj S.K. Zinc and boron nutrition in pulses: A review How to Cite. *Journal of Applied and Natural Science*. 2019. No. 11. Pp. 673–679. DOI: 10.31018/jans.v11i3.2157

12. Marzhokhova M.Kh., Kashukoev M.V. Efficiency of foliar feeding of soybeans with microfertilizers (review). *Oil Crops*. 2020. No. 2(190). Pp. 77–88. DOI: 10.25230/2412-608X-2022-2-190-77-88. (In Russian)

13. Kostevich S.V., Asokin O.I. Application of boron and molybdenum in soybean crops. *Maslichnyye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskiy byulleten' Vserossiyskogo instituta maslichnykh kul'tur* [Oilseed crops. Scientific and technical bulletin of the All-Russian Institute of Oil Crops]. 2008. No. 2(139). Pp. 65–68. EDN: KHNBMB. (In Russian)

14. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Field experiment methodology]. Moscow: Kolos, 1979. 416 p. (In Russian)

15. Sinegovsky M.O., Malashonok A.A. Analysis of the influence of economic factors on the efficiency of soybean production in the Amur region. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex.* 2016. Vol. 30. No. 10. Pp. 116–118. EDN: WWRNEB. (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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Благополучная Ольга Анатольевна, ст. науч. сотр., отдел земледелия, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Майкопский государственный технологический университет»;

385064, Россия, г. Майкоп, п. Подгорный, ул. Ленина, 48;

blagopolu4naya@list.ru, ORCID: https//orcid.org/0000-0002-6135-6057, SPIN-код: 2486-9287

Девтерова Наталья Ильинична, ст. науч. сотр., отдел земледелия, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Майкопский государственный технологический университет»;

385064, Россия, г. Майкоп, п. Подгорный, ул. Ленина, 48;

devterova55@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5859-2630, SPIN-код: 6786-5636

Information about the authors

Olga A. Blagopoluchnaya, Senior Researcher, Department of Agriculture, Research Institute of Agriculture, Maykop State Technological University;

385064, Russia, Maykop, Podgorny, 48 Lenin street;

blagopolu4naya@list.ru, ORCID: https//orcid.org/0000-0002-6135-6057, SPIN-code: 2486-9287

Natalia I. Devterova, Senior Researcher, Department of Agriculture, Research Institute of Agriculture, Maykop State Technological University;

385064, Russia, Maykop, Podgorny, 48 Lenin street;

devterova55@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5859-2630, SPIN-code: 6786-5636

АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ

УДК 631.5(470.621) Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-268-279
EDN: TSHHWG

Изучение влияния биопрепарата «Лигногумат» в сочетании с минеральными удобрениями на продуктивность ячменя озимого в условиях южно-предгорной зоны Адыгеи

Н. И. Девтерова

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства
«Майкопский государственный технологический университет»
385064, Россия, г. Майкоп, п. Подгорный, ул. Ленина, 48

Аннотация. Приведены результаты полевых экспериментов, проведенных на лугово-черноземной выщелоченной слитой сверхмощной глинистой почве, с целью изучения влияния гуминового биопрепарата «Лигногумат» в сочетании с минеральными удобрениями на продуктивность ячменя озимого. В опыте использовали: дискование почвы на глубину 12–16 см; сульфоаммофос $N_{20}P_{20}S_8$, (200 кг/га физического веса, N_{40} действующего вещества на 1 га), аммиачную селитру $NH_4\ NO_3$, (106 кг/га физического веса, N_{36}) и биопрепарат в фазу колошения и налива зерна. Расчет доз удобрений проводили по лимитирующему элементу азоту, обработку биопрепаратом по вариантам: 1) 0,0 контроль; 2) 0,6; 3) 0,8; 4) 1,0 л/га. Комплексное применение биопрепарата, минеральных удобрений и средств защиты растений способствовало оптимизации содержания фосфора (0,32–0,41%), взаимодействия макроэлементов калия и кальция и их содержания в листьях растений, положительно повлияло на общее число растений и продуктивных стеблей, число и массу 1000 зерен. Наиболее эффективен прием с внесением: $N_{40}P_{40}S_{16}$ (сульфоаммофос) + N_{36} (аммиачная селитра) + «Лигногумат» (0,8 л/га). В этом варианте урожайность выше на 39,5 % в сравнении с контролем. Стоимость валовой продукции поднялась за счет роста урожайности с 49,4 до 74,1 тыс. руб. Выросли также показатели условно чистого дохода и уровня рентабельности – 60,4 %. Применение на практике разработанного приема возделывания способствовало стабилизации почвенного плодородия – содержание гумуса на начало 4,2 % и окончание исследований 4,03 % в одной группе обеспеченности; повышению продуктивности ячменя озимого на 25,6–39,5 %, увеличению содержания протеина в зерне на 10,38–11,34 %.

Ключевые слова: ячмень озимый, обработка почвы, биопрепарат «Лигногумат», удобрения, средства защиты растений, влияние использования, листовая диагностика, элементы плодородия, урожайность, прибавки урожайности, структура урожая, качество зерна

Поступила 07.11.2024, одобрена после рецензирования 04.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Девтерова Н. И. Изучение влияния биопрепарата «Лигногумат» в сочетании с минеральными удобрениями на продуктивность ячменя озимого в условиях южно-предгорной зоны Адыгеи // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 268–279. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-268-279

© Девтерова Н. И., 2024

Original article

Study of the influence of the biopreparation Lignohumate in combination with mineral fertilizers on the productivity of winter barley in the conditions of the southern foothill zone of Adygea

N.I. Devterova

Research Institute of Agriculture
Maikop State Technological University
385064, Russia, Maikop, Podgorny, 48 Lenin street

Abstract. The article presents the results of field experiments conducted on meadow-chernozem leached drained super-deep clay soil in order to study the effect of the humic biopreparation Lignohumate in combination with mineral fertilizers on the productivity of winter barley. The experiment included the following: disking of the soil to a depth of 12-16 cm; fertilizers: sulfoammophos N20P20S8 (200 kg/ha of physical weight, N40 active substance per 1 ha), ammonium nitrate: NH4 NO3 (106 kg/ha of physical weight, N36) and the biopreparation during the heading and grain filling phases. Fertilizer doses were calculated based on the limiting element nitrogen. Treatment with the biopreparation according to the following variants: 1. 0.0 control; 2. 0.6; 3. 0.8; 4. 1.0 l/ha. The combined use of the biopreparation, mineral fertilizers and plant protection products helped to optimize the phosphorus content (0.32 – 0.41%), the interaction of the macronutrients potassium and calcium and their content in plant leaves, and had a positive effect on the total number of plants and productive stems, the number and weight of 1000 grains. The most effective method was the introduction of: N40P40S16 (sulfoammophos) + N36 (ammonium nitrate) + Lignohumate (0.8 l/ha). In this variant, the yield was 39.5% higher than in the control. The cost of gross output increased due to the yield growth from 49.4 to 74.1 thousand rubles. The conditional net income and profitability levels also increased to 60.4 %. The practical application of the developed cultivation method contributed to the stabilization of soil fertility – the humus content at the beginning of 4.2% and the end of the studies 4.03 % in one provision group; an increase in the productivity of winter barley by 25.6–39.5 %, an increase in the protein content in grain by 10.38–11.34 %.

Keywords: winter barley, soil cultivation, biopreparation Lignohumate, fertilizers, plant protection products, the effect of use, leaf diagnostics, fertility elements, yield, yield increases, crop structure, grain quality

Submitted 07.11.2024, approved after reviewing 04.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Devterova N.I. Study of the influence of the biopreparation Lignohumate in combination with mineral fertilizers on the productivity of winter barley in the conditions of the southern foothill zone of Adygea. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 268–279. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-268-279

Введение

Цель исследований. Разработать высокоэффективный природоохранный прием производства зерна ячменя озимого с использованием гуминового удобрения «Лигногумат» в сочетании с минеральными удобрениями и средствами защиты растений в рамках ресурсосберегающей технологии при сохранении почвенного плодородия в условиях южно-предгорной зоны Адыгеи.

Задачи исследований. Изучение влияния действия гуминового удобрения «Лигногумат» в сочетании со средствами химизации на повышение:

- содержания элементов питания в почве и листьях (по результатам почвенной и листовой диагностики);

- эффективности применения минеральных удобрений и средств защиты растений;
- продуктивности ячменя озимого;
- качества сельскохозяйственной продукции (содержание протеина);
- экономической эффективности возделывания.

Научная новизна темы исследований. В условиях южно-предгорной зоны Адыгеи на лугово-черноземной выщелоченной слитой сверхмощной глинистой почве проводили исследования по разработке высокоэффективных природоохранных приемов применения биопрепарата «Лигногумат» в сочетании с минеральными удобрениями и средствами защиты растений, в рамках ресурсосберегающей почвенной обработки для увеличения производства зерна ячменя озимого, улучшения качества сельскохозяйственной продукции и сохранения плодородия почвы.

Актуальность темы исследования. Препараты на основе гуминовых веществ занимают важное место в разработке современных инновационных технологий в области растениеводства. Во многих опытах отмечено повышение урожайности, качества продукции (увеличение содержания белка в зерне), а также улучшение структурных показателей урожайности: числа продуктивных стеблей, числа и массы зерен в колосе.

Однако отмечается также, что эффективность воздействия гуминовых препаратов нестабильна и прибавки урожая на зерновых варьируют в широком диапазоне (несущественные 2–13 %, в отдельных случаях до 20–30 %).

Реакция растений на применение гуминовых продуктов в опытах зависит от многих факторов: свойств гуминового удобрения, способов его внесения, условий закладки и проведения опыта, используемых сортов растений, а также почвенно-климатических условий места возделывания, что и определило актуальность исследований в условиях южно-предгорной зоны РА.

Выбор гуминового удобрения для проведения исследований был сделан в пользу биопрепарата «Лигногумат^{R}» с захватывающим (хелатным) агентом, способным удерживать ионы микроэлементов, а затем высвобождать и переводить их в биологически доступную для растений форму. В исследованиях Н. С. Томашевича и А. Я. Барчуковой, проведенных на лугово-черноземных почвах, показано: обработка семян риса препаратом «Лигногумат» существенно повышает его урожайность в сравнении с контролем на 8,5–10,8 ц/га и на 7,6–9,5 ц/га, в зависимости от сорта. Прибавки урожая (12,3 и 12,7 %) отмечены в вариантах с обработкой как семян, так и растений [1].

Использование «Лигногумата» на черноземных карбонатных почвах в условиях Северо-Западного Предкавказья для возделывания озимой пшеницы способствовало повышению содержания элементов питания и их усвоению в течение всего периода вегетации. Для обработки растений в фазе весеннего кущения применяли «Лигногумат» в дозе 0,35 л/га, для обработки семян – 10 л/т, что обеспечило увеличение потребления NPK растениями соответственно на 16,8, 23,4 и 13,9% при обработке семян и на 17,4, 25,5 и 13,2% – при обработке растений. Применение в этих исследованиях оптимальных доз «Лигногумата» способствовало росту прибавок урожайности озимой пшеницы соответственно на 5,7 и 4,0 ц/га [2].

Таким образом, применение биопрепарата «Лигногумат» на озимых зерновых способствует:

- увеличению общей урожайности на 10–25 %;
- увеличению содержания протеина;
- повышению засухоустойчивости растений в основном за счет увеличения корневой системы растений;

- повышению коэффициента использования удобрений растениями [3].

Отмечают два вида влияния гуминовых удобрений на растения: прямое и косвенное. Косвенный эффект связан с улучшением водно-физических свойств почвы, активизацией микрофлоры, влиянием на миграцию питательных элементов, повышением коэффициента использования минеральных удобрений [4].

Результаты опытов по применению биопрепарата «Лигногумат» в производственных условиях на посевах озимых зерновых с одной, двумя внекорневыми подкормками показали, что использование этих приемов способствовало увеличению энергии прорастания, полевой всхожести и в конечном итоге росту урожайности и повышению качества зерна.

Исследования по применению биопрепаратов в условиях южно-предгорной зоны РА проводили в стационарных полевых опытах на полях ФГБНУ «Адыгейский НИИСХ». На яровом овсе и яровом ячмене изучали 7 вариантов, один из которых Ризоагрин + «Лигногумат» (обработка посевного материала 0,6 л/т + обработка посевов в период вегетации в дозе 0,75 л/га.)

По яровому ячменю высокие показатели урожайности отмечены на фоне вспашки (20–22 см) на варианте с применением Ризоагрин + Лигногумат 2,24 т/га + 0,45 т/га к контролю.

По поверхностной обработке на этом же варианте применения биопрепаратов отмечены показатели урожайности на уровне 1,79 т/га + 0,32 т/га к контролю.

Проведенные исследования показали, что применение биопрепаратов не оказало существенного влияния на урожайность и качество зерна ярового овса. Наибольшая прибавка урожайности отмечена по поверхностной обработке (+ 0,21 т/га) в сравнении с контролем (3,23 т/га), Лучшие физиологические показатели натуры зерна + 7,0 г/л к контролю (390,3 г/л) достигнуты на вариантах по поверхностной обработке [5, 6].

Методика проведения исследований. Исследования в 2021–2023 гг. проводили на научных полях НИИСХ ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет» в соответствии с рекомендуемой методикой полевого опыта [7]. Почва опытного участка – чернозем слитой выщелоченный слабогумусный сверхмощный. Изучали влияние использования биопрепарата «Лигногумат» и совместного его применения с расчетными нормами внесения минеральных удобрений на фоне минимальной обработки почвы на посевах ячменя озимого сорта Каррера.

В опыте использовали двукратное дискование почвы на глубину 12–16 см и четыре варианта применения удобрений в сочетании с различными дозами биопрепарата «Лигногумат».

Варианты внесения удобрений и биопрепарата «Лигногумат» при использовании марки Б:

Вариант 1: $N_{20}P_{20}S_8 + NH_4NO_3$ (контроль)

Вариант 2: $N_{20}P_{20}S_8 + NH_4NO_3$ + «Лигногумат» (0,3 + 0,3 л/га)

Вариант 3: $N_{20}P_{20}S_8 + NH_4NO_3$ + «Лигногумат» (0,4 + 0,4 л/га)

Вариант 4: $N_{20}P_{20}S_8 + NH_4NO_3$ + «Лигногумат» (0,5 + 0,5 л/га)

Вносили:

- сульфоаммофос $N_{20}P_{20}S_8$ перед севом, 200 кг/га в физическом весе (N_{40} действующего вещества на 1 га);

- аммиачную селитру NH_4NO_3, в дозе 36 кг действующего вещества на 1 га (106 кг/га) – в период активной весенней вегетации;

- гербицид Гран-Стар – 15 г/га и Примадонна 0,7 л/га – во время активной вегетации однолетних и многолетних двудольных сорных растений.

Проводили две внекорневые подкормки 20% водным раствором биопрепарата «Лигногумат» – марки Б. Первая – в фазу колошения, вторая – в фазу налива зерна.

Опытные делянки площадью 50 м^2 размещали рендомизированно, при четырехкратном повторении.

Характеристика сорта. Сорт Каррера рекомендован для возделывания в Краснодарском и Ставропольском краях, республиках Северного Кавказа, относится к группе среднеранних-среднеспелых сортов. Сроки сева оптимальны для зоны возделывания. Вегетационный период в среднем 240 дней. Зернофуражный. Средние показатели: урожайность в регионе – 63,8 ц/га, содержание белка в зерне 8,5–12,79 %, пленчатость 8,7–9,2 %, натура зерна – 650–690 г/л, масса 1000 зерен 38–47 г. Сорт Каррера толерантен к повышенной кислотности почвы. Обладает высокой полевой устойчивостью к мучнистой росе и карликовой ржавчине. В средней степени устойчив к сетчатой и темно-бурой пятнистостям. В полевых условиях слабо поражается бурой ржавчиной; очень сильно гельминтоспориозом и пыльной головней[1].

Растения ячменя предъявляют к почвам повышенные требования, что связано со слабым развитием корневой системы. Потребление питательных веществ растениями ячменя по большей части происходит в период кущения – выхода растений в трубку. Отзывчивость на удобрения хорошая. Внесение высоких доз азотных удобрений приводит к перерастанию вегетативной массы и вызывает раннее полегание растений, ограничивает возможность роста урожая, снижает зимостойкость. Фосфорно-калийные удобрения в оптимальных дозах и небольшие дозы азотных повышают зимостойкость культуры. При возделывании ячменя озимого на черноземах выщелоченных слитых под основную обработку почвы вносят $N_{60}P_{60}K_{60}$ + 20 кг/га гранулированного суперфосфата при посеве, в ранневесеннюю подкормку N_{40} по результатам почвенной диагностики [8].

Результаты исследований

Полевые эксперименты проводили на черноземной слитой выщелоченной слабогумусной сверхмощной почве.

Результаты агрохимического анализа почвенных образцов опытного участка (табл. 1) свидетельствуют о стабильности содержания определяемых элементов плодородия на начало и окончание исследований, содержание гумуса: 4,20; 4,03 % – очень низкая группа обеспеченности (<5%, по методу Тюрина). Степень кислотности $pH_{сол}$ – 4,99; 4,79 (4,6–5,0 мг/экв. на 100 г почвы, среднекислая), подвижного фосфора – 29,7; 27,6 мг/кг почвы (16–30 мг/кг почвы, средняя группа обеспеченности по методу Мачигина). Отмечено увеличение содержания аммиачной формы минерального азота весной; содержание азота – нитратов в период окончания исследований 17,0 мг/кг (высокая), на начало исследований 3,69 мг/кг (очень низкая), (>15 мг/кг почвы, высокая группа обеспеченности по Кравкову). Однако следует отметить, что параметры содержания азота в почве в условиях южно-предгорной зоны РА нестабильны. Нитратной форме минерального азота свойственно легко перемещаться по почвенному профилю, нитраты подвержены вымыванию с осадками, и, поступив в растения, они проходят сложный цикл химических преобразований. Повышение содержания легко усвояемых форм азота зависит прежде всего от оптимального количества влаги в период вегетации, от видов и норм азотных удобрений, способов их заделки, сроков внесения.

[1]agrostd.com. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1 «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. С. 20.

Таблица 1. Результаты агрохимического анализа образцов почвы (начало – окончание исследований)

Table 1. Results of agrochemical analysis of soil samples (beginning – end of the research)

Показатели почвенного плодородия								
	Гумус (%)	Кислотность, мг экв./100 г		Азот, мг/кг почвы $N\text{-}NH_4$		Фосфор подвижный, мг/кг почвы	Сумма поглощенных оснований, мг экв./100 г	
		солевая	водная	нитратный	аммиачный		Ca^+	Mg^+
Начало исследований	4,20	4,99	6,50	3,69	9,50	29,7	23,27	7,31
							30,58	
Окончание исследований	4,03	4,79	5,99	17,0	6,40	27,6	25,25	8,0
							33,25	

Условия увлажнения. При оптимально складывающихся условиях тепла и влаги посев ячменя озимого в южно-предгорной зоне РА проводится в первой декаде октября. Однако в этот период переувлажнение наблюдалось во все годы исследований. В 2021 г.: количество осадков превысило норму в январе – марте в 2,1, в апреле – июне в 1,7, в июле – октябре в 1,5 раза.

В 2022 г. в период оптимального срока сева при норме 58 мм осадков в месяц выпало 93,5 мм, что составило 161,0 % от нормы, в 2023 г. 79,0 мм – 136,2 %.

Переувлажнение в период вегетации культуры составило: октябрь 2021 – июнь 2022 г. – от 104,0 до 244,0 %, октябрь 2022–2023 гг. – соответственно от 102,6 до 216,6[2].

В период необходимого начала полевых работ наблюдались избыточное увлажнение и низкая испаряемость, данные обстоятельства послужили причиной более поздних сроков сева ячменя озимого, минимум на 2–3 недели, во все годы исследований.

Листовая диагностика растений ячменя озимого. Применение удобрений, средств защиты растений и возрастающих доз Лигногумата способствовало оптимизации взаимодействия макроэлементов калия (K) и кальция (Ca) и их содержания в листьях растений ячменя озимого. В исследованиях Т. А. Кирдей отмечено, что под влиянием гуминовых препаратов изменяется содержание калия, кальция, магния, железа в клетках растений, в результате активизируются многие ферментные системы [9].

Исследования на содержание макроэлементов в верхних зеленых листьях ячменя озимого в фазу колошения – созревания показали малый уровень содержания общего азота, оптимальный уровень содержания фосфора (табл. 2).

Избыток кальция (Ca) сопряжен с одновременным относительным недостатком калия (K) на вариантах 1 и 2, а на остальных вариантах эти макроэлементы находились в равновесии, что согласуется с научными данными [10].

[2] admin@pogoda360.ru

Таблица 2. Содержание макроэлементов в верхних зеленых листьях ячменя озимого в фазу колошения-созревания (средние значения)

Table 2. Content of macroelements in the upper green leaves of winter barley in the heading-ripening phase (average values)

Элемент/Гост	Вариант	Уровень содержания, %		
		фактический		оптимальный
Азот (N) Общий/13494 – 4 – 2019	1	2,50	малый	3,2–3,5
	2	2,07	малый	3,2–3,5
	3	2,38	малый	3,2–3,5
	4	2,81	малый	3,2–3,5
Фосфор (P) Общий/26665 7 – 97	1	0,41	оптимальный	0,3–0,44
	2	0,32	оптимальный	0,3–0,44
	3	0,32	оптимальный	0,3–0,44
	4	0,36	оптимальный	0,3–0,44
Калий (K) Общий/30504 – 97	1	0,87	малый	0,9–1,2
	2	0,85	малый	0,9–1,2
	3	1,30	повышенный	0,9–1,2
	4	1,44	повышенный	0,9–1,2
Кальций (Ca) Общий/26570 - 95	1	1,16	избыточный	0,36
	2	1,17	избыточный	0,36
	3	1,15	избыточный	0,36
	4	1,16	избыточный	0,36
Зола/26226 – 95	1	16,25	–	–
	2	14,82	–	–
	3	14,78	–	–
	4	13,86	–	–

Урожайность зерна ячменя озимого в опыте. Средняя урожайность ячменя озимого в зависимости от применяемых норм Лигногумата в сочетании с минеральными удобрениями и средствами защиты растений составила 5,2 т/га (табл. 3).

Наибольшая урожайность 6,0 т/га получена на варианте: Фон + N_{36} + Лигногумат, с нормой внесения 0,8 л/га прибавка составила + 1,7 т/га – 39,5 % Прибавка урожайности достоверна на 5%-ном уровне значимости (+ 1,1 т/га).

Применение возрастающих доз Лигногумата совместно с удобрениями способствовало повышению урожайности в сравнении с контролем в среднем в вариантах: 2 – на 14,0 %; 3 – на 39,5 %; 4 – на 25,6 %.

Положительная тенденция эффективности применения нормы внесения: $N_{20}P_{20}S_8$ + N_{36} + Лигногумат (0,4 + 0,4 л/га) прослеживалась на протяжении всего периода исследований. Прибавки урожайности, полученные на лучших вариантах, достоверны, за исключением варианта с применением $N_{20}P_{20}S_8$ + NH_4NO_3 + «Лигногумат» (0,3 + 0,3 л/га). На лучших вариантах показатели урожайности повысились в сравнении с контролем (4,3 т/га) на +1,7 и + 1,1 т/га (6,0; 5,4 т/га).

Таблица 3. Влияние совместного применения «Лигногумата» и минеральных удобрений на урожайность ячменя озимого (2021–2023 гг.)

Table 3. Effect of combined use of Lignohumate and mineral fertilizers on winter barley yield (2021–2023)

Вариант опыта		Урожайность (по годам), т/га			средняя	Прибавки, ±
Обработка почвы (фактор А)	Удобрение (фактор Б)	2021	2022	2023		
Поверхностная обработка (двукратное дискование на 12–16 см)	*$N_{20}P_{20}S_8$ (фон)+N_{36} контроль	4,7	3,8	4,5	4,3	
	Фон+N_{36} + Лигногумат*(0,6 л/га)	5,1	4,3	5,4	4,9	+0,6
	Фон+N_{36} + Лигногумат(0,8 л/га)	5,9	5,7	6,3	6,0	+1,7
	Фон+N_{36} + Лигногумат*(1,0 л/га)	5,3	4,9	6,0	5,4	+1,1
$НСР_{05}$ т/га		+0,71	+1,1	+ 0,67	-	+1,1

Примечание: * Фон – $N_{20}P_{20}S_8$ (сульфоаммофос), 200 кг/га + подкормка аммиачной селитрой в дозе N_{36}; Лигногумат* – внесение в фазу колошения и в фазу налива зерна.

Формирование более высоких показателей биологической урожайности зависело от числа продуктивных стеблей на единице площади и зерен в колосе, массы зерна с одного колоса, массы 1000 зерен (табл. 4).

Таблица 4. Биологическая урожайность ячменя озимого

Table 4. Biological yield of winter barley

Варианты опыта	Урожайность (по повторениям), т/га				Средняя	Прибавки ±
	I	II	III	IV		
*$N_{20}P_{20}S_8$ (фон)+N_{36}	4,2	5,7	3,7	4,2	4,4	-
*$N_{20}P_{20}S_8$ (фон)+N_{36} + Лигногумат	5,6	3,8	2,9	5,4	4,4	0,0
Фон+N_{36} + Лигногумат*	7,2	7,1	6,8	4,4	6,4	+2,0
Фон+N_{36} + Лигногумат*	4,6	5,5	7,4	5,8	5,8	+1,4
Средняя	5,4	5,5	5,2	5,0	5,3	+0,9

В среднем на 1 м^2 сформировано 373 шт. продуктивных стеблей, 43,5 шт. зерен в колосе.

Масса зерна с одного колоса – 1,63 г, масса 1000 зерен – 38,6 г (39,0; 37,4; 38,4; 39,7; опт. 38,0 – 47,0). Средняя биологическая урожайность – 5,3 (+0,9 в сравнении с контролем) т/га. Уборочный индекс – 50,4 %. Показатели доли массы зерна в фазу уборочной спелости (уборочный индекс) находятся в оптимальных пределах по вариантам: (45,4; 44,6; 59,7; 52,2) и в среднем 50,4 (опт. 30,8 – 55,0 – 60,0 %) (табл. 5). Применение возрастающих доз «Лигногумата» способствовало повышению эффективности удобрений.

Данное обстоятельство оказало положительное влияние на формирование:

- общего количества растений – 386 (контроль); 432; 421; 452, (11,9; 9,1; 17,1 %);
- продуктивных стеблей – 353 (контроль); 392; 361; 351 (11,0; 2,3 %);

- величину озерненности колоса – 43,5 (контроль); 40,6; 41,4; 46,3 (1,3 %);
- и в конечном итоге на величину биологической урожайности – 4,4 (контроль); 4,4; 6,4; 5,8 (45,4; 31,8 %) (табл. 5).

Таблица 5. Структурный анализ урожайности ячменя озимого сорта Каррера (средние данные)

Table 5. Structural analysis of the yield of winter barley variety Carrera (average data)

Варианты		Общее количество стеблей/продуктивных шт./м^2	Коэффициент продуктивной кустистости/число зерен в колосе, шт./м^2	Масса 1000 зерен/масса зерна с одного колоса, г опт. 38,0-47,0	Биологическая урожайность		Уборочный индекс: вес зерна/ вес снопа без корней, % опт. 30,8-55,0-60,0
					т/га	прибавки ±	
Поверхностная обработка	*$N_{20}P_{20}S_8$ (фон)+N_{36+}	386/328	0,84/43,9	39,0/1,68	4,5	-	45,4
	*$N_{20}P_{20}S_8$ (фон)+N_{36+} Лигногумат	432/390	0,90/40,6	37,4/1,47	4,4	-0,1	44,6
	Фон+N_{36} +Лигногумат*	421/384	0,90/41,2	38,4/1,67	6,4	+1,9	59,7
	Фон+N_{36} +Лигногумат*	452/388	0,82/46,3	39,7/1,71	5,8	+1,3	52,2
	Среднее	423/373	0,86/43,5	38,6/1,63	5,3	+1,8	50,4

*Содержание протеина в зерне ячменя озимог*о. Согласно протоколу испытаний среднее содержание протеина в зерне ячменя озимого сорта Каррера (табл. 6) составило 10,24 %, что входит в параметры оптимальных показателей для этого сорта (8,5–12,79 %).

Последовательное увеличение норм внесения «Лигногумата»: 0,6 → 0,8 → 1,0 л/га способствовало увеличению содержания протеина по вариантам (В2 – 9,72; В3 – 10,38; В4 – 11,34) в сравнении с контролем (В1 – 9,5). Прибавки составили + 0,22; + 0,88; + 1,84 или 2,3; 9,3; 19,4 % соответственно.

Комплексное применение удобрений, средств защиты растений и биопрепарата «Лигногумат» способствовало повышению урожайности в сравнении с контролем в среднем на 13,1 % (В2); 50 % (В3); 28,9 % (В4).

Таблица 6. Содержание протеина в зерне ячменя озимого сорта Каррера

Table 6. Protein content in winter barley grain of the Carrera variety

Вариант/Гост 10846 - 91	Содержание протеина в зерне ячменя по повторениям, %.			Прибавки, ±
	I,III	II,IV	среднее	
1	9,60	9,41	9,50	-
2	10,21	9,24	9,72	+0,22 (2,3%)
3	11,50	9,25	10,38	+0,88 (9,3%)
4	10,98	11,69	11,34	+1,84 (19,4%)
среднее	10,57	9,90	10,24	

За счет увеличения средней урожайности стоимость продукции с 1 га поднялась с 49,4 тыс. руб. до 74,1 тыс. руб. Самый высокий уровень рентабельности 60,4 % отмечен на варианте: фон + аммиачная селитра N_{36} + Лигногумат с нормой внесения 0,8 л/га.

Заключение

В исследованиях получены экспериментальные данные по влиянию биопрепарата «Лигногумат» калийный марки Б в сочетании с минеральными удобрениями и средствами химизации на продуктивность ячменя озимого на фоне минимальной обработки почвы с использованием двукратного дискования со следующими нормами применения удобрений:

Вариант 1. $N_{20}P_{20}S_8 + N_{36}$ (фон – 200 кг/га сульфоаммофос);

Вариант 2. $N_{20}P_{20}S_8+N_{36}$ + Лигногумат (0,3+0,3 л/га);

Вариант 3. $N_{20}P_{20}S_8+N_{36}$ + Лигногумат (0,4+0,4 л/га);

Вариант 4. $N_{20}P_{20}S_{8+}N_{36}$ + Лигногумат (0,5+0,5 л/га).

Комплексное применение удобрений, средств защиты растений и биопрепарата «Лигногумат» способствовало:

- повышению урожайности в сравнении с контролем в среднем по вариантам: В2 на 13,1 %; В3 на 39,5 %; В4 на 25,6 %. Прибавки урожайности (+ 1,7 и + 1,1 т/га), полученные на вариантах с внесением биопрепарата в дозах 0,8–1,0 л/га достоверны ($НСР_{05}$ + 1,1 т/га);

- оптимизации взаимодействия макроэлементов калия (K) и (Ca) и их содержания в листьях растений ячменя озимого согласно результатам листовой диагностики;

- улучшению качества полученной продукции: показатели массы 1000 зерен 37,4–39,7 (опт. 38–47,0);

- увеличению содержания протеина по вариантам (9,72; 10,38; 11,34 %) в сравнении с контролем (9,5 %);

- положительному влиянию на формирование общего количества растений: 386 (контроль); 432; 421; 452, (11,9; 9,1; 17,1 %), продуктивных стеблей: 328 (контроль); 390; 384; 388 (18,9; 17,1; 18,3 %), на величину озерненности колоса: 43,9 (контроль); 40,6; 41,2; 46,3 (5,5 %) и в конечном итоге на величину биологической урожайности: 4,4 (контроль); 4,4; 6,4; 5,8; (45,4; 31,8 %);

- получению лучших показателей на вариантах с внесением «Лигногумата» в дозах 0,8 – 1,0 л/га.

Средняя урожайность зерна ячменя озимого в исследованиях составила 5,2 т/га. Максимум урожайности 6,0 т/га получен на варианте с применением двукратного дискования почвы дисковой бороной (БДМ-4) на глубину 12–16 см; удобрений: сульфоаммофоса перед севом $N_{20}P_{20}S_8$ (200 кг/га физического веса, N_{40} действующего вещества на 1 га), аммиачной селитры $NH_4\ NO_3$ (106 кг/га в физическом весе N_{36}, в подкормку весной) + «Лигногумат» с нормой внесения 0,4 + 0,4 л/га. Этот эффективный прием возделывания обеспечил наиболее высокий уровень рентабельности 60,4 %.

В результате исследований выявлен наиболее эффективный прием возделывания ячменя озимого с применением биопрепарата «Лигногумат» в дозе 0,8 л/га + сульфоаммофос $N_{40}P_{40}S_{16}$ + аммиачная селитра, N_{36}. Применение разработанных параметров возделывания способствовало повышению продуктивности ячменя озимого на 25,4–39,5 %, увеличению содержания протеина (10,38–11,34 %) и стабилизации почвенного плодородия (содержание гумуса 4,2 – 4,03 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Томашевич Н. С. Барчукова А. Я.* Кубанский ГАУ. Влияние обработки семян растений различными формами препарата Лигногумат Супер на урожайность и качество риса // Плодородие. 2013. № 6. С. 21–22.

2. *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

3. Лигногумат: общая информация, методика и результаты применения. Рекомендации для агрономов. Санкт-Петербург. 48 с.

4. *Лазарев В. И., Минченко Ж. Н.* Рекомендации по применению гуминовых удобрений на посевах ярового ячменя: брошюра. Курск: Курский федеральный аграрный научный центр, 2023. 39 с.

5. *Благополучная О. А.* Урожайность и качество зерна ярового овса при использовании биопрепаратов // Инновационные технологии для АПК юга России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 55-летию образования Адыгейского НИИСХ (с международным участием). 21–23 сентября 2016 года. Майкоп: Магарин О.Г., 2016. С. 112–115.

6. *Благополучная О. А., Мамсиров Н. И., Дагужиева З. Ш.* Приемы комплексного использования биопрепаратов нового поколения на яровых зерновых культурах при ресурсосберегающих приемах обработки слитых черноземов Республики Адыгея // Вопросы современной науки: коллективная научная монография. М.: Интернаука, 2017. Т. 20(12). С. 37–56.

7. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.

8. *Шеуджен А. Х.* Питание и удобрение зерновых культур. Ячмень. Майкоп: Аякс, 2010. 20 с.

9. *Кирдей Т. А.* Гуминовые препараты в агротехнологиях // Земледелие. 2013. № 5. С. 12–14. EDN: RENOOH

10. *Церлинг В. В.* Агрохимические основы минерального питания сельскохозяйственных культур. М.: Наука, 1978. 214 с.

REFERENCES

1. Tomashevich N.S., Barchukova A.Ya. Kuban State Agrarian University. Effect of treating plant seeds with various forms of Lignohumate Super on rice yield and quality. *Plodorodie.* [Fertility]. 2013. No. 6. Pp. 21–22. (In Russian)

2. Sheudzhen A.Kh., Gutorova O.A., Lutsenko I.M. Agrochemical assessment of lignohumate application in winter wheat crops under conditions of the North-West Ciscaucasia *Agrokhimiy*a [Agrochemistry]. 2022. No. 3. Pp. 31–40. DOI: 10.31857/S0002188122030103. (In Russian)

3. *Lignogumat: obshchaya informatsiya, metodika i rezul'taty primeneniya. Rekomendatsii dlya agronomov* [Lignohumate: General information, methods and results of application. Recommendations for agronomists]. St. Petersburg. 48 p. (In Russian)

4. Lazarev V.I., Minchenko Zh.N. *Rekomendatsii po primeneniyu guminovykh udobreniy na posevakh yarovogo yachmenya: broshyura* [Recommendations for the application of humic fertilizers in spring barley crops]: brochure]. Kursk: Kurskiy federal'nyy agrarnyy nauchnyy tsentr, 2023. 39 p. (In Russian)

5. Blagopoluchnaya O.A. Yield and grain quality of spring oats using biopreparations. *Innovatsionnyye tekhnologii dlya APK yuga Rossii* [Innovative technologies for the agro-industrial

complex of the south of Russia]: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 55-letiyu obrazovaniya Adygeyskogo NIISKH (s mezhdunarodnym uchastiyem). 21–23 sentyabrya 2016 goda. Maykop: Magarin O.G., 2016. Pp. 112–115. (In Russian)

6. Blagopoluchnaya O.A., Mamsirov N.I., Daguzhieva Z.Sh. Methods of integrated use of new generation biopreparations on spring grain crops with resource-saving methods of processing drained chernozems of the Republic of Adygea. *Voprosy sovremennoy nauki: kollektivnaya nauchnaya monografiya* [Issues of modern science: collective scientific monograph]. Moscow: Internauka, 2017. Vol. 20(12). Pp. 37–56. (In Russian)

7. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Field experiment methodology]. Moscow: Kolos, 1979. 416 p. (In Russian)

8. Sheudzhen A.Kh. *Pitaniye i udobreniye zernovykh kul'tur. Yachmen'* [Nutrition and fertilization of grain crops. Barley]. Maykop: Ayaks, 2010. 20 p. (In Russian)

9. Kirdey T.A. Humic preparations in agricultural technologies. *Zemledeliye* [Agriculture]. 2013. No. 5. Pp. 12–14. EDN: RENOOH. (In Russian)

10. Tserling V.V. *Agrokhimicheskiye osnovy mineral'nogo pitaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Agrochemical foundations of mineral nutrition of agricultural crops]. Moscow: Nauka, 1978. 214 p. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Девтерова Наталья Ильинична, ст. науч. сотр., отдел земледелия, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Майкопский государственный технологический университет»;
385064, Россия, г. Майкоп, п. Подгорный, ул. Ленина, 48;
devterova55@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5859-2630, SPIN-код: 6786-5636

Information about the author

Natalia I. Devterova, Senior Researcher, Department of Agriculture, Research Institute of Agriculture, Maikop State Technological University;
385064, Russia, Maikop, Podgorny, 48 Lenin street;
devterova55@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5859-2630, SPIN-code: 6786-5636

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЭКОНОМИКЕ

УДК 332.02 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-280-290
EDN: TURVHE

Моделирование стратегического поведения производителей на локальном рынке сельскохозяйственной продукции с ограниченным спросом

А. О. Гуртуев✉, О. Л. Бозиев

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

Аннотация. Рассматривается проблема моделирования локальных рынков с ограниченной емкостью, для которых существование устойчивого равновесия зависит от институциональной структуры рынка и стратегических решений производителей. Подобные рынки можно наблюдать в аграрных регионах многих стран, в том числе России (в частности, они встречаются в республиках Северного Кавказа). Основными факторами неэффективности в таких системах являются высокие транзакционные издержки выхода на общерегиональный рынок, бюджетные ограничения и несовершенная информация. Это приводит к тому, что из-за отсутствия эффективных механизмов согласования планов производства возникает сезонное перепроизводство отдельных культур. В связи с этим возникает проблема разработки эффективного и устойчивого механизма согласования стратегических решений между независимыми производителями в условиях неопределенности и несовершенной информации. В работе описаны особенности подобных рыночных систем, выделены их специфические отличия от рынков с совершенной конкуренцией, предложена постановка задачи математического моделирования, позволяющая формально описать взаимодействие экономических субъектов на таком рынке.

Ключевые слова*:* локальный рынок, ограниченный спрос, кооперативные игры, рыночное равновесие, сельскохозяйственное производство, стратегическое взаимодействие, неопределенность

Поступила 18.09.2024, одобрена после рецензирования 07.10.2024, принята к публикации 04.11.2024

Для цитирования. Гуртуев А. О., Бозиев О. Л. Моделирование стратегического поведения производителей на локальном рынке сельскохозяйственной продукции с ограниченным спросом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 280–290. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-280-290

JEL:Q13, C71 Original article

Modeling the strategic behavior of producers in a local agricultural market with bounded demand

A.O. Gurtuev✉, O.L. Boziev

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Abstract. We consider the problem of modeling local markets with limited demand, for which the existence and characteristics of a stable market equilibrium depends on the institutional structure of the market and strategic decisions of producers. Such type of markets can be observed in agricultural regions

© Гуртуев А. О., Бозиев О. Л., 2024

of many countries, including Russia (in particular, they are common in the republics of the North Caucasus). The main factors of inefficiency in such systems are restrictively high transaction costs of moving into the regional market, budget constraints and imperfect information. This leads to the fact that due to the lack of effective market mechanisms for coordinating production plans, seasonal overproduction of individual crops occurs. In this regard, the problem of developing an effective and sustainable mechanism for coordinating strategic decisions between independent producers under conditions of uncertainty and imperfect information arises. The paper describes the features of such market systems, highlights their specific differences from markets with perfect competition, and proposes a formulation of the problem of mathematical modeling that allows formally describing the interaction of economic entities in such a market.

Keywords: local market, limited demand, cooperative games, market equilibrium, agricultural production, strategic interaction, uncertainty

Submitted 18.09.2024, approved after reviewing 07.10.2024, accepted for publication 04.11.2024

For citation. Gurtuev A.O., Boziev O.L. Modeling the strategic behavior of producers in a local agricultural market with bounded demand. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 280–290. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-280-290

1. Введение

Специфика локальных рынков сельскохозяйственной продукции и моделей этих рынков состоит в том, что для таких рынков не выполняются некоторые предпосылки модели рынка совершенной конкуренции. В частности, для таких рынков транзакционные издержки могут быть велики, бюджетные ограничения могут лимитировать возможности изменения производственной функции, информация может быть неполной, как спрос, так и предложение могут быть ограничены неэкономическими факторами. Очевидно, что в таких условиях для достижения эффективного равновесия на рынке требуются некоторые специальные механизмы, дизайн которых зависит от типа локального рынка. Разработка таких механизмов имеет решающее значение для обеспечения эффективного распределения ресурсов и максимизации экономического роста в локальных сообществах. Предыдущие исследования выявили некоторые ключевые проблемы на локальных рынках сельскохозяйственной продукции, однако проблема ограниченности спроса на таких рынках, когда потенциальный объем сезонного предложения для отдельных культур превышает емкость локального рынка, а транзакционные издержки выхода на внешний рынок относительно велики для отдельных производителей, недостаточно разработана. Для такого рынка на практике из-за отсутствия эффективных механизмов согласования планов производства характерно сезонное перепроизводство отдельных культур. Наше исследование направлено на заполнение этого пробела и разработку модели экономического механизма, позволяющего реализовать эффективное согласование действий между производителями для локального рынка сельскохозяйственной продукции с ограниченной величиной спроса. В качестве объекта мы рассматриваем рынок сельскохозяйственной продукции, возникающий при транспортной магистрали, соединяющей относительно отдаленные экономические центры. Такие рынки характерны для многих локальных экономических систем в развитых и развивающихся странах, в том числе для ряда районов Северного Кавказа.

2. Обзор литературы

В современной литературе исследование экономического развития локальных сельскохозяйственных систем в основном представлено работами, посвященными механизмам управления ресурсами общего пользования (tragedy of commons), пространственной кон-

центрации и диффузии [1], а также влияния бюджетных ограничений. Проблема чрезмерной эксплуатации является центральной для управления ресурсами общего пользования, которые имеют решающее значение для местной сельскохозяйственной экономики [2]. Исследования показали, что местные сообщества могут эффективно управлять ресурсами общего пользования с помощью институциональных правил, при этом институты самоуправления превосходят по аллокативной эффективности механизмы открытого доступа [3]. Дизайн подобных институтов зависит от характеристик ресурсов и субъектов системы, которые поддерживают возникновение механизмов сотрудничества [4]. Более того, практики адаптивного управления некоторыми сложными системами (например, пастбищными экосистемами) показывают, что открытый доступ не обязательно ведет к истощению ресурсов [5]. Пространственные аспекты управления ресурсами также имеют важное значение. Политические манипуляции структурой прав собственности могут привести к субоптимальному повышению нагрузки на городские ресурсы общего пользования, когда общественные открытые пространства деградируют из-за чрезмерной эксплуатации [6]. Более того, равновесное количество пользователей ресурсов в режимах открытого доступа определяется издержками входа и производства, что имеет последствия для пространственной концентрации и диффузии использования ресурсов [7]. Бюджетные ограничения являются еще одним важным фактором развития местного сельского хозяйства – структура затрат на управление ресурсами общего пользования имеет решающее значение для определения устойчивости использования ресурсов и экономической жизнеспособности местных сообществ [7]. Участие больших групп с фрагментированными правами доступа может подорвать эффективные режимы управления водными ресурсами, как это видно на примере озера Сардис, что указывает на важность бюджетных факторов в управлении ресурсами [8]. Таким образом, литература предполагает, что эффективные модели местного сельскохозяйственного экономического развития должны учитывать управление ресурсами общего пользования, пространственную динамику использования ресурсов и бюджетные ограничения. Успешное управление часто предполагает наличие институтов саморегулирования, которые могут предотвратить трагедию общего пользования [3, 4], в то время как пространственные и бюджетные факторы имеют важное значение для устойчивого управления ресурсами и экономического развития [6-8]. Учет этих факторов имеет решающее значение для разработки механизмов организации локальных сельскохозяйственных рынков и устойчивого социально-экономического развития на местном уровне.

Проблема разработки рыночных механизмов для рынков с ограниченным спросом многогранна и включает в себя оптимизацию стратегий, позволяющих справиться с ограниченным размером рынка, механизмы обмена информацией, кооперацию между конкурирующими участниками рынка. В контексте рынков электроэнергии исследования показывают, что перегруженность может эффективно наделить участника торгов рыночной властью, изменяя динамику рыночных цен и вызывая необходимость изменения стратегии торгов [9]. Аналогичным образом для предприятий, работающих по всему миру, при разработке надежных операционных стратегий для оптимизации прибыльности необходимо учитывать время сезонов продаж и рыночные риски [10]. Проблемы малого размера рынка проявляются при исследовании эффективности различных маркетинговых стратегий стимулирования спроса на местную продукцию. Например, показано, что хотя молоко местных брендов может выиграть от стратегического снижения цен и расширения присутствия в розничной торговле, этим усилиям часто препятствуют высокие цены и ограниченное пространство на полках в крупных розничных магазинах [11]. Кроме того, препятствия, свя-

занные со спросом для малых и средних предприятий, оказывают устойчивое долгосрочное воздействие на количество предприятий в локальной системе, причем некоторые проблемы неожиданно коррелируют с увеличением количества предприятий [12]. Таким образом, разработка рыночных механизмов на локальных рынках с ограниченным спросом требует тонкого понимания взаимодействия между рыночной властью, стратегическим оперативным планированием и эффективностью маркетинга. Решение этих проблем предполагает учет влияния перегруженности на стратегии торгов на олигополистических рынках [9], использование динамики внешнего рынка [10] и реализацию целевых маркетинговых стратегий для повышения спроса на местную продукцию [11]. Кроме того, понимание воздействия препятствий, связанных со спросом, на динамику количества малых и средних предприятий может стать основой политики и мер поддержки, способствующих росту рынка [12].

Что касается моделирования локальных сельскохозяйственных систем с ограниченным спросом, то следует отметить, что работы, специально посвященные таким моделям, в ведущих изданиях не опубликованы, и наше исследование призвано заполнить эту лакуну. Однако подобные системы получили освещение в более широком контексте динамики сельскохозяйственного рынка и агропромышленной политики. Например, Прудников [13] обсуждает институциональную поддержку местных сельскохозяйственных рынков, подчеркивая важность государственного вмешательства в механизмы управления и развития этих рынков. Это предполагает, что меры регулирования могут помочь удовлетворить спрос потребителей и улучшить стандарты продукта, что может быть актуально в сценариях, когда спрос ограничен [13]. Кроме того, в ряде работ обсуждается влияние внешних факторов на спрос и предложение на сельскохозяйственных рынках, таких как экономические соглашения и климатические условия, которые могут способствовать сценариям ограниченного спроса [14, 15]. Интересные результаты получены при рассмотрении более широких последствий либерализации рынка и изменения климата. В некоторых работах предполагается, что либерализация и торговые реформы, такие как создание Африканской континентальной зоны свободной торговли, могут улучшить доступ к рынкам и сформировать общую структуру цен, потенциально влияя на местные рынки [16, 17]. Кроме того, в ряде работ указывается, что изменение климата окажет существенное влияние на сельскохозяйственные рынки, а стратегии адаптации потенциально смягчат воздействие на спрос и предложение [18, 19]. Таким образом, хотя в современной литературе не моделируются напрямую локальные сельскохозяйственные рынки с ограниченным спросом, она дает представление о факторах, влияющих на динамику рынка, и потенциальных последствиях некоторых механизмов управления. Меры регулирования и стратегии адаптации рассматриваются как средства решения проблем на локальных рынках, которые могут быть применимы в ситуациях ограниченного спроса [20].

3. Описание локального рынка сельскохозяйственного производства

Рассмотрим систему, состоящую из небольших фермерских хозяйств, в пользовании которых находятся участки сельскохозяйственных земель, расположенные недалеко от автотранспортной магистрали, соединяющей региональные розничные рынки сельскохозяйственной продукции. На рисунке 1 показан пример географического расположения такого рынка, характерного для республик Северного Кавказа. Для фермерских хозяйств, выращивающих однолетние культуры, в такой системе существуют как минимум два различных рынка: локальный и региональный.

Рис. 1. *Пример потенциального локального рынка с ограниченным спросом – системы сельскохозяйственных производителей (на карте видно распределение земельных участков) и автомагистрали*

Fig. 1. *Example of a potential local market with limited demand - systems of agricultural producers (the map shows the distribution of land plots) and highways*

Локальный рынок возникает около автомагистрали, транзакционные издержки выхода на него можно считать нулевыми, покупателями являются мелкооптовые торговцы и розничные покупатели, следующие по автомагистрали. Возможности привлечения постоянных покупателей и влияния на величину спроса у отдельного фермерского хозяйства минимальны. Для оптовых торговцев объем производства отдельного фермера слишком мал. Для розничных покупателей транзакционные издержки слишком велики для того, чтобы специально приезжать на этот рынок, покупки в основном совершаются как побочное действие, по пути между населенными пунктами. Таким образом, рыночная сила фермеров может считаться нулевой.

Региональный рынок географически находится в одном из населенных пунктов, через которые проходит автомагистраль, имеет большую емкость, которую для нашего случая можно считать неограниченной, но транзакционные издержки выхода на него для отдельного фермера велики – в большинстве случаев не только из-за транспортных расходов, но и из-за дополнительных институциональных издержек.

Сельхозтоваропроизводители, являющиеся участниками данной системы, могут выращивать разные культуры, но нас интересует состояние, когда большинство фермеров занимается выращиванием однолетних культур, т. е. способно менять производство год от года. Для такой системы в случае специализации на некоторой культуре может возникать (и на практике это подтверждается) ситуация избыточного производства, когда в сезон значительное количество урожая не может быть продано ни по каким ценам и просто уничтожа-

ется. Подобная ситуация из года в год наблюдается, например, с локальными рынками огурцов и помидоров в ряде районов Кабардино-Балкарской Республики. При отсутствии выраженной специализации и относительно равномерном распределении производства между культурами такой ситуации не возникает.

Таким образом, возникает задача согласования планов производства между независимыми конкурирующими производителями, имеющими доступ к различным производственным технологиям, в условиях потенциально ограниченного спроса.

4. Математическая модель рынка с ограниченным спросом

Пусть каждый из m сельхозтоваропроизводителей (фермеров) имеет возможность выращивать любую из n сельхозкультур. Введем обозначения:

l_{ij} – количество земли, занятой у i-го фермера под j-ю сельхозкультуру (га);

L_{ij} – количество используемого наемного труда на производство j-й сельхозкультуры (чел.-дни/га);

w_j – заработная плата при производстве j-й сельхозкультуры (руб./чел.-дни);

K_{ij} – стоимость материальных затрат за год (руб./га) на производство j-й сельхозкультуры;

r –процентная ставка;

p_j – цена за кг продукции j-й сельхозкультуры (руб.);

q_{ij} – объем продаж на рынке j-й сельхозкультуры (кг);

a_{ij} – урожайность j-й сельхозкультуры (кг/га),

Q_j – ёмкость рынка j-й сельхозкультуры.

Очевидно, что все перечисленные величины могут принимать только положительные значения. Здесь и ниже $i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n}$.

Для каждой сельхозкультуры из n предполагается известной производственная функция вида

$$PF_{ij} = \frac{rK_{ij}+w_jL_{ij}}{a_{ij}}, \tag{1}$$

отражающая зависимость между объемом выпуска продукции и величиной затрат на производство этого объема. Например, для выращивания томатов в открытом грунте rK_{ij} – это необходимые материальные затраты на семена, обработку почвы, вспашку, химикаты, топливо, тару и т. д., w_jL_{ij} – заработная плата сезонных работников, привлекаемых для посадки и сбора урожая:

$$P_{ij} = max\{\, p_jq_{ij} - a_{i\,j}PF_{ij}l_{ij}\}$$

или

$$P_{ij} = max\{\, p_jq_{ij} - (rK_{ij} + w_jL_{ij})l_{ij}\}. \tag{2}$$

Следует заметить, что P_{ij} зависит не только от выбора i-го фермера конкретной сельхозкультуры j, но и от выбора данной сельхозкультуры остальными фермерами, т.е. от $\sum_{k=1,k\neq i}^{n} q_{kj}$. При этом, если затраты в выражении (2) с достаточной точностью известны фермеру, а прогнозы цены p_j можно считать общей информацией (т.е. известной всем участникам), то $\sum_{k=1,k\neq i}^{n} q_{kj}$ в момент принятия решения представляет собой ожидание фермера i относительно действий остальных участников рынка.

Очевидно, что объем продаж на рынке производимой сельхозкультуры не может превышать полученного урожая, откуда следует неравенство

$$q_{ij} \le a_{ij}l_{ij}. \tag{3}$$

Условие положительности ожидаемой прибыли приводит к неравенству

$$p_j q_{ij} > (rK_{ij} + w_j L_{ij}) l_{ij}. \quad (4)$$

Неравенства (3) и (4) можно объединить в одно двойное неравенство

$$\frac{rK_{ij} + w_j L_{ij}}{p_j} < \frac{q_{ij}}{l_{ij}} \le a_{ij},$$

характеризующее удельный объем продаж с единицы площади обрабатываемой земли.

Рассмотрим простейшую математическую модель рынка с ограниченным спросом. Ее можно представить матрицей

$$B = (b_{ij})$$

с элементами

$$b_{ij} = p_j q_{ij} - (rK_{ij} + w_j L_{ij}) l_{ij}, \quad (5)$$

удовлетворяющей условиям (3), (4).

Решение соответствующей задачи состоит в выборе в каждой строке матрицы B, соответствующей конкретному фермеру, максимального элемента, соответствующего наибольшей прибыли. Будем говорить, что фермер i выбирает оптимальную стратегию j. Другими словами, решение задачи сводится к выбору i-м фермером производственной функции (1), соответствующей j-й сельхозкультуре, дающей наибольшую прибыль в размере, определяемом соотношением (2). Подобный подход интуитивно используется на практике производителями сельхозпродукции на локальном рынке и приводит к избыточному производству некоторого вида однолетних культур и, возможно, недостаточному производству других видов со всеми вытекающими последствиями. Избыточность производства j-й сельхозкультуры выражается неравенством

$$\sum_{i=1}^{m} a_{ij} l_{ij} > Q_j. \quad (6)$$

Для учета взаимовлияния и возможного взаимодействия участников локального рынка далее будем рассматривать ситуацию как игру m лиц с произвольной суммой.

При любом $m \ge 2$ игры с произвольной суммой имеют две альтернативы, связанные с возможностью или запретом образования коалиций. В нашем случае каждый из m игроков (т. е. фермеров) имеет n стратегий, соответствующих n сельхозкультурам.

В бескоалиционном (некооперативном) случае каждый фермер действует самостоятельно, без обмена информацией с другими фермерами.

В простейшем случае $m = 2$ подобные игры называются биматричными и задаются либо двумя матрицами, указывающими выигрыши каждого игрока, либо одной блочной матрицей, представляющей выигрыши сторон при применении ими выбранных стратегий. Если на локальном рынке имеется всего два сельхозпроизводителя B_1 и B_2, то блочная матрица такой игры будет иметь вид

$$(B_1,\ B_2) = \begin{pmatrix} (b_{11}, b_{21}) & (b_{11}, b_{22}) & \dots & (b_{11}, b_{2n}) \\ (b_{12}, b_{21}) & (b_{12}, b_{22}) & \dots & (b_{12}, b_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (b_{1n}, b_{21}) & (b_{1n}, b_{22}) & \dots & (b_{1n}, b_{2n}) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где b_{ij} определяются по формуле (5). Например, блок (b_{14}, b_{23}) соответствует случаю, когда первый фермер производит четвертую сельхозкультуру, а второй – третью. Таким образом, при $m = 2$ математической моделью задачи является матрица (7).

Отметим, что задача производителя в такой постановке в корне отличается от задачи производителя в классической модели конкурентного рынка с потенциально неограниченной сверху величиной спроса. Поведение производителя в таких моделях полностью задается структурой рынка, в зависимости от наличия и силы рыночной власти выпуск определяется предельными (при совершенной конкуренции) либо средними (при монополии) издержками. В нашем случае ограничение величины спроса сверху приводит к необходимости принятия решения в условиях неопределенности и к поиску дополнительных механизмов согласования решений различных производителей.

Так, например, в классических задачах олигополии Курно и Бертрана, где производитель выбирает соответственно объем производства либо цену, он действует исходя из предположения о рациональности конкурентов и зная их производственные функции. Равновесие по Нэшу в модели Курно легко находится (если существует, т.е. если предельные издержки фирм меньше равновесной цены) как объем производства, соответствующий $\frac{\partial P_{ij}}{\partial q_{ij}} = 0$. В модели Бертрана похожая логика выбора наилучшего ответа также приводит к равновесию при цене, равной предельным издержкам (оговоримся, что в модели Бертрана возможно также неустойчивое равновесие при цене, равной средним издержкам). Наша задача принципиально отличается от данных моделей тем, что рассматривает специальный случай и включает в себя в явном виде ограничение величины спроса.

Аналогично (7) модель игры m лиц с произвольной суммой будет состоят из m матриц или одной m-мерной блочной матрицы. При любых $m \geq 2$ элементы матрицы выигрышей рассчитываются по формуле (2), кроме этого, должны выполняться условия (3), (4), (6). Как и в биматричных играх, здесь рассматриваются смешанные стратегии игроков, а решение задачи сводится к поиску ситуации равновесия [21]. Важнейшим принципом оптимального поведения в бескоалиционных играх является понятие равновесия по Нэшу.

В коалиционном (кооперативном) случае игроки объединяются в коалицию для достижения общей цели. Коалиция позволяет им:

– обмениваться информацией о ходе игры;
– совместно выбирать стратегии и координировать действия;
– объединять ресурсы.

Для рассматриваемой задачи это означает, что фермеры договариваются в первую очередь о производимых сельхозкультурах и объемах их производства. Кооперация может подразумевать также совместную обработку земли и некоторые другие действия. Важным условием кооперирования является равновесное (устойчивое) состояние членов коалиции.

5. Выводы

Рассмотрен локальный рынок сельскохозяйственного производства с ограниченной сверху величиной спроса, где производители не имеют рыночной силы и могут выбирать вид производимой сельхозпродукции (производственную функцию). При этом цена продукта задается равновесной ценой регионального рынка. При такой структуре рынка для достижения эффективного рыночного равновесия, максимизирующего совокупный общественный выигрыш, необходим некоторый механизм кооперации производителей. Для

этого разработана математическая модель взаимодействия субъектов рынка, представляющая собой игру многих сторон с произвольной суммой.

В случае многоходовой игры возникают стимулы к кооперации между участниками. На результат кооперативной игры существенное влияние могут оказывать побочные платежи, которыми игроки могут обмениваться в процессе игры. Это может быть плата за участие в коалиции, штраф за выход из коалиции или уклонение от сотрудничества. Побочные платежи становятся частью используемых игроками стратегий, так как они изменяют значения выигрышей игроков. В реальности побочными платежами могут являться, например, членские взносы за участие в коалиции или штрафные платежи за отказ выполнять договоренности о распределении выращиваемых сельхозкультур. Модель может быть полезна для разработки механизмов организации локальных рынков с ограниченной величиной спроса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Asher S., Novosad P. Rural roads and local economic development. *American Economic Review*. 2020. Vol. 110. No. 3. Pp. 797–823. DOI: 10.1257/aer.20180268

2. Остром Э. Управляя общим. Эволюция институтов коллективной деятельности. М.: Мысль, ИРИСЭН, 2011. 447 с.

Ostrom E. Upravlyaya obshchim. Evolyutsiya institutov kollektivnoy deyatel'nosti [Managing the Common. Evolution of Institutions of Collective Activity]. Moscow: Mysl, IRISEN, 2011. 447 p. (In Russian)

3. Mohammadi M., Gharakhani S. Simulating institutional change for governing natural common-pool resources: an agent-based model approach. 2024. *Preprint (Version 1).* DOI: 10.21203/rs.3.rs-4418999/v1

4. Schlager E. Rationality, cooperation, and common pool resources. *American Behavioral Scientist*. 2002. Vol. 45. No. 5. Pp. 801–819. DOI: 10.1177/0002764202045005005

5. Moritz M., Scholte P., Hamilton I.M., Kari S. Open access, open systems: pastoral management of common-pool resources in the chad basin. *Hum Ecol.* 2013. Vol. 41. Pp. 351–365. DOI: 10.1007/s10745-012-9550-z

6. Ling G., Ho C.S., Ali H.M. Institutional property rights structure, common pool resource (CPR), tragedy of the urban commons: *A Review*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2014. Vol. 18. No. 1. P. 012184. DOI: 10.1088/1755-1315/18/1/012184

7. Mamada R., Lampert A., Perrings Ch. Potential games and the tragedy of the commons. *Strategic Behavior and the Environment*. 2017. Vol. 6. No. 4. Pp. 311–338. DOI: 10.1561/ 102.00000079

8. Wohlers T., Mason A., Wood J., Schmaltz E. Tragedy of the commons meets the anti-commons: water management and conflict on the southern plains of the United States. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*. 2014. Vol. 16. No. 1. DOI: 10.1142/ S1464333214500057

9. Peng T., Tomsovic K. Congestion influence on bidding strategies in an electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003. Vol. 18. No. 3. Pp. 1054–1061. DOI: 10.1109/ TPWRS.2003.810893

10. Yan X. Robust newsvendor problem in global market: stable operation strategy for a two-market stochastic system. *arXiv preprint*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2207.03801

11. Liu Y., Chen X., Rabinowitz A., Campbell B. Demand, challenges, and marketing strategies in the retail promotion of local brand milk. *Agricultural Economics*. 2020. Vol. 51. Pp. 655–668. DOI: 10.1111/agec.12584

12. Bădulescu D., Al-Smadi H.M., Bădulescu A-V. To what extent do demand-related difficulties influence the density of SMEs. A panel data study on Romanian development regions. Proceedings of the 16th International Management Conference "Management and resilience strategies for a post-pandemic future" 3rd–4th November 2022, Bucharest, Romania. DOI: 10.24818/IMC/2022/03.10

13. Prudnikov Yu. Functioning of the system of local agricultural markets: institutional aspects. *Baltic Journal of Economic Studies.* 2016. Vol. 2. No. 5. DOI: 10.30525/2256-0742/ 2016-2-5-55-61

14. Chavas J.P., Nauges C. Uncertainty, learning, and technology adoption in agriculture. *Applied Economic Perspectives and Policy*. 2020. Vol. 42. No. 1. Pp. 42–53. DOI: 10.1002/ aepp.13003

15. Szczepańska-Przekota A. Are small agricultural markets recipients of world prices? *The Case of Poland. Agriculture*. 2023. Vol. 13. P. 1214. DOI: 10.3390/agriculture13061214

16. Janssens C., Havlík P., Boere E. et al. A sustainable future for Africa through continental free trade and agricultural development. *Nat Food.* 2022. Vol. 3. Pp. 608–618. DOI: 10.1038/ s43016-022-00572-1

17. Olipra J. Price transmission in (de)regulated agricultural markets. *Agrekon*. 2020. Vol. 59. No. 4. Pp. 412–425. DOI: 10.1080/03031853.2020.1831936

18. Martinez P., Blanco M., Van Doorslaer B. et al. What role will climate change play in EU agricultural markets? An integrated assessment taking into account carbon fertilization effects. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2017. Vol. 15. No. 3. P. e0115. DOI: 10.5424/ sjar/2017153-9899

19. Martinez P., Blanco M., Van Doorslaer B. et al. What role does climate change play in agricultural market uncertainty? An integrated assessment taking into account market-driven adjustments. *International Association of Agricultural Economists*. Conference, August 9–14. 2015. Milan, Italy. DOI: 10.22004/ag.econ.212230

20. McCorriston S. Competition, agricultural trade reform and developing countries. *The Journal of Applied Economic Research*. 2011. 5(1): 31–46. DOI: 10.1177/097380101000500103

21. *Есипов Б. А.* Методы исследования операций. СПб.: Лань, 2021. 304 с.

Esipov B.A. *Metody issledovaniya operatsiy* [Methods of operations research]. St. Petersburg: Lan, 2021. 304 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 conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Гуртуев Алим Оюсович, канд. экон. наук, вед. науч. сотр., зав. отделом экономики инновационных процессов, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

alemao@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2067-8129, SPIN-код: 1667-6220

Бозиев Олег Людинович, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., отдел автоматизации и информатизации региональных систем управления, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

boziev@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1228-7892, SPIN-код: 1437-4985

Information about the authors

Alim O. Gurtuev, Candidate of Economic Sciences, Leading Researcher, Head of the Department of Economics of Innovation Processes, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

alemao@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2067-8129, SPIN-code: 1667-6220

Oleg L. Boziev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Department of Automation and Informatization of Regional Management Systems, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

boziev@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1228-7892, SPIN-code: 1437-4985

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 338.26:332.12 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-291-301
EDN: WJAUBI

Влияние внедрения инновационных технологий в сфере роботизации и автоматизации агропромышленного комплекса и его социально-эколого-экономические последствия

О. З. Загазежева✉, К. Ф. Край, М. И. Хаджиева

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В статье исследуется внедрение роботизированных и автоматизированных технологий в сельском хозяйстве, которое в ближайшем будущем приведет к увеличению производительности и логистической эффективности, снижению затрат и ускорению поставок. Представлена структура модели эффективного управления сельскими территориями в условиях роботизации, также сделаны расчеты эффективности управления сельскими территориями в контексте интенсивного внедрения роботизированных технологий в сельском хозяйстве. В исследовании рассматривается влияние процессов внедрения инновационных технологий в агропромышленный комплекс и их социально-эколого-экономические последствия с применением анализа и синтеза, системного и диалектического подходов. При выполнении исследования применялись методы статистического и системного анализа, моделирования некоторых социально-экономических процессов, а также экономические эксперименты. Результаты исследования могут способствовать оптимизации и развитию производственных процессов в аграрном секторе при внедрении новых роботизированных технологий в реальный сектор экономики с учетом социальных и экономических факторов.

Ключевые слова: сельские территории, оптимизация производственных процессов, роботизированные технологии, автоматизация, инновационные подходы, управление рисками, сбор данных, прогнозирование, устойчивое развитие

Поступила 03.10.2024, одобрена после рецензирования 04.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Загазежева О. З., Край К. Ф., Хаджиева М. И. Влияние внедрения инновационных технологий в сфере роботизации и автоматизации агропромышленного комплекса и его социально-эколого-экономические последствия // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 291–301. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-291-301

JEL: R11 Original article

The impact of the introduction of innovative technologies in the field of robotics and automation in the agro-industrial complex and its socio-environmental and economic consequences

O.Z. Zagazezheva✉, K.F. Krai, M.I. Khadzhieva

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article examines the introduction of robotic and automated technologies in agriculture, which in the near future will lead to increased productivity and logistics efficiency, reduced costs and faster deliveries. The article presents the structure of a model for effective management of

© Загазежева О. З., Край К. Ф., Хаджиева М. И., 2024

rural areas in the context of robotization, and also makes calculations of the efficiency of rural management in the context of intensive introduction of robotic technologies in agriculture. The study examines the impact of the processes of introducing innovative technologies in the agro-industrial complex and their socio-ecological and economic consequences using analysis and synthesis, systems and dialectical approaches. When performing the study, methods of statistical and systems analysis, modeling of some socio-economic processes, as well as economic experiments were used. The results of the study can contribute to the optimization and development of production processes in the agricultural sector when introducing new robotic technologies into the real sector of the economy, taking into account social and economic factors.

Keywords: rural areas, optimization of production processes, robotic technologies, automation, innovative approaches, risk management, data collection, forecasting, sustainable development

Submitted 03.10.2024, approved after reviewing 04.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Zagazezheva O.Z., Krai K.F., Khadzhieva M.I. The impact of the introduction of innovative technologies in the field of robotics and automation in the agro-industrial complex and its socio-environmental and economic consequences. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 291–301. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-291-301

Введение

Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО) представляет собой регион с уникальными климатическими зонами от степей до альпийских лугов и густых лесов. На территории СКФО имеется множество водных источников – горных рек и грунтовых вод. Вместе с тем данный регион отличается наличием плодородных черноземов и каштановых почв. Горные склоны региона предназначены как для животноводства, так и для растениеводства.

Агропромышленный комплекс (АПК) играет ключевую роль не только в обеспечении продовольственной безопасности, но и социально-экономическом развитии региона. Как и все регионы, СКФО испытывает значительные экологические и социальные проблемы[1], связанные с изменением климата [1].

В целях обеспечения устойчивого развития сельскохозяйственной деятельности региона необходимо разрабатывать и внедрять модели, учитывающие местные особенности. Подобные модели позволяют применять экологически сбалансированные методы ведения сельского хозяйства, минимизирующие негативное воздействие на экосистему. В последнее время агропромышленный комплекс сталкивается со значительными изменениями под влиянием внедрения современных технологий путем роботизации и автоматизации. Данный аспект является одним из значимых ориентиров для повышения качества и продуктивности сельскохозяйственного производства. Вместе с тем процесс роботизации и автоматизации сельского хозяйства приводит не только к положительным эффектам, но и к новым вызовам, связанным с процессами управления развитием сельских территорий [2].

Целью данного исследования является определение степени влияния внедрения роботизированных и автоматизированных технологий на социальные, экономические и экологические факторы.

Роботизация в сельском хозяйстве: социальные, экологические и экономические последствия

Данное исследование основано на системном улучшении сельских территорий, которое обусловлено повышением производительности и обеспечением устойчивости развития [3,

[1]Технологическое развитие отраслей экономики // Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/11189.

4]. Под устойчивым развитием сельских территорий мы рассматриваем процесс интенсивного ведения хозяйственной деятельности, направленной на улучшение благосостояние местного населения путем внедрения новых технологий, сохраняя биоразнообразие экосистемы. Успешная интеграция роботизированных технологий для увеличения объема продукции и сокращения затрат на производство требует проведения детального изучения текущих процессов, выявления проблем и потенциальных точек роста. Также необходимо разработать план автоматизации, в который входят краткосрочные и долгосрочные цели организации. Это включает в себя выбор подходящего оборудования и программного обеспечения, определение приоритетов внедрения, а также подготовку персонала к работе с новыми системами. Данная система предполагает применение роботизированных и автоматизированных технологий и учитывает потребности и специфику предприятия [5, 6]. При этом следует обратить особое внимание на социальные и экономические последствия.

В первую очередь это необходимо для обеспечения оптимального уровня занятости среди местного населения. К подобным мерам можно отнести:

1. Разработку стратегии переквалификации и переподготовки работников, что поможет сотрудникам успешно адаптироваться к изменениям на рынке труда и предотвратит массовую безработицу. Например, одна из ведущих компаний Mindtree в г. Бхубанешвар (Индия) является лидером по переподготовке специалистов. В ее штате работает более 16 500 сотрудников по всему миру. Компания Mindtree вкладывает в развитие своих сотрудников, предоставляя им обучение по полному циклу разработки ПО, а также знания в области бизнес-аналитики и решения сложных задач[2].
2. Определение при выборе новой профессии навыков, которые сложно автоматизировать (например, умения, связанные с креативностью, анализом данных, межличностным общением и принятием решений).
3. Информационное обеспечение о новых профессиях, которые возникнут в ходе внедрения новых технологий в ближайшие 5-10 лет.

Для успешного развития АПК на примере Китая, Ирландии, Италии мы наблюдаем, насколько внедрение инноваций влияет на рост экономики страны[3,4,5].

Развитие сельскохозяйственной отрасли в нашем регионе основано на инновационном подходе, который предполагает создание специализированных технологий с высокой эффективностью. Но для этого необходимы значительные инвестиции.

Для решения некоторых экономических проблем и практических задач в управлении производственно-экономической деятельностью следует применять экономическое моделирование. Данный метод эффективен для исследования ряда ключевых вопросов, таких как методология и методика нормативного планирования, а также планирования качественных показателей. Это связано с необходимостью определения нормативов отдачи ресурсов, затрат и производственных факторов, что крайне важно для задач планирования и управления. Критерий для развития экономического объекта определяется поставленной перед ним целью. В глобальном контексте целью может быть, например, достижение полного благополучия и свободного развития всех членов общества [7].

---

[2]Эра роботизации повлечет за собой массовое переобучение персонала https://www.itweek.ru/management/article/detail.php?ID=198958

[3]Как Китай стал лидером в инновациях и почему это важно для всего мира https://future-hub.io/media/tpost/1j9smal1k1-kak-kitai-stal-liderom-v-innovatsiyah-i?ysclid=m49wp82ycf614625183

[4]file:///C:/Users/79963/Downloads/vliyanie-tsifrovizatsii-mirovoy-ekonomiki-na-ekonomicheskiy-rost-v-stranah-mira-na-primere-knr-i-ssha.pdf Влияние цифровизации мировой экономики на экономический рост в странах мира (на примере КНР и США)

[5]Производственная революция: китайский опыт и глобальное влияние https://anno-danini.com/articles/proizvodstvennaya-revolyucziya-kitajskij-opyit-i-globalnoe-vliyanie

Вследствие сложности формализации этого критерия в конкретных задачах возникает необходимость использования отдельных частных критериев. Некоторые специалисты отвергают возможность существования интегрального показателя и предлагают использовать систему отдельных показателей, которые отражают наиболее важные взаимосвязи. Этот подход, по всей видимости, является наиболее продуктивным.

Некоторые аспекты оптимизации производственных процессов в сельском хозяйстве требуют проведения более углубленных исследований.

Экономический анализ, который направлен на изучение влияния роботизации и автоматизации на сельскохозяйственное производство и связанную с ним экономическую эффективность. Данные процессы приводят к повышению эффективности и производительности, при этом снижая издержки при разработке, логистике и реализации. В итоге сельхозпредприятия могут увеличить производство конкурентоспособной продукции как для внутреннего потребления, так и для внешнего. Кроме того, трансформация структуры занятости, обусловленная роботизацией, требует переоценки и перепрофилирования рабочей силы, что создает дополнительный спрос на специалистов в области высоких технологий и управления инновационными системами.

Например, в одной из республик СКФО были проведены исследования с использованием октокоптера DJI Agros, в ходе которых были выявлены значительные преимущества: экономия пестицидов до 10–15 %, повышение урожайности до 20 %, снижение экологической нагрузки, снижение расхода топлива до 70 %. Данный эффект был достигнут за счет управления режимами полета дронов и особенностей самой технологии опрыскивания [8].

Также внедрение роботизированных технологий на животноводческих фермах в ряде регионов РФ (в том числе в СКФО) приводит к значительному экономическому эффекту, а именно: повышению надоя молока на 15–20 %, увеличению продолжительности лактации при добровольном доении, своевременному получению данных о состоянии животных и уменьшению выбраковки. В результате чего происходит существенная экономия трудовых ресурсов.

Социальные изменения, которые неизбежны в ходе технологического прогресса. Процессы роботизации и автоматизации должны изменить демографическую ситуацию, провоцируя как отток, так и приток рабочей силы в сельские районы в зависимости от наличия и распределения новых рабочих мест. Из-за недостаточности информации и знаний о принципах работы и недооценки экономической эффективности новых технологий возникают некоторые опасения по поводу потери рабочих мест, нашествия или восстания роботов и другие [9, 10, 11].

В настоящее время развитие образовательной системы становится критически важным, так как возникает необходимость подготовки специалистов, имеющих навыки работы с передовыми технологиями. Но при этом трансформации условий труда могут повлиять на здоровье населения, что потребует улучшения системы здравоохранения и профилактических мер, адаптированных к новым условиям труда.

Экологическая устойчивость на территории сельской местности обусловлена внедрением сельскохозяйственных роботов в АПК с целью рационального использования природных ресурсов и минимизации экологической нагрузки. Существующие на сегодняшний день системы управления направлены на оптимизацию процессов производства и уменьшение количества вредных выбросов в экосистему. Также процесс адаптации текущих процессов к изменяющимся климатическим условиям способствует менее выраженному влиянию природных воздействий, что должно привести к экологической устойчивости в течение продолжительного периода времени.

РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЬСКИМИ ТЕРРИТОРИЯМИ В КОНТЕКСТЕ ИНТЕНСИВНОГО ВНЕДРЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Моделирование процессов внедрения и распространения роботизированных технологий направлено на повышение производительности труда и снижение операционных затрат. Роботизация сельскохозяйственной отрасли является одним из основных факторов процесса стабилизации и увеличения объема продукции, таким образом она позволяет сельхозпредприятиям отвечать на колебания спроса наиболее эффективно. Автоматизация же процессов АПК также помогает наладить логистику и управление ресурсами, обусловливая возможность устойчивого экономического роста и повышения инвестиционной привлекательности региона.

Авторами статьи разработана структура модели эффективного управления сельскими территориями в условиях активной роботизации сельскохозяйственного производства (рис. 1).

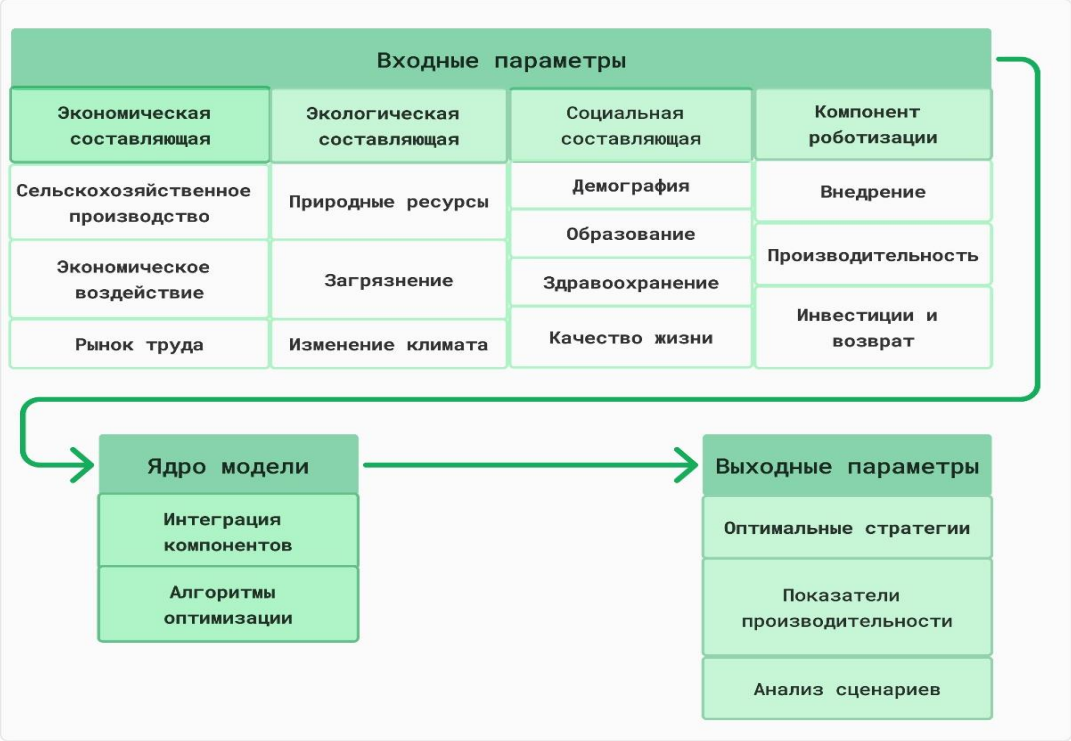


Рис. 1. *Структура модели эффективного управления сельскими территориями в условиях роботизации*

Fig. 1. *Structure of the model of effective management of rural areas in the context of robotization*

СКФО является одним из ключевых аграрных регионов страны с большим разнообразием климатических условий, что позволяет выращивать широкий спектр сельскохозяйственных культур. Основными продуктами растениеводства, производимыми в этом регионе, являются:

– зерновые культуры – пшеница, ячмень и кукуруза (пшеница как основная продовольственная культура является решающим фактором для обеспечения продовольственной безопасности региона);

– кормовые культуры – луговые травы, клевер и силосное кукурузное зерно, необходимые для кормления скота;

– овощи – картофель, морковь, свекла, капуста и другие распространенные овощные культуры;

– фрукты и ягоды – яблоки, груши, сливы, абрикосы, клубника, малина и др.;
– масличные культуры – подсолнечник и соя;
– орехи – грецкие орехи и фисташки;
– виноградарство – в южных районах СКФО активно занимаются виноградарством.

В Северо-Кавказском федеральном округе общая площадь земель, предназначенных для сельского хозяйства, составляет 13 050,2 тыс. га [12]. Согласно данным Росстата[6], в 2023 году посевные площади пшеницы в СКФО составили 4 778,9 тыс. гектаров. Это означает, что доля пшеницы от общего объема сельскохозяйственных земель в данном регионе приближается к 36,66 %.

По данным Россельхознадзора, средняя урожайность пшеницы в регионе колеблется в пределах 2,5–4 тонны с гектара (2022 г.). При этом затраты на производство одной тонны озимой пшеницы, учитывая средний уровень затрат в 17 590 рублей на гектар[7] и среднюю урожайность 3,25 тонны с гектара, составляют около 5716,25 рублей за тонну. По данным Росстата, посевная площадь по производству пшеницы составляет 112 200 га (в том числе количество хозяйств всех категорий 112 ед.). Если мы возьмем среднюю величину 3,4 тонны с га (3,4 х 112 200 га), то количество производимой в СКФО продукции составляет около 380 800 тонн.

Для определения максимальной чистой прибыли на примере выращивания пшеницы на территории СКФО в условиях традиционных методов ведения сельского хозяйства используем следующие параметры расчета за один год (табл. 1):

Таблица 1. Показатели для расчетов производительности продукции (пшеницы) в СКФО (2022 г.)

Table 1. Indicators for calculating the productivity of products (wheat) in the North Caucasus Federal District (2022)

Вид продукта	Средняя урожайность, т/га	Затраты на производство 1 га (руб./га)	Цена за тонну[8] P (руб./т)	Количество Q (тонн)	Общие затраты C (руб./т)	Инвестиции в роботизацию I (руб./т)
Пшеница	3,07	17590	13132	380800	5 716,25	0

Расчет общего дохода и чистой прибыли:

1. Общий доход (TR) от продажи пшеницы можем рассчитать следующим образом:

$$TR = P \times Q.$$

Подставляем наши значения:

$$TR = (13132 \times 380800) = 5\ 000\ 665\ 600 \text{ рублей.}$$

2. Общие затраты (TC) на производство равны:

$$TC = (C + I) \times Q.$$

С учетом заданных значений (табл. 1):

$$TC = (5223{,}7+0) \times 380800 = 1\ 989\ 184\ 960 \text{ рублей.}$$

3. Чистая прибыль (П):

$$П = TR - TC.$$

[6] Бюллетень «Посевные площади Российской Федерации в 2024 году (весеннего учета)» https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277
[7] Затраты на озимую пшеницу на 1 га, площадь сева 2 865 га http://zerno.avs.ru/news/87813/chto-god-gryadyshhii-nam-gotovit---bankrotstvo-ili-procvetanie.html
[8] Средние цены и индексы цен на приобретенное зерно https://22.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE-08-2024.pdf

$$П = 5\ 000\ 665\ 600 – 1\ 989\ 184\ 960 = 3\ 011\ 480\ 640 \text{ рублей.}$$

4. Рентабельность продукции (Rпр):

$$Rпр = Пр/Сс \times 100\%,$$

где Rпр – рентабельность продукции, Пр – прибыль, Сс – себестоимость.

$$Rпр = 3\ 011\ 480\ 640/198\ 918\ 4960 \times 100\ \% = 1{,}5\ \%.$$

При традиционном методе выращивания пшеницы мы видим высокую рентабельность. Но внедрение инновационных методов может увеличить маржу на значительные показатели, что в свою очередь повысит не только производительность, но и качественные показатели сельскохозяйственной продукции [13].

Предположим, что затраты на инновации в производстве пшеницы в СКФО достигают около 20 млн рублей, что эквивалентно 0,05 % от суммы инвестиций, что составляет примерно 10 000 рублей за тонну.

Предположим, что экономия потери урожая составит 15–20 %[9]. Внедрение роботизации и автоматизации предполагает в первую очередь минимизацию использования человеческого труда (тяжелый и травмоопасный вид деятельности), а также экономию на затратах (химикатов и др.).

Таблица 2. *Показатели для расчетов производительности продукции (пшеницы) в СКФО*

Table 2. Indicators for calculating the productivity of products (wheat) in the North Caucasus Federal District

Вид продукта	Цена за тонну[10] P (руб./т)	Количество Q (тонн)	Общие затраты C (руб./т)	Инвестиции в роботизацию I (руб.)	Экономия потери урожая K, %
Пшеница	13132	380 800	5 716,25	1000	20

Основа данного расчета нацелена на максимизацию чистой прибыли с учетом эффекта применения роботизированных технологий [6], которая может быть представлена следующим уравнением:

$$\max П = \sum(Pi \times Qi – Ci - Ii) + (K*\sum(Pi \times Qi – Ci - Ii)),$$

где:

П – общая чистая прибыль,

Pi – цена за единицу продукции i,

Qi – количество проданного продукта i,

Ci – переменные и фиксированные затраты на производство продукта i,

Ii – инвестиции в технологии (в том числе в роботизацию) для продукта i,

K – процент экономии урожая для продукта i.

Расчет общего дохода и чистой прибыли:

1. Общий доход (TR) от продажи пшеницы с учетом эффекта роботизации можем рассчитать следующим образом:

$$TR = P\ (Q + (Q*K)).$$

Подставляем значения:

$$TR = (13132 \times (380800+(380800*20\%) = 6\ 000\ 798\ 720 \text{ рублей.}$$

[9] Потери зерна в России https://www.mbk.ru/news/poteri-zerna-v-rossii-sostaviat-do-15-ot-urozaia-2022-goda

[10] Средние цены и индексы цен на приобретенное зерно https://22.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE-08-2024.pdf

2. Общие затраты (TC) на производство равны:

$$TC = (C + I) \times Q.$$

С учетом заданных значений (таб. 2):

$$TC = (5223{,}7+1000) \times 380\,800 = 2\,369\,984\,960.$$

3. Чистая прибыль (П):

$$П = TR – TC.$$

$$П = 6\,000\,798\,720 – 2\,369\,984\,960 = 3\,630\,813\,760 \text{ рублей}.$$

4. Рентабельность продукции (Rпр):

$$Rпр = Пр/Сс \times 100\ \%,$$

где Rпр – рентабельность продукции, Пр – прибыль, Сс – себестоимость.

$$Rпр = 3\,630\,813\,760 / 198\,918\,49\,60 \times 100\ \% = 1{,}8\ \%.$$

Разница чистой прибыли традиционного и инновационного метода ведения составляет около 620 млн руб., а рентабельность уже с первого года вырастает на 0,3 %.

Из приведенного примера следует, что внедрение роботизированных технологий в агропромышленный сектор Северо-Кавказского федерального округа обладает огромным потенциалом для повышения рентабельности. Достигнутая чистая прибыль около 620 млн рублей подтверждает высокую эффективность инвестиций в современные агротехнологии. Разработка и внедрение инновационных технологий, таких как роботизация, становятся необходимыми для устойчивого развития аграрного сектора, и эти инвестиции должны рассматриваться как стратегический приоритет для повышения производительности. Оптимизация затрат на производство и интеграция инновационных технологий позволяют уменьшить стоимость единицы продукции и укрепить конкурентные позиции местных производителей на рынке, что особенно важно в условиях глобальной конкуренции. Для успешного внедрения роботизации и других технологий необходим регулярный анализ и мониторинг результатов, что позволит вносить изменения и оптимизировать процессы с целью достижения лучших финансовых результатов.

Выводы

Развитие новых высокоэффективных технологий в сельскохозяйственном секторе требует значительных финансовых вливаний. Во время процесса внедрения инноваций основную роль играет человеческий капитал как инструмент подготовки высококвалифицированных кадров для актуальных в будущем профессий. Успешное внедрение новых технологий в сельском хозяйстве невозможно без комплексного подхода, то есть необходимо улучшение инфраструктуры, логистических процессов и кадрового обеспечения по мере развития инноваций в данном секторе. Целью развития является достижение устойчивого роста и процветания: развитие сельского хозяйства должно быть направлено на улучшение качества жизни населения, сохранение окружающей среды и повышение экономической устойчивости региона. Необходимо разработать стратегию внедрения инноваций в сельское хозяйство СКФО, учитывая специфику региона и перспективы развития; предоставить финансовую поддержку предприятиям АПК для внедрения инновационных технологий. Следует развивать образовательные программы в области инновационного сельского хозяйства и подготовки специалистов с необходимыми навыками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Канищев В. В.*, Жиров Н. А. Устойчивость в развитии крупных русских сельских поселений центра и юга Европейской части России во второй половине XX – начале XXI в. // Вопросы истории. 2021. № 11–2. С. 66–81. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202111Statyi32

2. *Чекунов А. С.* Технологическая модернизация сельскохозяйственного производства: состояние, формы, методы и направления поддержки инноваций // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81. № 1(79). С. 373–379. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-373-379

3. *Попкова А. А., Конев Ю. М.* Управление развитием сельских территорий: вызовы и возможности // Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика. 2020. № 4. С. 85–93. EDN: LXDOAT

4. *Шумакова О. В., Рабканова М. А.* Устойчивое развитие сельских территорий: понятие и сущность // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–7. С. 1643–1646. EDN: SWOIAR

5. *Денисенко В. Ю.* Автоматизация производственных бизнес-процессов в условиях Индустрии 4.0 на промышленных предприятиях // Вопросы инновационной экономики. 2020. № 2. С. 1007–1014. DOI: 10.18334/vinec.10.2.100878

6. *Молчанова Р. В.* Цифровизация процессов в производственной сфере // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. № 6(138). С. 164–169. DOI:10.36871/ek.up.p.r.2023.06.03.018

7. *Голодов С. В., Бабич С. Г., Кокарев М. А.* Система статистических и оптимизационных моделей агропромышленного комплекса. Инновационный аспект // Россия: тенденции и перспективы развития: ежегодник. Москва, 2018. Вып. 13. Часть 1. М.: Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2018. С. 256–259. EDN: OVMFLL

8. *Загазежева О. З., Шалова С. Х.* Перспективы развития сельского хозяйства на основе внедрения роботизированных технологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 5(103). С. 21–32. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-5-103-21-32

9. *Мисостишхова М. И., Край К. Ф., Хаджиева М. И., Бароков Х. А.* Проблемы роботизации и социальная адаптация сельских территорий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 307–318. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-307-318

10. *Игнатьев В. И.* Социокультурные аспекты роботизации // Социология науки и технологий. 2019. Т. 10. № 1. С. 64–78. DOI: 10.24411/2079–0910–2019–10005

11. *Хакимова Д. Р.* Методы математического моделирования в экономике // Молодой ученый. 2022. № 39(434). С. 58–60. EDN: ARNHBV.

12. *Кабаненко М. Н., Андреева Н. А.* Анализ состояния земель сельскохозяйственного назначения России // Экономика, предпринимательство и право. 2020. Том 10. № 4. С. 1035–1050. DOI: 10.18334/epp.10.4.100689

13. *Загазежева О. З., Атабиева А. Х., Шалова С. Х., Хаджиева М. И.* Модели устойчивого развития сельских территорий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 4. С. 94–104. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-4-94-104

REFERENCES

1. Kanishchev V.V., Zhirov N.A. Sustainability in the Development of Large Russian Rural Settlements in the Center and South of the European Part of Russia in the Second Half of the 20th – Early 21st Century. *Voprosy istorii* [Questions of History]. 2021. No. 11-2. Pp. 66–81. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202111Statyi32. (In Russian)

2. Chekunov A.S. Technological Modernization of Agricultural Production: Status, Forms, Methods, and Directions of Innovation Support. *Proceedings of the Voronezh State*

University of Engineering Technologies. 2019. Vol. 81. No. 1(79). Pp. 373–379. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-373-379. (In Russian)

3. Popkova A.A., Konev Yu.M. Rural Development Management: Challenges and Opportunities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Sotsiologiya. Ekonomika. Politika* [News of Higher Educational Institutions. Sociology. Economics. Politics]. 2020. No. 4. Pp. 85–93. EDN: LXDOAT. (In Russian)

4. Shumakova O.V., Rabkanova M.A. Sustainable Development of Rural Territories: Concept and Essence. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research]. 2014. No. 8–7. Pp. 1643–1646. EDN: SWOIAR. (In Russian)

5. Denisenko V.Yu. Automation of Production Business Processes in the Context of Industry 4.0 at Industrial Enterprises. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Issues of Innovative Economics]. 2020. No. 2. Pp. 1007–1014. DOI: 10.18334/vinec.10.2.100878. (In Russian)

6. Molchanova R.V. Digitalization of processes in the manufacturing sector. *Ekonomika i upravleniye: problemy, resheniya* [Economy and management: problems, solutions]. 2023. No. 6(138). Pp. 164–169. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2023.06.03.018. (In Russian)

7. Golodov S.V., Babich S.G., Kokarev M.A. The system of statistical and optimization models of the agro-industrial complex. Innovative aspect // Russia: development trends and prospects: Yearbook, Moscow, 2018. Issue 13, Part 1. Moscow: Institut nauchnoy informatsii po obshchestvennym naukam RAN, 2018. Pp. 256–259. EDN: OVMFLL. (In Russian)

8. Zagazezheva O.Z., Shalova S.Kh. Prospects for the development of agriculture based on the introduction of robotic technologies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021. No. 5(103). Pp. 21–32. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-5-103-21-32. (In Russian)

9. Misostihkhova M.I., Kray K.F., Khadzhieva M.I., Barokov Kh.A. Problems of robotization and social adaptation of rural areas. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 307–318. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-307-318. (In Russian)

10. Ignatiev V.I. Sociocultural aspects of robotization. *Sotsiologiya nauki i tekhnologiy* [Sociology of science and technology]. 2019. Vol. 10. No. 1. Pp. 64–78. DOI: 10.24411/2079–0910–2019–10005. (In Russian)

11. Khakimova D.R. Methods of mathematical modeling in economics. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist]. 2022. No. 39(434). Pp. 58–60. EDN: ARNHBV. (In Russian)

12. Kabanenko M.N., Andreeva N.A. Analysis of the state of agricultural land in Russia. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo* [Economy, Entrepreneurship and Law]. 2020. Vol. 10. No. 4. Pp. 1035–1050. DOI: 10.18334/epp.10.4.100689. (In Russian)

13. Zagazezheva O.Z., Atabieva A.Kh., Shalova S.Kh., Khadzhieva M.I. Models of sustainable development of rural areas. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 4. Pp. 94–104. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-4-94-104. (In Russian)

Вклад авторов:

Загазежева О. З., Хаджиева М. Х. – написание текста статьи и проведение расчетов;
Край К. Ф. – сбор и анализ информации, составление рисунков.

Contribution of the authors:

Zagazezheva O. Z., Khadzhieva M. Kh. –text preparation and calculations;
Kray K. F. – collection and analysis of information, figures.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Загазежева Оксана Зауровна, канд. экон. наук, зав. Инжиниринговым центром, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234, SPIN-код: 3223-6780

Край Карина Фаезовна, мл. науч. сотр. Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

kraykarina@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6927-7361, SPIN-код: 5967-0267

Хаджиева Мариям Ильясовна, мл. науч. сотр. Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

mariam9248@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1607-1324, SPIN-код: 4706-5704

Information about the authors

Oksana Z. Zagazezheva, Candidate of Economic Sciences, Head of the Engineering Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234, SPIN-code: 3223-6780

Karina F. Krai, Junior Researcher of the Center of the Engineering Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

kraykarina@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6927-7361, SPIN-code: 5967-0267

Mariam I. Khadzhieva, Junior Researcher of the Center of the Engineering Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

mariam9248@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1607-1324, SPIN-code: 4706-5704

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 338.26 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-302-315
EDN: WJPLQW

Роль современных технологий в повышении экономической эффективности и решении социальных вызовов сельского хозяйства

О. З. Загазежева✉, К. Ф. Край, С. Х. Шалова, А. А. Махошев

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В работе исследуется роль современных технологий в развитии агропромышленного комплекса Северо-Кавказского федерального округа. Авторами рассматривается вопрос позитивной роли страхования в сельском хозяйстве. Также исследуются экологические и социальные вызовы региона, включая деградацию природных ресурсов и высокий уровень безработицы. Северо-Кавказский федеральный округ обладает большим потенциалом для развития агропромышленного комплекса, но для достижения устойчивых результатов необходимо решить ряд ключевых проблем. В работе для успешной интеграции робототехники в сельское хозяйство авторами исследуется комплексный подход, включающий стратегическое планирование, подготовку персонала и развитие инфраструктуры. Настоящее исследование также подчеркивает необходимость комплексного подхода в использовании высоких технологий в сельском хозяйстве, что позволит оптимизировать процессы, а также снизить негативное воздействие на природу и создать новые рабочие места, способствуя социальному и экономическому развитию СКФО. Авторами подчеркивается необходимость создания благоприятных условий для развития малого и среднего бизнеса, также следует уделять внимание поддержке малых и средних предприятий в агропромышленном секторе СКФО, что является важным фактором увеличения производства и экспорта.

Ключевые слова: устойчивое развитие, агропромышленный комплекс, Северо-Кавказский федеральный округ, инновационные технологии, роботизация, экологические аспекты, социальные стратегии, образовательные программы, кадровая подготовка, экономическая устойчивость, современные технологии, эффективность сельского хозяйства, логистика

Поступила 15.10.2024, одобрена после рецензирования 06.11.2024, принята к публикации 12.12.2024

Для цитирования. Загазежева О. З., Край К. Ф., Шалова С. Х., Махошев А. А. Роль современных технологий в повышении экономической эффективности и решении социальных вызовов сельского хозяйства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 302–315. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-302-315

JEL: R11 Original article

The role of modern technologies in increasing economic efficiency and solving social challenges of agriculture

O.Z. Zagazezheva✉, K.F. Kray, S.Kh. Shalova, A.A. Makhoshev

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. This paper examines the role of modern technologies in the development of the agro-industrial complex of the North Caucasus Federal District. The authors consider the positive role of insurance in agriculture. They also examine the environmental and social challenges of the region,

© Загазежева О. З., Край К. Ф., Шалова С. Х., Махошев А. А., 2024

including the degradation of natural resources and high unemployment. The North Caucasus Federal District has great potential for the development of the agro-industrial complex, but to achieve sustainable results, it is necessary to solve a number of key problems. In this paper, the authors examine an integrated approach to the successful integration of robotics into agriculture, including strategic planning, personnel training and infrastructure development. This study also emphasizes the need for an integrated approach to the use of high technologies in agriculture, which will optimize processes, reduce the negative impact on nature and create new jobs, contributing to the social and economic development of the North Caucasus Federal District. The authors emphasize the need to create favorable conditions for the development of small and medium-sized businesses, and attention should also be paid to supporting small and medium-sized enterprises in the agro-industrial sector of the North Caucasus Federal District, which is an important factor in increasing production and exports.

Keywords: sustainable development, agro-industrial complex, North Caucasian Federal District, innovative technologies, robotics, environmental aspects, social strategies, educational programs, personnel training, economic sustainability, modern technologies, agricultural efficiency, logistics

Submitted 15.10.2024, approved after reviewing 06.11.2024, accepted for publication 12.12.2024

For citation. Zagazezheva O.Z., Kray K.F., Shalova S.Kh., Makhoshev A.A. The role of modern technologies in increasing economic efficiency and solving social challenges of agriculture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 302–315. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-302-315

Введение

Устойчивое развитие агропромышленного комплекса (АПК) в Северо-Кавказском федеральном округе (СКФО) является стратегически важной задачей, обусловленной как богатством природных ресурсов, так и социальной значимостью региона. СКФО обладает уникальными климатическими условиями, плодородными почвами и разнообразными экосистемами, что создает значительный потенциал для интенсивного сельскохозяйственного производства. Однако регион сталкивается с экологическими и социальными вызовами, требующими комплексного подхода, в том числе с использованием инновационных роботизированных технологий.

В СКФО необходимо уделить внимание сохранению природных ресурсов и биоразнообразия. Внедрение методов устойчивого земледелия и роботизированных технологий может предотвратить деградацию почв и эффективно управлять водными ресурсами. Использование экологически безопасных технологий, таких как роботизированные системы для точного земледелия и автоматизированные для управления ресурсами, способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и поддержанию экологического баланса.

Инновационное обеспечение устойчивого развития способствует формированию инновационной стратегии аграрного производства. Увеличение материально-технической базы АПК – необходимое условие для повышения эффективности. Наличие квалифицированных специалистов в АПК – важный аспект для успешного функционирования агропромышленного комплекса. Этические нормы общества и его морально-нравственное состояние влияют на организационно-экономические факторы и механизм развития АПК. Местные обычаи и национальные традиции также играют роль в устойчивом развитии. Географическое расположение и политическая ситуация оказывают непосредственное влияние на развитие агропромышленного комплекса [1].

Целью данного научного исследования является изучение влияния внедрения новых роботизированных технологий и их роли в повышении экономической эффективности и решении социальных вызовов сельского хозяйства.

Основой данного исследования является комплексный обзор литературы, охватывающий исследования по устойчивому развитию сельского хозяйства в СКФО. Обзор включал

работы российских ученых (например, К. М. Балиянц, С. В. Дохолян, Ю. Б. Мельникова) и международных исследователей (например, Дж. Гай, Д. Асемоглу, П. Рестрепо), охватывающие такие аспекты, как необходимая инфраструктура (Н. Д. Берман и др.), разработка цифровой платформы (М. В. Аликаева и др.) и роль государственного регулирования (Д. Рудой, А. Ольшевская и др.) в продвижении цифровизации и повышении эффективности сельского хозяйства.

Для понимания устойчивого развития сельского хозяйства в СКФО в данном исследовании была рассмотрена литература по нескольким ключевым темам: необходимые предпосылки для устойчивого развития сельского хозяйства (К. М. Балиянц и др.), роль транспортной инфраструктуры и образования (Н. Д. Берман и др.), влияние цифровых платформ и экосистем (М. В. Аликаева и др.) и влияние государственной политики на цифровизацию (Д. Рудой и др.). Также были рассмотрены основные международные вклады Дж. Гая, Д. Асемоглу и П. Рестрепо.

В исследовании рассматривается влияние процессов роботизации сельского хозяйства на социо-экономическую систему с применением анализа и синтеза, системного и диалектического подходов.

При выполнении исследования применялись методы статистического и системного анализа, моделирования некоторых социально-экономических процессов, а также экономические эксперименты.

Область применения результатов. Результаты исследования могут способствовать оптимизации и развитию производственных процессов в аграрном секторе при внедрении новых роботизированных технологий в реальный сектор экономики с учетом социальных и экономических факторов.

Анализ текущих вызовов для устойчивого социально-экономического развития АПК СКФО

Для разработки экономической модели первостепенной задачей является проведение детального анализа текущих вызовов региона. Это включает выявление проблем, связанных с деградацией природных ресурсов, таких как эрозия почвы и истощение водных запасов, которые негативно влияют на сельскохозяйственное производство и снижают его устойчивость. Также необходимо учитывать несовершенную инфраструктуру, например, недостаточное состояние транспортных путей и устаревшие энергетические сети, которые затрудняют эффективную логистику и внедрение новых технологий. Понимание этих проблем позволит определить ключевые области для улучшения и стратегии для достижения устойчивого развития.

Анализ антропогенной нагрузки на земли сельскохозяйственного назначения в Северо-Кавказском федеральном округе выявляет ее значительный уровень, в то время как обеспеченность населения пашней остается недостаточной. Данная ситуация порождает целый ряд социально-экономических и экологических проблем, что подчеркивает необходимость внедрения комплексных методов управления земельными ресурсами. Для этого рекомендуется разработать стратегию рационального использования земельного фонда, включающую мероприятия, направленные на повышение плодородия почв, оптимизацию агропромышленного комплекса и мониторинг негативных явлений, таких как эрозия и деградация [2].

Климатические изменения в южных регионах России приводят к засухам и нехватке воды, но также открывают новые возможности для сельского хозяйства. Однако воздействие климата на регионы неоднозначно: проблемы с водоснабжением могут затронуть Южный и Северо-Кавказский федеральные округа. Несмотря на вызовы, южные регионы успешно адаптируются к изменениям, что может способствовать развитию аграрного сектора[1].

[1]Изменения климата на Юге создают новые возможности для развития АПК. https://kavkaz.rbc.ru/kavkaz/freenews/66d724fc9a79472654b54e11

Анализ функционирования транспортной инфраструктуры СКФО выявил, что транспортная система региона, включающая разнообразные виды путей сообщения, играет ключевую роль в экономическом развитии региона [3]. Транспортная инфраструктура, представляющая собой сложную сеть, соединяющую города и обеспечивающую деятельность человека, является системообразующим сектором экономики. От ее состояния зависят не только скорость и качество перевозок, но и общий уровень жизни населения [4].

Недостатки в планировании транспортной системы могут привести к серьезным негативным последствиям, включая увеличение дорожно-транспортных происшествий и экологические проблемы. При этом качественная транспортная структура служит важным инструментом для снижения географических барьеров и улучшения доступа к рынкам, что в свою очередь способствует экономическому росту.

Аграрное образование в России сегодня сталкивается с существенными вызовами, основным из которых является дефицит квалифицированных кадров в агропромышленном комплексе (АПК). Игнорирование кадровой проблемы не только замедляет развитие АПК, но и сказывается на его конкурентоспособности [5].

Исследования зарубежной практики показывают, что ведущие аграрные университеты по всему миру выступают драйверами трансформации в сельском хозяйстве, что подчеркивает важность исследовательских университетов нового типа как вектора развития высшего образования. Это учитывает необходимость внедрения интегративного подхода к обучению, который сочетает науку и практику, а также требует адаптации образовательных стандартов к потребностям реального сектора экономики.

Приоритетными направлениями развития аграрного образования являются: удовлетворение потребностей АПК в профессиональных кадрах, развитие практико-ориентированной науки и позитивное развитие сельских территорий.

Таким образом, для успешной адаптации аграрного образования к современным условиям необходимо осознание значимости и необходимость интеграции образования, науки и бизнеса, что позволит повысить качество подготовки специалистов и обеспечить устойчивое развитие аграрного комплекса на территории СКФО. Осуществление этих стратегий на региональном уровне создаст платформу для подготовки высококвалифицированных кадров, что в свою очередь повысит конкурентоспособность отрасли как на национальном, так и на международном уровне.

Для создания условий активизации деятельности аграрной науки необходимо обеспечить развитие системы подготовки и переподготовки научных кадров и специалистов в сфере АПК, где ключевыми заинтересованными сторонами являются фермеры, научно-исследовательские и образовательные системы, фирмы (поставщики ресурсов, сельхозпроизводители, переработка, дистрибьюция, оптовая и розничная торговля), правительственные министерства и субъекты [6].

Аграрная политика РФ предполагает активное финансирование со стороны государства, включая механизм субсидирования и кредитования.

Эффективная система агрострахования критически важна для обеспечения финансовой устойчивости агробизнеса, что в свою очередь позволяет избежать необходимости экстренного выделения значительных денежных средств для поддержки сельскохозяйственного сектора в условиях природных катастроф[2].

Для достижения этих стратегических целей необходимо сосредоточиться на развитии малых и средних предприятий в агросекторе, что подчеркивает важность поддержки малых форм хозяйствования.

[2] А. Двойных: К системе агрострахования необходимо подключить и малые формы хозяйствования http://council.gov.ru/events/news/155103/

Следует отметить, что в 2022 году в рамках программы по предотвращению чрезвычайных ситуаций было застраховано 2,6 миллиона гектаров земель в 40 регионах страны, а в 2023 году этот показатель возрос до 4,9 миллиона гектаров в 49 регионах, что свидетельствует о 40%-м увеличении уровня страхования, обусловленном повышенным участием крестьянско-фермерских хозяйств.

СКФО имеет большой потенциал для развития агропромышленного комплекса, однако для достижения устойчивых результатов необходимо решить несколько ключевых проблем, приведенных в таблице 1. Комплексный подход, который включает в себя как экологические, так и социально-экономические аспекты, будет способствовать созданию устойчивой основы для развития региона.

Таблица 1. Проблемы и решения агропромышленного комплекса СКФО

Table 1. Problems and solutions of the agro-industrial complex of the North Caucasus Federal District

Категория	Проблема	Описание	Предложенные меры решения
1. Деградация природных ресурсов	Проблемы почвы и эрозия	В СКФО наблюдается деградация земель, вызванная неконтролируемыми методами обработки и стечением вод	Внедрение методов агрономического севооборота, восстановление почв с помощью органического земледелия и использование сидератов для улучшения структуры почвы
	Истощение водных ресурсов	Регион сталкивается с проблемой нехватки воды, особенно в засушливые годы, что критически влияет на урожайность	Использование технологий капельного орошения и создание инфраструктуры для хранения дождевой воды. Применение методов "умного" орошения, которые оптимизируют потребление воды на полях, может значительно повысить эффективность
	Ухудшение биоразнообразия	Интенсивное земледелие и использование химикатов приводят к снижению биологического разнообразия	Внедрение систем агролесоводства и биологических методов защиты растений, а также программы восстановления естественных экосистем
2. Несовершенная инфраструктура	Транспортная инфраструктура	Плохое состояние дорог и недостаточная транспортная инфраструктура затрудняют доставку продукции на рынки	Инвестиции в модернизацию дорожной инфраструктуры и транспортных систем, включая создание логистических центров
	Энергетическая инфраструктура	Нехватка электроэнергии и низкое качество энергоснабжения сдерживают развитие сельскохозяйственного производства	Развитие местных источников возобновляемой энергетики, таких как солнечные и ветровые электростанции, что позволит сократить зависимость от централизованного энергоснабжения
	Логистика и хранение	Недостаток складских мощностей и холодильных установок ведет к потерям продукции	Строительство современных складских комплексов с холодильными установками для минимизации потерь
3. Социально-экономические факторы	Низкий уровень профессиональной подготовки	Нехватка квалифицированных кадров в агропромышленном комплексе ухудшает производительность	Разработка программ обучения и повышения квалификации для работников АПК, сотрудничество с учебными заведениями для подготовки специалистов
	Экономическая нестабильность	Колебание цен и финансовые ограничения затрудняют долгосрочное планирование	Разработка финансовых инструментов, таких как агрострахование и программы поддержки малых фермерских хозяйств
	Финансирование и доступ к кредитам	Местные производители часто сталкиваются с недостатком финансирования для обновления оборудования и технологий	Создание программ государственного субсидирования и кредитования аграриев, а также поддержка кооперативов, которые смогут аккумулировать ресурсы

4. Рынки и сбыт	Доступ к рынкам	Провинциальные фермеры часто имеют ограниченный доступ к крупным рынкам	Развитие местных торговых сетей и ярмарок, а также создание платформ для онлайн-продаж, что позволит расширить рынок сбыта
	Цены и конкуренция	Конкуренция с импортными продуктами и колебания цен делают местных производителей уязвимыми	Поддержка местного производства через субсидии и применение мер по защите отечественного производителя
5. Экологические угрозы	Изменения климата	Изменения погодных условий создают нестабильность производства	Разработка адаптационных стратегий, основанных на исследовании климатических прогнозов, и внедрение устойчивых сельскохозяйственных практик.

С учетом структурных изменений, которые происходили порядка 20 лет в российской экономике, в частности в агропромышленном комплексе, необходимо провести модернизацию во всех отраслях народного хозяйства. В условиях глобальных изменений АПК имеет важное значение для российской экономики. Исследование показывает положительные тенденции в СКФО, но необходим комплексный подход к решению социальных, экологических и экономических проблем, что является ключом к успешному внедрению новых технологий в АПК. Также следует учитывать социальные последствия внедрения роботизированных технологий в сельском хозяйстве, включая проблемы занятости и необходимость адаптации рабочей силы к новым условиям. Изменения, которые происходят на рынке труда в процессе модернизации технологий, требуют необходимости обеспечения людей информацией о новых профессиях и навыках, которые будут востребованы в будущем. Также необходимо разработать стратегию устойчивого развития, которая будет учитывать социальные, экологические и экономические последствия внедрения роботизированных технологий.

Оценка экономической эффективности использования робототехники в сельском хозяйстве

Внедрение робототехники в сельскохозяйственные предприятия оказывает значительное воздействие на ключевые экономические показатели их функционирования, такие как производительность труда, объем продукции, себестоимость, рентабельность и фондоотдача. Комплексный анализ результатов использования аграрной робототехники поможет выявить сложности, связанные с интеграцией научных и технических достижений в агросектор, а также выбрать самые эффективные стратегии для ускоренного внедрения данных технологий.

Роботизация в сельском хозяйстве охватывает три основных направления:

1. *Автономные транспортные средства* – для перевозки грузов и мониторинга полей.
2. *Системы вегетации* – для посева, опрыскивания и сбора урожая.
3. *Животноводческие технологии* – для автоматизированного доения и управления фермами.

Эти технологии способны повысить урожайность, сократить затраты и снизить негативное воздействие на окружающую среду, делая сельское хозяйство более эффективным и экологически чистым [7–9].

Наиболее важным экономическим эффектом от использования робототехники в сельском хозяйстве является снижение затрат на оплату труда, что приводит к освобождению части работников, уменьшению трудозатрат на производство и увеличению общей производительности труда.

Роботы-опрыскиватели представляют собой ключевую инновацию в современном сельском хозяйстве, обеспечивают более эффективные и устойчивые методы обработки культур. Эти автономные машины, оснащенные передовыми сенсорными системами, способны

детектировать состояние растений и анализировать данные об окружающей среде. Используя алгоритмы машинного обучения, они адаптируются к условиям, оптимизируя процессы опрыскивания. Это позволяет фермерам минимизировать применение пестицидов и удобрений, повышая целесообразность их использования [10–12].

Автономность этих роботов позволяет им осуществлять работу без постоянного контроля, что не только снижает затраты на рабочую силу, но и позволяет повысить точность операций. Возможность обходить препятствия и корректировать маршрут в реальном времени делает их идеальными для сложных агрономических задач. Кроме того, интеграция с системами управления фермой и спутниковыми технологиями предоставляет фермерским хозяйствам доступ к критически важной информации о погоде и состоянии почвы, что дополнительно усовершенствует процесс принятия решений.

По данным ФАО, ущерб от вредителей и болезней обходится миру в 75 миллиардов долларов в год, затрагивая 34,9 % мирового производства сельскохозяйственных культур[3]. Для повышения эффективности сельскохозяйственных работ в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» была разработана концепция мультиагентной системы защиты посевов с использованием коллаборативных автономных роботов[4]. С целью обеспечения бесперебойного мониторинга и анализа состояния посевов, а также своевременного внесения необходимых химических веществ предлагается использовать систему, состоящую из сети роботов, которые будут распределять задачи между собой. Разработанная система включает в себя автономного робота для мониторинга и защиты растений, а также обслуживающую инфраструктуру для подготовки химических веществ и зарядки аккумуляторов. На данном этапе реализован прототип автономного робота для защиты растений, который оснащен манипуляторами и системой опрыскивания для точечной обработки заболевших растений. Внедрение мультиагентной системы защиты посевов на основе коллаборативных автономных роботов является примером внедрения инновационных технологий в сельское хозяйство.

Рис. 1. *Автономный робот для защиты растений*

Fig. 1. *Autonomous robot for plant protection*

[3]Урожай, потери от сельскохозяйственных вредителей https://ru-ecology.info/term/15892/#:~:

[4]Интеллектуальная интегрированная экспертная система защиты растений. https://projects.kbncran.ru/?page_id=3146

Планируется, что внедрение системы защиты посевов с использованием роботов позволит агропроизводителям сохранить урожай, снизить химическую нагрузку на почву и сократить затраты на рабочую силу и химические препараты. Данная система активной защиты посевов приведет к увеличению дохода агропроизводителей и окупится в течение 1–2 лет. Применение данной системы приведет к снижению экологической нагрузки на окружающую среду, повышению качества урожая и улучшению конкурентоспособности продукции на внешних рынках.

Инновационная система защиты посевов основана на использовании роботизированных технологий и обеспечивает более эффективный и устойчивый подход к защите растений.

Для оценки эффективности внедрения интеллектуальной экспертной системы активной защиты растений будет проведен сравнительный анализ традиционного метода и метода с применением автономного робота на примере выращивания кукурузы на территории Кабардино-Балкарской Республики (рис. 1). В данном анализе учитываются планируемые эффекты внедрения автономного робота.

Таблица 2. Калькуляция затрат на выращивание кукурузы на 1 га в руб. [13]

Table 2. Calculation of costs for growing corn per 1 ha in rubles [13]

№	Наименование	При традиционном методе (фактические данные), руб.	При внедрении автономного робота (проектные данные), руб.
1	Оплата труда с отчислениями на социальные нужды	12000	6000
2	Аренда поля в год	4200	4200
3	Аренда оборудования	750	750
	Амортизация	300	6000
4	Семена	7500	7500
5	Удобрения, инсектициды	8250	825
6	Полив	15000	15000
7	Топливо	7500	8500
8	Расходы на сбыт	4500	4500
9	Итого себестоимость на 1 га	60000	53275
10	Выручка	150 000	210 000
11	Рентабельность, в %	1	1,9

В таблице 2 приведена сравнительная оценка технико-экономической эффективности внедрения интеллектуальной интегрированной экспертной системы активной защиты растений на примере выращивания кукурузы на территории Кабардино-Балкарской Республики.

Исходя из приведенных расчетов видно, что внедрение системы активной защиты посевов приводит к сокращению затрат на оплату труда на 50 % и покупку удобрений и пестицидов на 20% за счет автоматизации процессов, ежедневного мониторинга (своевременного определения заболевания растений). Благодаря снижению затрат на рабочую силу и химические препараты, а также сохранению урожая система активной защиты посевов приводит к увеличению дохода агропроизводителя. Совокупный планируемый эффект позволит снизить потери урожая на 30 %. При этом срок окупаемости системы активной защиты посевов может составить около одного сезона для участка, засеянного кукурузой, площадью 50 га. Внедрение системы активной защиты посевов требует дополнительных инвестиций в оборудование, но эти затраты окупаются за счет снижения других издержек. Система активной защиты посевов приводит к увеличению дохода агропроизводителя за счет сокращения затрат и повышения урожайности.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВНЕДРЕНИЮ РОБОТОТЕХНИКИ В СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Новые технологии имеют существенное значение в повышении эффективности и решении некоторых социальных проблем в сельскохозяйственной отрасли. Однако внедрение роботизированных и автоматизированных систем в сельское хозяйство – это не просто приобретение техники, а комплексный процесс, который требует внимания ко всем аспектам его внедрения и эксплуатации.

Рис. 2. *Комплексный подход к внедрению робототехники в сельское хозяйство*

Fig. 2. *An integrated approach to the introduction of robotics in agriculture*

Рассмотрим ключевые аспекты комплексного подхода (рис. 2), которые представляют собой:

1. Стратегическое планирование:

– Требуется определить, какие цели и задачи в будущем надо решить при покупке робототехнических систем, это касается повышения производительности, минимизации затрат, улучшения качества продукции, снижения негативного воздействия на окружающую среду.

– Провести анализ условий работы в данном регионе: тип производства, тип почвы, климат, доступные ресурсы.

– Определить, какие робототехнические системы лучше всего подходят для тех или иных потребностей.

– Разработать план применения робототехнических систем, который будет учитывать финансовые возможности и необходимые ресурсы.

2. Подготовка и обучение:

– Необходимо подготовить персонал посредством обучения с целью освоения новой техники и программного обеспечения.

– Требуется повысить квалификацию работников в области роботизации и автоматизации сельскохозяйственных процессов.

3. Инфраструктура и технологии:

– Необходимо организовать инфраструктуру для работы с новыми технологиями, а также проверить наличие подходящих энергетических сетей, систем связи, интернета и т.д.

– Нужно подобрать оборудование и программное обеспечение, которое учитывает требования роботизированных и автоматизированных технологий.

4. Финансовый анализ:

– В данном контексте следует определить инвестиционные затраты: расчет стоимости закупки роботизированных систем, обучения персонала, модернизации инфраструктуры.

– Оценить экономическую эффективность и провести анализ окупаемости инвестиций в данные технологии.

– Подобрать программы финансовой поддержки: государственные субсидии или кредиты для внедрения робототехники.

5. Мониторинг и оптимизация:

– Необходимо отслеживать эффективность работы роботизированных систем и вносить необходимые коррективы в их работу.

– Требуется также провести исследование данных, полученных от роботов, чтобы проанализировать производственные процессы и оптимизировать их работу.

6. Устойчивое развитие:

– Экологическая безопасность – в данном контексте необходимо убедиться, что приобретенная технология не оказывает негативного воздействия на окружающую среду.

– Социальная ответственность, здесь требуется обратить внимание на социальные последствия внедрения робототехнических систем, а также провести переквалификацию и переобучение работников, которые могут потерять рабочие места [14, 15].

Комплексный подход к внедрению робототехники в сельском хозяйстве позволит максимизировать ее потенциал и достичь устойчивого развития отрасли. Для минимизации отрицательных эффектов внедрения роботизированных технологий необходимо поддерживать образовательные программы, направленные на подготовку специалистов в области робототехники и сельского хозяйства, также следует обеспечить финансовую и информационную поддержку малым фермерским хозяйствам для внедрения новых технологий, стимулировать сотрудничество между учеными, предпринимателями и сельскохозяйственными предприятиями для развития инноваций. Полученные результаты подчеркивают важнейшую роль современных технологий в повышении экономической продуктивности сельского хозяйства при одновременном смягчении присущих ему социальных проблем.

Выводы

Данное исследование демонстрирует значительное влияние современных технологий как на экономические показатели, так и на социальное благополучие сельскохозяйственного сектора. Применение роботизированных технологий в сельском хозяйстве может привести к значительному повышению рентабельности производства за счет увеличения производительности труда, снижения затрат и улучшения качества продукции. Роботизация в сельском хозяйстве охватывает широкий спектр областей, включая автоматизацию транспорта, системы вегетации и животноводческие технологии. Внедрение роботов в данной отрасли способствует

снижению негативного воздействия на окружающую среду за счет более рационального использования ресурсов и уменьшения применения химических веществ, а также повышению конкурентоспособности сельскохозяйственных предприятий на рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балиянц К. М., Дохолян С. В., Эминова Э. М.* Предпосылки и факторы устойчивого развития агропромышленного комплекса Северо-Кавказского федерального округа (СКФО) в условиях современной экономики // Региональные проблемы преобразования экономики. 2020. № 7(117). С. 25–35. DOI: 10.26726/1812-7096-2020-07-25-35

2. *Мусаев М. Р., Шаповалов Д. А., Клюшин П. В., Савинова С. В.* Экология землепользования сельскохозяйственных угодий в Северо-Кавказском федеральном округе // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11. № 2. С. 132–142. EDN: WELZPH

3. *Аликаева М. В., Асланова Л. О., Гурфова Р. В., Уянаева М. Б.* Оценка уровня развития цифровой экономики субъектов Северо-Кавказского федерального округа // Вестник Российского университета кооперации. 2021. № 2(44). С. 4–12. DOI: 10.52623/2227-4383-2-44-1

4. *Берман Н. Д.* Влияние транспортной инфраструктуры на устойчивое развитие: тенденции и проблемы // *International Journal of Advanced Studies*. 2020. Т. 10. № 2. С. 7–14. DOI: 10.12731/2227-930X-2020-2-7-14

5. *Шварев Е. В., Никулина Н. Н., Гордиенко И. В., Давитян М. Г.* Направления развития аграрного образования региона для предприятий АПК // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. № 4(28). С. 274–287. EDN: ONLPOG

6. *Загазежева О. З., Край К. Ф., Хаджиева М. И.* Анализ эффективности сельского хозяйства на примере СКФО и выявление методов ее повышения за счет внедрения инноваций на основе исследования зарубежного опыта (Китай и Финляндия) // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 249–260. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-249-260

7. *Загазежева О. З., Шалова С. Х., Канокова М. А.* Анализ применения современных роботизированных технологий в сельском хозяйстве и их экономическая эффективность // Перспективные системы и задачи управления: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции и XIII молодежной школы-семинара, п. Домбай, 04–08 апреля 2022 года. Таганрог: ИП Марук М. Р., 2022. С. 289–302.

8. *Загазежева О. З., Бербекова М. М.* Основные тренды развития роботизированных технологий в сельском хозяйстве // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 5(103). С. 11–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-5-103-11-20

9. *Melnikov Y.B., Skvortsov E., Ziablitckaia N., Kurdyumov A.* Modeling of territorial and managerial aspects of robotization of agriculture in Russia // *Mathematics.* 2022. No. 10. P. 2540. DOI: 10.3390/math10142540

10. *Gai J.* Modeling, simulation, and visualization of agricultural and field robotic systems // *Agriculture Automation and Control.* 2021. URL: https://www.academia.edu/71286670/Modeling_Simulation_and_Visualization_of_Agricultural_and_Field_Robotic_Systems (Дата обращения: 01.07.2024)

11. *Acemoglu D., Restrepo P.* The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review*. 2018. No. 108(6). Pp. 1488–1542. DOI: 10.1257/aer.20160696

12. *Кирсанов В. В., Павкин Д. Ю., Никитин Е. А., Заикин В. П.* Математическая модель управления электромоторизированным приводом робота для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах // Вестник НГИЭИ. 2020. № 7 (110). С. 14–24. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10060

13. *Бжихатлов К. Ч., Загазежева О. З., Мамбетов И. А.* Концепция интеллектуальной системы защиты растений и оценка эффективности ее внедрения // Перспективные системы и задачи управления: материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара, п. Домбай, Карачево-Черкесская Республика, 03–07 апреля 2023 года. Таганрог: Лукоморье, 2023. С. 404–412.

14. *Карпунин Б. Ф.* Алгоритм логистики сельскохозяйственного производства на роботизированной растениеводческой ферме // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 2. С. 69–72. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10218

15. *Rudoy D., Olshevskaya A., Odabashyan A., Vershinina A., Marchenko S., Sarkisian D., Prutskov A., Kulikova N.* Implementation of robotic technologies in agriculture. BIO Web of Conferences. 2024. No. 113. 05023. DOI: 10.1051/bioconf/202411305023.

REFERENCES

1. Baliyants K.M., Dokholyan S.V., Eminova E.M. Prerequisites and factors of sustainable development of agro-industrial complex of the North Caucasus Federal District (NCFD) in the conditions of modern economy. *Regional'nyye problem preobrazovaniya ekonomiki* [Regional Problems of Economic Transformation]. 2020. No. 7(117). Pp. 25–35. DOI: 10.26726/1812-7096-2020-07-25-35. (In Russian)

2. Musaev M.R., Shapovalov D.A., Klushin P.V., Savinova S.V. Ecology of land use of agricultural lands in the North Caucasian Federal District. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* [South of Russia: ecology, development]. 2016. Vol. 11. No. 2. Pp. 132–142. EDN: WELZPH. (In Russian)

3. Alikaeva M.V., Aslanova L.O., Gurfova R.V., Uyanaeva M.B. Assessment of the level of development of digital economy of the subjects of the North Caucasian Federal District. *Vestnik Rossiyskogo universiteta kooperatsii* [Bulletin of the Russian University of Cooperation]. 2021. No. 2(44). С. 4–12. DOI: 10.52623/2227-4383-2-44-1. (In Russian)

4. Berman N.D. Influence of transport infrastructure on sustainable development: trends and problems. *International Journal of Advanced Studies.* 2020. Vol. 10. No. 2. Pp. 7–14. DOI: 10.12731/2227-930X-2020-2-7-14. (In Russian)

5. Shvarev E.V., Nikulina N.N., Gordienko I.V., Davityan M.G. Directions of development of agrarian education of the region for enterprises of agroindustrial complex. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy* [Innovations in agroindustrial complex: problems and prospects]. 2020. No. 4(28). Pp. 274–287. EDN: ONLPOG. (In Russian)

6. Zagazezheva O.Z., Kray K.F., Khadzhieva M.I. Analysis of the efficiency of agriculture on the example of the North Caucasian Federal District and identification of methods to improve it through the introduction of innovations based on the study of foreign experience (China and Finland). *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2022. No. 6(110). Pp. 249–260. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-249-260. (In Russian)

7. Zagazheva O.Z., Shalova S.Kh., Kanokova M.A. Analysis of the application of modern robotic technologies in agriculture and their economic efficiency. *Perspektivnyye sistemy i zadachi upravleniya: materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIII molodozhnoy shkoly-seminara* [Perspective Systems and Management Problems: Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference and XIII Youth School-Seminar]. Dombai, 04–08 April 2022. Taganrog: IP Maruk M.R., 2022. Pp. 289–302. (In Russian)

8. Zagazhezheva O.Z., Berbekova M.M. Main trends in the development of robotic technologies in agriculture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2021. No. 5(103). С. 11–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-5-103-11-20. (In Russian)

9. Melnikov Y.B., Skvortsov E., Ziablitckaia N., Kurdyumov A. Modeling of Territorial and Managerial Aspects of Robotization of Agriculture in Russia. *Mathematics 2022*. No. 10. P. 2540. DOI: 10.3390/math10142540

10. Gai J. Modeling, Simulation, and Visualization of Agricultural and Field Robotic Systems. *Agriculture Automation and Control*, 2021. URL: https://www.academia.edu/71286670/Modeling_Simulation_and_Visualization_of_Agricultural_and_Field_Robotic_Systems (accessed 01.07.2024)

11. Acemoglu D., Restrepo P. The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review*. No. 108(6). 2018. Pp. 1488–1542. DOI: 10.1257/aer.20160696

12. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Nikitin E.A., Zaikin V.P. Mathematical model for controlling an electric motorized drive of a robot for servicing a feed table at livestock complexes. *Vestnik NGIEI* [Bulletin of NGIEI]. 2020. No. 7(110). Pp. 14–24. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10060. (In Russian)

13. Brzikhatlov K.Ch., Zagazezheva O.Z., Mambetov I.A. Concept of an intelligent plant protection system and evaluation of the effectiveness of its implementation. *Perspektivnyye sistemy i zadachi upravleniya: materialy XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara* [Promising management systems and tasks: Materials of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference and the XIV Youth School seminar]. P. Dombai, Karachevo-Cherkess Republic, April 03–07, 2023. Taganrog: Lukomor'ye, 2023. Pp. 404–412. (In Russian)

14. Karpunin B.F. Algorithm for logistics of agricultural production on a robotic crop farm. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology in the agro-industrial complex]. 2018. Vol. 32. No. 2. Pp. 69–72. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10218. (In Russian)

15. Rudoy D., Olshevskaya A., Odabashyan A. et al. Implementation of robotic technologies in agriculture. *BIO Web of Conferences*. 2024. No. 113. 05023. DOI: 10.1051/bioconf/202411305023

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Загазежева Оксана Зауровна, канд. экон. наук, зав. Инжиниринговым центром, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360004, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234, SPIN-код: 3223-6780

Край Карина Фаезовна, мл. науч. сотр., Инжиниринговый центр, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360004, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
kraykarina@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6927-7361, SPIN-код: 5967-0267

Шалова Сатаней Хаутиевна, науч. сотр., Инжиниринговый центр, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360004, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
satanei@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-1309, SPIN-код: 2183-8224

Махошев Артур Ахматович, мл. науч. сотр., Инжиниринговый центр, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360004, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
arturmakhosh@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9199-7632, SPIN-код: 1796-1543

Information about the authors

Oksana Z. Zagazezheva, Candidate of Economic Sciences, Head of the Engineering Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234, SPIN-code: 3223-6780
Karina F. Krai, Junior Researcher, The Center of the Engineering Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
kraykarina@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6927-7361, SPIN-code: 5967-0267
Sataney Kh. Shalova, Researcher, The Engineering Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
satanei@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-1309, SPIN-code: 2183-8224
Artur A. Makoshev, Junior Researcher, The Engineering Center of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
arturmakhosh@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9199-7632, SPIN-code: 1796-1543

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 332.02 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-316-325
EDN: WWPXYK

Анализ эффективности реализации инновационных проектов развития региона

Т. Р. Магомаев

Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М. Д. Миллионщикова
364024, Россия, г. Грозный, пр-т Х. А. Исаева, 100

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью объективной оценки результатов масштабных инвестиций региона в инновационные разработки, направленные на ускоренное социально-экономическое развитие. В статье представлен комплексный анализ эффективности реализации инновационных проектов развития Чеченской Республики за последние 10 лет. Научная новизна работы заключается в разработке авторской методики комплексной оценки эффективности инновационных проектов, учитывающей не только экономические, но и социальные, экологические и институциональные аспекты.

Ключевые слова: инновационные проекты, эффективность, Чеченская Республика, комплексная оценка, региональное развитие, инновационная инфраструктура, государственная поддержка

Поступила 08.11.2024, одобрена после рецензирования 20.11.2024, принята к публикации 02.12.2024

Для цитирования. Магомаев Т. Р. Анализ эффективности реализации инновационных проектов развития региона // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 316–325. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-316-325

Original article

Analyzing the efficiency of innovative regional development projects

T.R. Magomaev

Grozny state oil technical university named after academician M.D. Millionshchikov
364024, Russia, Grozny, 100 Isaev avenue

Abstract. The relevance of the research is conditioned by the necessity of objective assessment of the results of large-scale investments of the region in innovative developments aimed at accelerated socio-economic development. The article presents a comprehensive analysis of the effectiveness of the implementation of innovative development projects in the Chechen Republic in the last ten years. The scientific novelty of the work lies in the development of the author's methodology of comprehensive assessment of the effectiveness of innovation projects, which takes into account not only economic, but also social, environmental and institutional aspects.

Keywords: innovation projects, efficiency, Chechen Republic, comprehensive assessment, regional development, innovation infrastructure, state support

Submitted 08.11.2024, approved after reviewing 20.11.2024, accepted for publication 02.12.2024

© Магомаев Т. Р., 2024

For citation. Magomaev T.R. Analyzing the efficiency of innovative regional development projects. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 316–325. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-316-325

Введение

В современных экономических условиях одной из ключевых задач регионального развития является внедрение инноваций, способных обеспечить ускоренное социально-экономическое развитие территорий. Особую актуальность данная проблема приобретает для регионов с недостаточно диверсифицированной экономикой, где необходимо создавать новые точки роста. В этом контексте Чеченская Республика представляет собой уникальный пример субъекта Российской Федерации, осуществляющего масштабные инвестиции в инновационные проекты в различных сферах – от промышленности до туризма. Вместе с тем объективная оценка эффективности этих проектов до сих пор не проводилась, что определяет актуальность данного исследования. Вопросы оценки эффективности реализации инновационных проектов в рамках регионального развития широко освещены в трудах отечественных ученых. Значительный вклад в разработку теоретических и методологических основ управления инновационными процессами на региональном уровне внесли такие исследователи, как Агеев Д. В., Гурьянов Д. В., Павленко С. Н., Орлова А. И. и другие. В их работах рассматриваются различные подходы к определению эффективности инновационных проектов, критерии и методы ее оценки. Так, Агеев Д. В. предложил методику комплексной оценки эффективности инновационных проектов, включающую в себя не только экономические, но и социальные, экологические и институциональные аспекты [1, 2]. Лизунов В. В. разработал систему показателей, позволяющих оценивать влияние инновационных проектов на социально-экономическое развитие региона [4].

Гурьянов Д. В., Павленко С. Н. уделили особое внимание вопросам управления инновационными процессами на региональном уровне, определив ключевые факторы, влияющие на эффективность их реализации [3, 5]. Вместе с тем специфика инновационного развития регионов Северного Кавказа, и Чеченской Республики в частности, остается малоизученной. Несмотря на активную реализацию в регионе различных инновационных проектов, комплексный анализ их эффективности до сих пор не проводился. В этой связи представляется актуальным проведение подобного исследования, позволяющего выявить ключевые барьеры и драйверы инновационного развития Чеченской Республики. Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к оценке эффективности реализации инновационных проектов развития Чеченской Республики, учитывающего не только экономические, но и социальные, экологические и институциональные аспекты.

Цель

В работе предлагается авторская методика, позволяющая выявить ключевые факторы, определяющие успешность внедрения инноваций в регионе. Основная проблема заключается в отсутствии объективной оценки эффективности реализуемых в Чеченской Республике инновационных проектов, что затрудняет принятие управленческих решений и прогнозирование дальнейших перспектив инновационного развития региона. Несмотря на значительные инвестиции в инновационные разработки, до сих пор не ясно, в какой степени их внедрение способствует социально-экономическому развитию Чеченской Республики, какие факторы оказывают наибольшее влияние на эффективность этих проектов.

Выдвигается гипотеза о том, что комплексный анализ эффективности инновационных проектов в Чеченской Республике с учетом экономических, социальных, экологических и институциональных факторов позволит выявить ключевые барьеры и драйверы иннова-

ционного развития региона. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и корректировке государственной политики, направленной на повышение эффективности реализации инновационных проектов в Чеченской Республике.

Объектом исследования являются инновационные проекты, реализуемые в Чеченской Республике.

Предмет исследования – факторы, определяющие эффективность реализации инновационных проектов развития Чеченской Республики.

Теоретической и методологической основой исследования послужили фундаментальные положения экономической теории, теории инновационного развития, управления инновационными процессами, а также труды отечественных и зарубежных ученых по проблемам оценки эффективности инновационных проектов на региональном уровне. В процессе исследования были использованы общенаучные методы, такие как анализ и синтез, индукция и дедукция, сравнение и обобщение, а также экономико-статистические, экспертные и расчетно-аналитические методы.

Информационную базу исследования составили нормативно-правовые акты Российской Федерации и Чеченской Республики, статистические данные Федеральной службы государственной статистики, материалы научно-практических конференций, монографии, публикации в периодических изданиях, а также результаты собственных расчетов автора. Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанная методика комплексной оценки эффективности реализации инновационных проектов в Чеченской Республике может быть использована органами государственной власти региона при принятии управленческих решений, направленных на повышение эффективности инновационной деятельности. Кроме того, полученные в ходе исследования результаты могут быть применены при разработке и корректировке государственных программ, стратегий и концепций инновационного развития Чеченской Республики.

Основные результаты

Темпы инновационного развития Чеченской Республики одни из самых динамичных в Российской Федерации. По данным Министерства экономического, территориального развития и торговли Чеченской Республики, за последние 10 лет (2014–2024 гг.) в регионе было реализовано более 50 крупных инновационных проектов общей стоимостью свыше 150 млрд рублей. Эти проекты охватывают широкий спектр отраслей, включая промышленность, сельское хозяйство, энергетику, туризм, IT-сектор и др. Так, например, в 2015 году в Чеченской Республике был запущен инновационный агропромышленный кластер, нацеленный на внедрение высокотехнологичных решений в аграрном секторе региона. В рамках кластера были реализованы такие проекты, как создание роботизированных молочных ферм, внедрение системы точного земледелия, разработка инновационных сортов сельскохозяйственных культур.

По данным Министерства сельского хозяйства Чеченской Республики, за 2015–2023 гг. объем производства сельскохозяйственной продукции в регионе вырос на 37 %, а производительность труда в аграрном секторе увеличилась на 28 %. Еще одним примером успешной реализации инновационного проекта в Чеченской Республике является создание в 2017 году Регионального центра компетенций в области промышленной автоматизации. Данный центр занимается разработкой и внедрением современных систем автоматизации производственных процессов на промышленных предприятиях региона. По оценкам Министерства промышленности и энергетики Чеченской Республики, за время функционирования центра удалось повысить производительность труда на предприятиях – участниках проекта в среднем на 22 %. Кроме того, в последние годы в Чеченской Республике активно развивается сфера информационных технологий.

В 2019 году в Грозном был открыт инновационный IT-парк, на территории которого расположились более 30 компаний, специализирующихся на разработке программного обеспечения, мобильных приложений, систем искусственного интеллекта и др. По данным Министерства цифрового развития Чеченской Республики, за 2019–2021 гг. объем производства продукции и услуг IT-сектора вырос более чем в 2,5 раза, а количество высокотехнологичных рабочих мест увеличилось на 41 %[1].

Таблица 1. Основные показатели реализации инновационных проектов в Чеченской Республике за 2014–2024 гг.

Table 1. Key indicators for the implementation of innovative projects in the Chechen Republic for 2014–2024.

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Количество реализованных инновационных проектов, ед.	2	4	5	6	4	7	5	6	5	4	6
Объем инвестиций в инновационные проекты, млрд руб.	7,5	9,8	11,2	12,6	13,4	15,3	17,1	19,6	21,2	22,7	20,4
Прирост объема производства продукции и услуг, %	3,2	4,5	6,1	7,8	9,3	11,2	13,7	16,4	15,9	14,2	12,8
Прирост числа высокотехнологичных рабочих мест, %	2,1	3,4	4,8	6,7	8,1	10,3	12,9	15,7	17,4	19,1	14,6
Сокращение вредных выбросов, %	1,4	2,1	3,6	5,2	7,3	9,5	11,8	13,4	14,9	16,2	13,7

Источник: составлено автором

Как видно из таблицы 1, Чеченская Республика демонстрирует высокую инновационную активность, реализуя значительное число проектов, направленных на внедрение передовых технологических решений в различные отрасли региональной экономики. Количество реализованных инновационных проектов в регионе за анализируемый период увеличилось с 2 в 2014 году до 6 в 2024 году. При этом объем инвестиций в эти проекты вырос с 7,5 млрд рублей в 2014 году до 20,4 млрд рублей в 2024 году[2].

Реализация инновационных проектов оказала положительное влияние на основные социально-экономические и экологические показатели развития Чеченской Республики. Так, за 2014–2024 гг. прирост объема производства продукции и услуг в регионе увеличился с 3,2 % до 12,8 %, прирост числа высокотехнологичных рабочих мест – с 2,1 % до 14,6 %, а сокращение вредных выбросов – с 1,4 % до 13,7 %. Таким образом, Чеченская Республика демонстрирует высокую инновационную активность, реализуя значительное число проектов, направленных на внедрение передовых технологических решений в различные отрасли региональной экономики. Однако несмотря на впечатляющие количественные показатели, объективная оценка эффективности данных инновационных проектов до сих пор не проводилась[3].

[1]Официальный сайт Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Чеченской Республике https://95.rosstat.gov.ru, https://95.rosstat.gov.ru/folder/186788, https://95.rosstat.gov.ru/storage/mediabank, https://rosstat.gov.ru/statistics/science

[2]Там же

[3]Там же

Для комплексной оценки эффективности реализации инновационных проектов в Чеченской Республике нами была разработана авторская методика, учитывающая не только экономические, но и социальные, экологические и институциональные аспекты. В рамках экономической составляющей оценивались такие показатели, как объем привлеченных инвестиций, рост выручки предприятий-участников проектов, увеличение налоговых поступлений в бюджет, повышение производительности труда и др. Социальный блок включал в себя анализ влияния инновационных проектов на уровень занятости населения, динамику реальных денежных доходов, развитие социальной инфраструктуры. Экологический аспект предполагал оценку сокращения вредных выбросов, рационального использования природных ресурсов, внедрения «зеленых» технологий. Институциональная составляющая была направлена на выявление влияния качества регионального управления, уровня развития инновационной инфраструктуры, сотрудничества власти, бизнеса и науки на успешность реализации инновационных проектов. Проведенная оценка показала, что наиболее эффективными с точки зрения экономической, социальной, экологической и институциональной эффективности стали следующие инновационные проекты, реализованные в Чеченской Республике за последние 10 лет:

1. Создание агропромышленного кластера (2015–2021 гг.).
2. Запуск Регионального центра компетенций в области промышленной автоматизации (2017–2022 гг.).
3. Открытие IT-парка в Грозном (2019–2021 гг.).
4. Строительство ветроэнергетической станции мощностью 200 МВт (2018–2020 гг.).
5. Внедрение системы «Умный город» в Грозном (2019–2022 гг.)[4].

Так, создание агропромышленного кластера в Чеченской Республике позволило не только нарастить объемы сельскохозяйственного производства, но и повысить производительность труда в аграрном секторе, внедрить ресурсосберегающие и экологически чистые технологии. Кроме того, реализация данного проекта способствовала созданию более 2,5 тыс. новых рабочих мест, что оказало положительное влияние на социальную сферу региона.

Таблица 2. Оценка эффективности реализации ключевых инновационных проектов в Чеченской Республике

Table 2. Evaluation of the effectiveness of the implementation of key innovative projects in the Chechen Republic

Показатель	Агропромышленный кластер	Региональный центр компетенций	IT-парк	Ветроэнергетическая станция	Система «Умный город»
Экономическая эффективность					
Объем привлеченных инвестиций, млрд руб.	24,2	16,8	13,7	28,4	8,6
Рост выручки предприятий, %	37,1	22,4	27,2	18,6	14,3
Увеличение налоговых поступлений, %	28,5	19,1	22,8	16,5	12,8
Повышение производительности труда, %	26,7	22,1	19,4	11,3	13,6

[4]Официальный сайт Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Чеченской Республике https://95.rosstat.gov.ru, https://95.rosstat.gov.ru/folder/186788, https://95.rosstat.gov.ru/storage/mediabank, https://rosstat.gov.ru/statistics/science

Социальная эффективность					
Рост занятости населения, %	6,7	4,8	5,4	3,2	2,1
Увеличение реальных доходов, %	5,2	4,3	4,6	2,8	1,9
Развитие социальной инфраструктуры	Строительство 12 детских садов, 6 школ, 4 медицинских учреждений	Открытие 3 учебных центров по подготовке кадров	Создание 2 образовательных учреждений в IT-сфере	–	Реконструкция 6 социальных объектов
Экологическая эффективность					
Сокращение вредных выбросов, %	16,2	11,9	13,4	19,7	14,8
Рациональное использование ресурсов	Внедрение системы точного земледелия, переход на «зеленые» технологии	Модернизация оборудования, повышение энергоэффективности	Использование экологичных материалов	Производство чистой возобновляемой энергии	Оптимизация городской инфраструктуры
Институциональная эффективность					
Развитие инновационной инфраструктуры	Создание исследовательских центров, опытных производств	Открытие Регионального центра компетенций	Формирование IT-экосистемы	Создание инженерной инфраструктуры	Внедрение цифровых технологий управления городом
Взаимодействие власти, бизнеса и науки	Активное участие органов власти, АПК, научных организаций	Сотрудничество министерств, промышленных предприятий, вузов	Инициатива органов власти, взаимодействие с IT-компаниями	Совместные проекты министерств, энергетических компаний, научных центров	Участие муниципальных властей, IT-компаний, городского сообщества
Качество регионального управления	Эффективная координация, поддержка проектов на всех уровнях	Четкое распределение полномочий, оперативное реагирование на проблемы	Системный подход к развитию IT-сектора	Своевременное решение организационных и ресурсных вопросов	Комплексный характер программы «Умный город»

Источник: составлено автором

Запуск Регионального центра компетенций в области промышленной автоматизации в свою очередь способствовал повышению конкурентоспособности промышленных предприятий Чеченской Республики за счет роста производительности труда и снижения издержек. Кроме того, центр сыграл важную роль в подготовке высококвалифицированных кадров, необходимых для реализации инновационных проектов в регионе. Открытие IT-парка в Грозном позволило не только нарастить объемы производства высокотехнологичной продукции и услуг, но и создать порядка 700 новых высокооплачиваемых рабочих мест. Данный проект также оказал положительное влияние на развитие научно-образовательной инфраструктуры региона, способствуя подготовке специалистов в сфере информационных технологий. Строительство ветроэнергетической станции мощностью 200 МВт и внедрение системы «Умный город» в Грозном в свою очередь продемонстрировали высокую экологическую эффективность. Реализация этих проектов позволила сократить выбросы парниковых газов, рационально использовать природные ресурсы, а также повысить энергоэффективность и качество городской среды.

В целом результаты проведенной оценки подтверждают выдвинутую в начале исследования гипотезу о том, что комплексный анализ эффективности инновационных проектов в Чеченской Республике с учетом экономических, социальных, экологических и институциональных факторов позволяет выявить ключевые барьеры и драйверы инновационного развития региона.

Ключевыми факторами, определяющими высокую эффективность инновационных проектов в Чеченской Республике, являются:

1. Направленность на решение актуальных социально-экономических и экологических проблем региона. Успешные проекты, такие как агропромышленный кластер, ветроэнергетическая станция и система «Умный город», были нацелены на повышение производительности, создание новых рабочих мест, сокращение вредных выбросов, что способствовало комплексному развитию Чеченской Республики.

2. Наличие развитой инновационной инфраструктуры и системы подготовки кадров. Реализация проектов Регионального центра компетенций и IT-парка позволила сформировать необходимые компетенции и технологические заделы для внедрения инноваций в промышленности и IT-секторе региона [6].

3. Эффективное взаимодействие власти, бизнеса и научного сообщества. Все рассмотренные успешные инновационные проекты были основаны на тесном сотрудничестве органов государственной власти, предпринимательского сектора и научно-образовательных организаций Чеченской Республики.

4. Государственная поддержка инновационной деятельности. Реализация инновационных проектов в Чеченской Республике осуществлялась при активном участии и финансовой поддержке со стороны региональных и федеральных органов власти.

Вместе с тем в ходе исследования были выявлены и определенные барьеры, с которыми столкнулась реализация ряда инновационных проектов в Чеченской Республике:

1. Недостаточная проработка технико-экономических обоснований. Некоторые проекты страдали от неточных расчетов, завышенных прогнозов и недооценки рисков, что впоследствии вело к срывам сроков и перерасходу средств.

2. Отсутствие механизмов коммерциализации результатов. Ряд инновационных разработок, выполненных в рамках региональных проектов, так и не нашли своего применения в практической деятельности предприятий и организаций Чеченской Республики.

3. Слабое распространение информации об успешных практиках. Недостаточная информированность предпринимателей и населения региона об эффективных инновационных решениях, внедренных в различных отраслях, снижает возможности их тиражирования и масштабирования.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие рекомендации, направленные на повышение эффективности реализации инновационных проектов развития Чеченской Республики:

1. Разработать и внедрить систему регулярного мониторинга и комплексной оценки эффективности инновационных проектов в Чеченской Республике с использованием предложенной в исследовании методики.

2. Усилить межведомственную координацию и кооперацию органов власти, научно-образовательных организаций и бизнес-сообщества региона для обеспечения синергетического эффекта в реализации инновационных инициатив.

3. Расширить практику государственной поддержки инновационной деятельности в Чеченской Республике, в том числе путем предоставления грантов, субсидий, налоговых льгот и преференций.

4. Активизировать работу по развитию инновационной инфраструктуры региона, включая создание новых технопарков, бизнес-инкубаторов, центров трансфера технологий и др.

5. Уделить особое внимание подготовке высококвалифицированных кадров для реализации инновационных проектов, в том числе за счет расширения сотрудничества вузов и предприятий.

6. Обеспечить широкое информационное сопровождение успешных практик реализации инновационных проектов в Чеченской Республике для их дальнейшего распространения.

Реализация предложенных рекомендаций будет способствовать повышению эффективности инновационного развития Чеченской Республики, росту ее конкурентоспособности и улучшению социально-экономических и экологических показателей региона.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что Чеченская Республика характеризуется высокой инновационной активностью, динамично реализуя масштабные инвестиционные проекты в различных отраслях экономики. За последние 10 лет в регионе было реализовано более 50 крупных инновационных проектов общей стоимостью свыше 150 млрд рублей. Разработанная в рамках исследования авторская методика комплексной оценки эффективности инновационных проектов в Чеченской Республике показала, что наиболее успешными стали проекты, направленные на решение актуальных социально-экономических и экологических проблем региона, использующие развитую инновационную инфраструктуру и опирающиеся на эффективное взаимодействие власти, бизнеса и науки при активной государственной поддержке. Вместе с тем реализация ряда инновационных проектов в Чеченской Республике столкнулась с определенными барьерами, связанными с недостаточной проработкой технико-экономических обоснований, отсутствием механизмов коммерциализации результатов, слабым распространением информации об успешных практиках.

Предложенные в исследовании рекомендации, направленные на совершенствование системы мониторинга и оценки эффективности инновационных проектов, развитие инновационной инфраструктуры, подготовку кадров и информационное сопровождение, будут способствовать повышению эффективности инновационного развития Чеченской Республики. Результаты проведенного анализа могут быть использованы органами государственной власти региона при принятии управленческих решений, направленных на повышение эффективности реализации инновационных проектов, а также при разработке и корректировке государственных программ, стратегий и концепций инновационного развития Чеченской Республики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агеев Д. В., Преображенский Ю. П.* О возможностях развития инноваций в регионах // Экономическая безопасность: правовые, экономические, экологические аспекты: Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции, Курск, 8 апреля 2022 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 19–21. EDN: PPVGLS

2. *Агеев Д. В., Преображенский Ю. П.* О проблемах развития инноваций в регионах // Юность и знания – гарантия успеха: Сб. научных статей IX Международной молодежной научной конференции: в 3 т. Курск, 15–16 сентября 2022 года. Том 1. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 9–12. EDN: JMLYVQ

3. *Гурьянов Д. В.,* Таймасов А. Р. Региональная инновационная политика и ее совершенствование в Российской Федерации // Диссеминация инновационного опыта как фактор модернизации науки и образования: Сб. статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 23 декабря 2021 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2021. С. 16–21. EDN: BOPGGG

4. *Лизунов В. В.* Инновационное развитие регионов как единства территориальных и производственных систем // Национальные приоритеты России. 2021. № 2(41). С. 55–63. EDN: UHHQUB

5. *Павленко С. Н.* Развитие инновационной инфраструктуры в регионах // Формирование и реализация стратегии устойчивого экономического развития Российской Федерации: Сборник статей XII Международной научно-практической конференции, Пенза, 9–10 декабря 2022 года / Под научной редакцией В. Н. Лазарева, Б. Я. Татарских. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. С. 296–302. EDN: ZATITJ

6. *Орлова А. И., Вельгош Н. З.* Инновационное развитие регионов в условиях цифровой экономики // Цифровой контент социального и экосистемного развития экономики: Сборник трудов международной научно-практической конференции, Симферополь, 8 ноября 2022 года. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, 2022. С. 514–516. EDN FELKZI

REFERENCES

1. Ageev D.V., Preobrazhensky Yu.P. On the possibilities of innovation development in the regions // *Economic security: legal, economic, environmental aspects*: Collection of scientific articles of the VII International Scientific and Practical Conference, Kursk, April 08, 2022. Kursk: South-West State University, 2022. Pp. 19–21. EDN: PPVGLS. (In Russian)

2. Ageev D.V., Preobrazhensky Yu.P. About the problems of innovation development in the regions. *Youth and knowledge – a guarantee of success*: Collection of scientific articles of the IX International Youth Scientific Conference: in 3 vol. 3. Kursk, September 15–16, 2022. Vol. 1. Kursk: South-West State University, 2022. Pp. 9–12. EDN: JMLYVQ. (In Russian)

3. Guryanov D.V., Taymasov A.R. Regional innovation policy and its improvement in the Russian Federation. *Dissemination of innovative experience as a factor of modernization of science and education*: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Petrozavodsk, December 23, 2021. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership “New Science”, 2021. Pp. 16–21. EDN: BOPGGG. (In Russian)

4. Lizunov V.V. Innovative development of regions as a unity of territorial and production systems. *National priorities of Russia*. 2021. No. 2(41). Pp. 55–63. EDN: UHHQUB. (In Russian)

5. Pavlenko S.N. Development of innovation infrastructure in the regions. *Formation and implementation of the strategy of sustainable economic development of the Russian Federation*: Collection of articles of the XII International Scientific and Practical Conference, Penza, December 09-10, 2022. Under the scientific editorship of V.N. Lazarev, B.Y. Tatarskikh. Penza: Penza State Agrarian University, 2022. C. 296–302. EDN: ZATITJ. (In Russian)

6. Orlova A.I., Velgosh N.Z. Innovative development of regions in the digital economy. *Digital content of social and ecosystem development of the economy*: Collection of Papers of the international scientific and practical conference, Simferopol, November 08, 2022. Simferopol: V.I. Vernadsky Crimean Federal University. V.I. Vernadsky, 2022. C. 514–516. EDN: FELKZI. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Магомаев Тамирлан Рамзанович, ст. преподаватель кафедры «Информационные системы в экономике», зам. директора по очной форме обучения Института цифровой экономики и технологического предпринимательства, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364024, Россия, г. Грозный, пр-т Х. А. Исаева, 100;

medici86@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5817-4191, SPIN-код: 7265-2611

Information about the author

Tamirlan R. Magomayev, Senior Teacher, Department of Information Systems in Economics, Deputy Director for Full-time Education, Institute of Digital Economy and Technological Entrepreneurship, GGNTU named after Academician M.D. Millionshchikov;

364024, Russia, Grozny, 100 Isaev avenue;

medici86@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5817-4191, SPIN-code: 7265-2611

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 332. 05 Аналитическая статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-326-343
EDN: XJETFK

Тенденции, проблемы и перспективы современного этапа развития венчурной «экосистемы»

М. В. Жанокова[✉1], С. А. Махошева[1], Э. М. Жаноков[2]

[1]Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а
[2]Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова
360030, Россия, Нальчик, пр-т Ленина, 1в

Аннотация. Неустойчивость венчурной «экосистемы» присуща любой мировой стране в той или иной степени вне зависимости от уровня развития венчурной индустрии. Самым важным условием работы на исследуемом рынке является снижение скорости адаптации «игроков» к трансформационным процессам во внутренней и внешней среде. Следовательно, исследование современных трендов развития венчурного рынка, выявление угроз и стратегических перспектив является всегда актуальной задачей. Цель представленного исследования заключается в анализе современных трендов развития венчурной «экосистемы» в глобальном и российском масштабах, выявлении базовых проблем для объективной оценки стратегических перспектив развития российского высокотехнологического бизнеса. Для достижения цели в работе использовались следующие методы: экспертная оценка, сравнительный анализ, релевантная оценка статистических данных, полевые исследования и др. По итогам исследования определены основные угрозы и базовые проблемы венчурной индустрии страны, которые в перспективе могут стать сдерживающим фактором развития институциональных основ инновационной среды в стране и в ее территориальных социально-экономических образованиях. Результаты работы позволят проследить современную динамику и потенциал развития глобальной и российской венчурной «экосистем», оценить возможности адаптации новых моделей взаимодействия и инструментов инвестирования в российских реалиях.

Ключевые слова: регион, региональная экономика, венчурный фонд, бизнес-ангелы, стартап, фаундер, инвестиционные инструменты, венчурная индустрия.

Поступила 15.10.2024, одобрена после рецензирования 11.11.2024, принята к публикации 29.11.2024

Для цитирования. Жанокова М. В., Махошева С. А., Жаноков Э. М. Тенденции, проблемы и перспективы современного этапа развития венчурной «экосистемы» // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 326–343. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-326-343

Analytical article

Trends, problems and prospects of current development of venture “ecosystem”

M.V. Zhanokova[✉1], S.A. Makhosheva[1], E.M. Zhanokov[2]

[1]Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street
[2]Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov
360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue

© Жанокова М. В., Махошева С. А., Жаноков Э. М., 2024

Abstract. Instability of venture ecosystem is inherent in any global country to one degree or another, regardless of the level of development of venture industry. The most important condition for working in the market under study is to reduce the speed of adaptation of "players" to transformational processes in the internal and external environment. Therefore, the study of current trends in the development of the venture capital market, the identification of threats and strategic prospects is always relevant. The purpose of the presented research is to analyze current trends in the development of the venture ecosystem on a global and Russian scale, identify basic problems for an objective assessment of the strategic prospects for the development of Russian high-tech business. To achieve the goal, the following methods were used in the work: expert assessment, comparative analysis, relevant assessment of statistical data, field research, etc. Based on the results of the study, the main threats and basic problems of the country venture industry have been identified, which in the future may become a deterrent to the development of the institutional foundations of the innovation environment in the country and in its territorial socio-economic entities. The results of the work will allow us to trace the current dynamics and development potential of the global and Russian venture ecosystems, to assess the possibilities of adapting new models of interaction and investment tools in Russian realities.

Keywords: region, regional economy, venture fund, business angels, startup, flounder, investment tools, venture industry

Submitted 15.10.2024, approved after reviewing 11.11.2024, accepted for publication 29.11.2024

For citation. Zhanokova M.V., Makhosheva S.A., Zhanokov E.M. Trends, problems and prospects of current development of venture “ecosystem”. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 326–343. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-326-343

Введение

Венчурная система является важнейшей частью инновационной системы любой страны. Венчурные фонды, аккумулируя капитал инвесторов, являются источником финансирования высокотехнологичных проектов, характеризующихся максимальными рисками инвестиционных портфелей, то есть способствуют превращению инновационных идей в успешные компании со сверхдоходами. Ряд проблем, связанных с разрывом в размерах капитала между российской и мировыми венчурными экосистемами развитых стран, санкциями «недружественных» государств по отношению к РФ, способствующими появлению нового комплекса нерыночных проблем, несовершенством внутрироссийского законодательства в части инноваций и инновационного развития, отсутствием необходимых институциональных элементов российской инновационной системы и др., в значительной степени препятствуют устойчивому развитию венчурной индустрии страны. Исследование сложившихся мировых и внутрироссийский трендов позволяет оценить перспективы развития венчурного рынка и определить ориентиры выхода из состояния кризиса, нацеленные на обеспечение социально-экономической безопасности РФ и импортозамещение в сфере высоких технологий.

Цель исследования – анализ современных трендов развития венчурной «экосистемы» в глобальном и российском масштабах, выявление базовых проблем для объективной оценки стратегических перспектив развития российского высокотехнологического бизнеса.

Для достижения цели работы последовательно решены следующие *задачи*:

- проанализированы основные проблемы, связанные с последствиями пандемии 2019 г., спровоцировавшие новые рыночные угрозы и возможности для перспективного развития глобальной и российской венчурной «экосистем»;
- определены главные тренды развития российской венчурной «экосистемы», связанные с последствиями проведения специальной военной операции;

- исследованы факторы, влияющие на выбор венчурными фондами стартапов для финансирования;
- представлены параметры успешности и эффективности деятельности венчурных фондов, выявлены фундаментальные проблемы их развития;
- исследованы новые инструменты инвестирования и инновационные схемы привлечения финансов в стартапы, актуальные для современного этапа развития венчурной индустрии.

Методы исследования, использованные в работе: экспертная оценка (анализ интервью ведущих участников венчурной системы РФ и других стран); сравнительный анализ страновых венчурных «экосистем»; релевантная оценка статистических данных, представленных в мировых и российской базах информации; полевые исследования, в том числе опрос мнений стартаперов, инвесторов, работников коммерческих банков, представителей государственных структур, функционирующих на территории РФ, по проблемам финансово-экономического регулирования в стране,

Практическая значимость результатов исследования связана с тем, что они могут быть использованы разработчиками инновационных идей, учредителями венчурных фондов и другими участниками российского венчурного рынка для понимания сложившихся трендов и определения стратегии собственного «поведения» на рынке.

Результаты исследования

По мнению ряда аналитических агентств, глобальный венчурный рынок на современном этапе своего развития составляет порядка 30-35 тыс. сделок в год. В цифровом выражении это более 300 млрд долл. В соответствии с отчетом международной аналитической компании Venture Pulse[1] в течение 2023 г. лидером на глобальном венчурном рынке по количеству сделок стали: Северная Америка с долей рынка около 55 %; страны Европейского союза с рыночной долей порядка 22 %; Азиатско-Тихоокеанский регион с рыночной долей около 19 %. Тенденции на рынке глобального венчура характеризуются наращиванием оборотов привлекаемых инвестиций западноевропейскими странами более чем в два раза за последние несколько лет, причем преимущественно за счет внешних, а не внутренних инвесторов.

Глобальная пандемия, начавшаяся в 2019 г., внесла существенные корректировки в работу венчурного рынка. И у фаундеров стартапов, и у инвесторов появились иные паттерны поведения, связанные с адаптацией к новым рыночным реалиям, появлением ранее не имевших место вызовов, угроз и перспектив развития венчурного рынка. Компании поменяли свое представление относительно автоматизации производственных процессов, осуществления деятельности удаленными и распределенными командами. Население также поменяло паттерны поведения, отдавая предпочтение онлайн-покупкам, доставкам на дом и т.п.

Оценивая последствия глобальной пандемии, можно утверждать, что в первую очередь пострадали стартапы в туристической сфере, в сферах пассажирских и грузоперевозок. Такие стартапы были вынуждены снизить оценку собственных компаний на 30–60 % для привлечения венчурных инвесторов. Стартапы в сфере телемедицины, онлайн-торговли, мобильной торговли, разработчики сервисов для работы из дома, разработчи-

[1]Global Venture Funding In Q1 2024 Shows Startup Investors Remain Cautious. [Электронный ресурс] // URL: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2024/04/venture-pulse-q1-2024.pdf (дата обращения: 01.08.2024 г.).

ки домашних онлайн-развлечений и некоторые другие, напротив, повысили свою привлекательность для венчурных фондов, что отразилось на росте стоимости таких компаний в десятки раз. Однако и здесь появились свои проблемы, связанные со значительным ужесточением конкуренции на рынке.

Последствия пандемии также отразились и на режиме работы венчурных фондов, их доходах. Немногие инвесторы были готовы к капиталовложениям, не имея возможности общения с фаундерами стартапов вживую, лишь исключительно малое количество венчурных фондов (менее 20 %) принимало решение о финансировании по итогам видеоконференций. У учредителей венчурных фондов появилось четкое представление о необходимости создания наличного денежного резерва на период от 20 до 24 месяцев вместо ранее создаваемых запасов денежной наличности, которых хватало на период от 10 до 12 месяцев, так как стартапы, ранее профинансированные венчурным фондом, в условиях кризиса стали непривлекательными на следующих раундах для новых инвесторов и «требовали» финансовой поддержки.

Многие стартапы, которые в этот период вели переговоры с венчурными фондами, стали непривлекательными для последних либо снизили свою оценочную стоимость, чтобы не потерять возможность для развития последующих раундов. Последствием этого является крайне существенное размывание долей фаундеров и инвесторов ранних стадий финансирования стартапов в настоящее время, что снижает их привлекательность для венчурных фондов и вынуждает опять идти на уменьшение рыночной стоимости более поздних раундов (C-D). Положительная сторона для венчурных фондов в сложившейся ситуации заключается в возможности участия в раундах топовых стартапов, которые были вынуждены снизить свою оценочную стоимость в разы.

Изменения коснулись и приоритетных для инвесторов отраслей финансирования, в частности, зафиксирован рост инвестиций в smart-технологии, дистанционное образование, телемедицину и др., которые могут предоставить возможности для удаленной работы.

Одна из наиболее актуальных проблем для стартапов в процессе привлечения венчуров – это недостаток капитала для финансирования «ранних» раундов, так как они характеризуются максимальными рисками невозврата инвестиций. Тенденции последних лет на мировом венчурном рынке отражают устойчивый рост вложений в крупные, более надежные технологические проекты, которые, как правило, соответствуют более поздним раундам развития стартапов (рис. 1).

Крупные венчурные фонды, занимающие лидирующие позиции на глобальном венчурном рынке, начали проявлять осторожность и экономить на финансировании компаний, отдельные фонды полностью перестали осуществлять инвестирование локальных проектов. Об этом свидетельствуют объемы накопленных резервов неинвестированной наличности венчурных фондов большинства развитых стран мира. Так, венчурными фондами США к началу 2024 г. было накоплено выше 300 млрд долл. США[2], что связано со стремлением компаний к инвестированию крупных (менее рискованных) проектов либо поддержкой портфельных проектов. Также наблюдалось снижение среднего чека инвестирования высокотехнологичных проектов с 3,05 до 0,47 млн долл. США.

[2]Не до конкуренции: почему венчурные фонды будут чаще инвестировать вместе с ангелами. [Электронный ресурс] // URL: https://www.forbes.ru/svoi-biznes/508464-ne-do-konkurencii-pocemu-vencurnye-fondy-budut-case-investirovat-vmeste-s-angelami (дата обращения: 10.07.2024 г.).

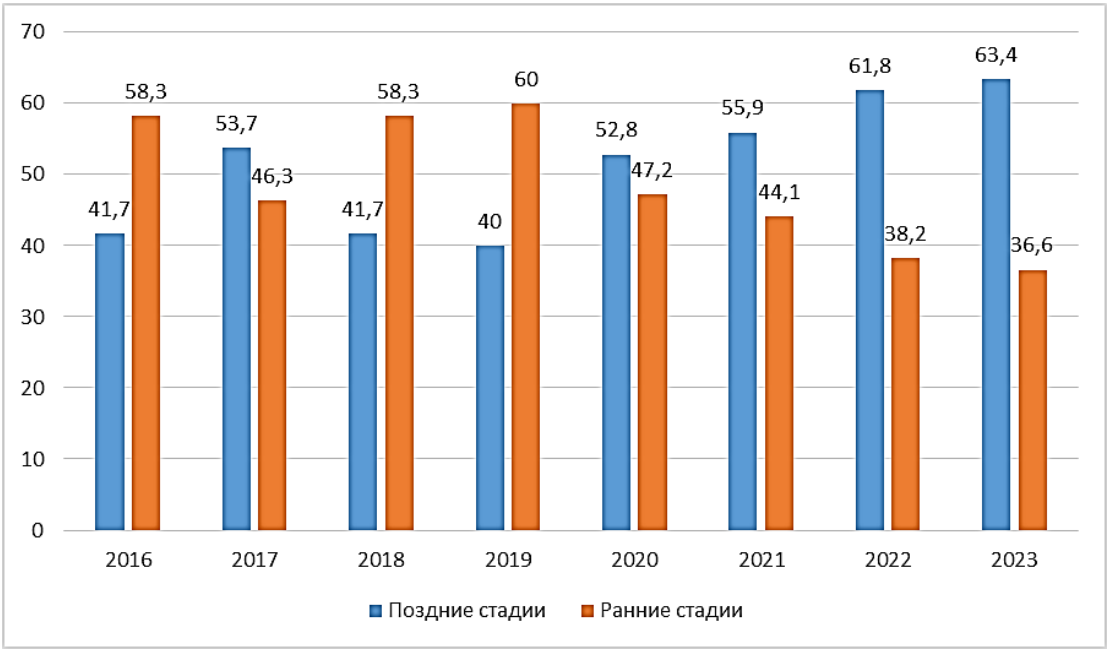


Рис. 1. *Статистика финансирования раундов высокотехнологичных проектов в масштабах глобального венчурного рынка в 2016-2023 гг., %*[3]

Fig. 1. *Statistics of financing rounds of high-tech projects on the scale of the global venture market in 2016-2023, %*

Еще одна тенденция венчурного рынка – это появившаяся доступность крупных венчурных фондов для вкладчиков с «малыми» финансовыми ресурсами, которые осуществляют вложения в стартапы через посредников – синдикаты. Последние вкладываются в стартапы совместно с малыми фондами, которые в свою очередь решают собственную актуальную проблему, связанную с недоступностью капитала. Данная схема, обретая популярность, позволяет стартапам решить насущную проблему, связанную с привлечением инвестиций на ранних раундах финансирования.

Наблюдается рост активности взаимодействия венчурных фондов с бизнес-ангелами в процессе финансирования стартапов, то есть появление партнерских отношений с сообществами инвесторов, бизнес-ангелами. Если ранее существовавшая модель финансирования стартапов, получившая начало в 80-90-е гг. 20-го столетия в развитых странах Европы и США, характеризовалась закрытостью привлечения инвестиций от крупных рыночных фондов и линейно-централизованной системой принятия управленческих решений топ-менеджерами крупных венчурных компаний совместно с фаундерами стартапов, то современные реалии таковы, что процесс инвестирования в технологические инновации стал более доступным для частных инвесторов – бизнес-ангелов.

Начиная с 2010 г. в США начали создаваться сообщества бизнес-ангелов, которые путем совместных «усилий» – объединения инвестиций, стали формировать небольшие фонды в целях финансирования стартапов на ранних раундах. В самом начале такие сообщества имели не более 100 участников, но постепенно они трансформировались в онлайн-платформы с целью объединения капитала и создания фондов финансирования технологических новшеств, что стимулировало появление определенной конкуренции между

[3]Global Venture Funding Through The Pandemic, Late-Stage Stays Strong ugh-the-pandemic-late-stage. [Электронный ресурс] // URL: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2024/04/venture-pulse-q1-2024.pdf (дата обращения: 12.08.2024 г.).

инвесторами венчурного рынка и предоставило дополнительные возможности привлечения средств для фаундеров стартапов. Это также открыло возможности для объединения капитала крупных венчурных фондов и частных инвесторов в процессе софинансирования инновационных проектов по схеме 50/50. Сообщества бизнес-ангелов стали таким образом генераторами доходов для многих крупных венчурных фондов на современном этапе их развития, более того последние выступают уже инициаторами создания клубов, предлагая бизнес-ангелам синдикатные проекты с фаундерами технологических новаций, проекты которых инвестируются и самим венчурным фондом.

Создание клубов бизнес-ангелов имеет преимущество еще и в том, что по отдельности такие инвесторы могут не обладать необходимым опытом и экспертностью в процессе выбора компании для финансирования, что повышает рискованность результатов сделки. Обеспечить комплексную оценку рисков сделки им не под силу, и данную задачу может решить привлечение в инвестиционный проект венчурного фонда, который обладает гораздо большими ресурсами и экспертностью в данном вопросе, что предоставит в дальнейшем возможность для «стабилизации» риск-портфеля всего синдиката.

В самом синдикате также нередки случаи конфликта интересов между его участниками, когда один из бизнес-ангелов осуществляет вложение в сделку небольшой суммы и выказывает стремление ее «отбить» с помощью комиссии, аккумулируемой за счет средств других бизнес-ангелов, участвующих в соинвестировании, следовательно, изначально такой участник синдиката несет наименьшие риски путем использования финансового капитала других инвесторов проекта. Для «стабилизации» риск-портфеля синдиката в таких случаях также выгодно сотрудничать с венчурными фондами, которые, как правило, инвестируя намного больше собственного финансового капитала, нежели возможности заработка на комиссии, практически полностью берут риски, связанные со сделкой, на себя (рис. 2).

Рис. 2. *«Демократичная» модель управления финансированием высокотехнологичных проектов (составлено автором)*

Fig. 2. *Democratic model of managing the financing of high-tech projects (compiled by the author)*

Анализируя инновационные проекты, продвигаемые за счет коллаборации венчурных фондов, сообществ бизнес-ангелов и фаундеров технологических новаций, можно сделать заключение о явном преимуществе финансирования ранних раундов продвижения стартапов, где «конкуренция» за проект менее жесткая среди потенциальных инвесторов, так как эти стадии характеризуются наличием максимальных рисков. Однако в перспективе, возможно, что клубы бизнес-ангелов могут стать инвесторами и более поздних раундов финансирования стартапов, открывая последним дополнительные

возможности для выбора венчуров, тем самым предоставляя потенциал для более высокой оценки стоимости бизнеса.

Для венчурных фондов такого рода коллаборации также имеют ряд выгод:

- позволяют снижать риски инвестирования ранних раундов технологических новаций путем софинансирования;
- служат PR-инструментом для привлечения потенциальных партнеров;
- служат возможностью для компенсации собственных затрат за счет комиссии, уплачиваемой бизнес-ангелами, взамен на предоставляемую ими возможность софинансирования сделки либо за успешность конечного результата.

Коллаборация венчурных фондов, сообществ бизнес-ангелов и фаундеров технологических новаций привлекательна для всех участников данной схемы еще и тем, что в них нет государственных инвестиций (грантов, финансов государственных фондов и т.д.), наличие которых в перспективе может «помешать» стартапам выйти на иностранный рынок и сопряжено с необходимостью предоставления длительной отчетности о результатах работы.

Венчурная система РФ, несмотря на преодоление первоначального этапа своего становления и реализацию целого комплекса правительственных инициатив, благоприятствующих развитию венчурного инвестирования[4], находится в состоянии системного кризиса ввиду множества внутренних и внешних проблем.

Начиная с 2022 г. наблюдается резкое снижение объемов венчурного финансирования, нежели в других развитых мировых странах и постепенный откат в состояние глубокого кризиса. «Без надлежащего финансового обеспечения венчурная деятельность замирает и развиваться априори не может» [7]. Проблемы неразвитости российского фондового рынка и недостаточной степени капитализации банковского сектора, приводящие к дефициту финансовых ресурсов для инвестирования внутри страны, в предыдущие годы решались в РФ в том числе путем привлечения капитала иностранных венчурных фондов и частных лиц [8, с. 950]. Сегодня значительная доля иностранного капитала стала недоступной для российских высокотехнологичных проектов, что является следствием дефицита их финансирования (рис. 3).

Эффективность развития венчурной индустрии обусловлена в равной степени политическим, общеэкономическим и институциональным влиянием. В связи с этим в период «напряженной» геополитической обстановки вокруг РФ политический аспект выдвигается на первый план, препятствуя благоприятному течению событий в процессе взаимодействия с зарубежными партнерами даже при условии совершенствования внутристрановых законодательных и институциональных основ функционирования венчурного рынка и наличия стимулирующих финансово-экономических аспектов.

В 2023 г. в сравнении с 2022 г. объемы инвестирования высокотехнологичных проектов венчурными фондами сократились на 80 %, в цифрах: с 420 млн долл. США до 84 млн долл. США. Для сравнения: в 2021 г. объемы инвестирования венчурных фондов в РФ составляли 2 млрд долл. США (рис. 4)[5].

[4]Федеральный закон от 29.11.2001 № 156-ФЗ (ред. от 08.08.2024 г.) «Об инвестиционных фондах» // Собрание законодательства Российской Федерации от 3 декабря 2001 г. № 49 ст. 4562.

[5]Исследование Dsight «Венчурная Евразия 2023». [Электронный ресурс] // URL: https://dsight.ru/venchureu23 (дата обращения: 22.09.2024 г.).

Рис. 3. *Современные возможности финансирования высокотехнологичных проектов в РФ*[6]

Fig. 3. *Modern possibilities of financing high-tech projects in the Russian Federation*

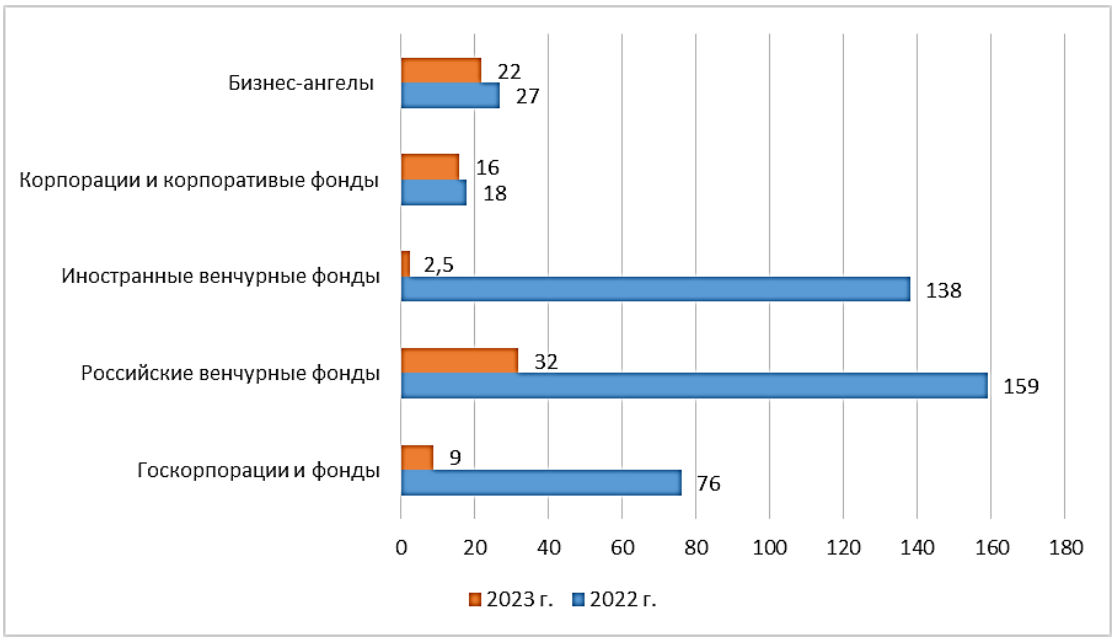


Рис. 4. *Венчурное финансирование в РФ в 2022–2023 гг., млн. долл. США*[7]

Fig. 4. *Venture financing in the Russian Federation in 2022–2023, USD million*

[6]Финансирование инновационных компаний – венчурные фонды и бизнес-ангелы [Электронный ресурс] // URL: https://cdn.slideserve.com/cecil/4725166 (дата обращения: 04.09.2024 г.).

[7]Венчурная Россия. Результаты 2023 года [Электронный ресурс] // URL: https://dsight.ru/company/studies-publications/VR2021.pdf (Дата обращения: 01.02.2024).

Наблюдается и позитивная тенденция роста числа сделок стартапов с инвесторами со 147 в 2022 г. до 176 в 2023 г., что свидетельствует о постепенном выходе венчурной экосистемы страны из состояния кризиса, связанном с появлением к началу 2023 г. возможности экспертного прогнозирования динамики исследуемого рынка на среднесрочную перспективу (рис. 5).

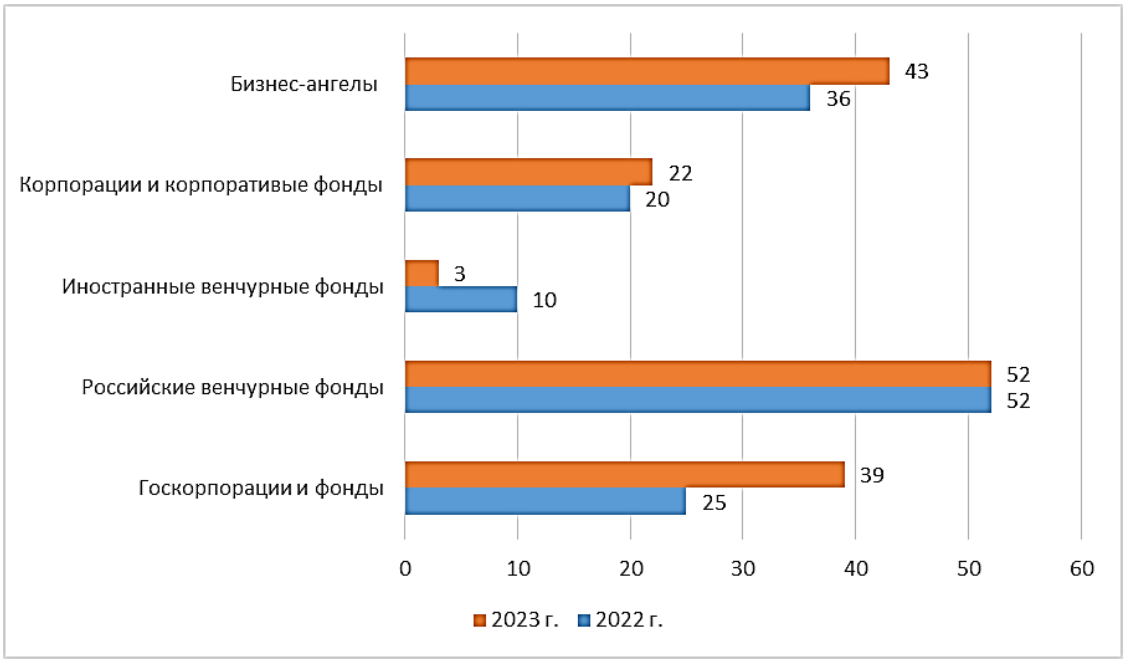


Рис. 5. *Общее число совместных сделок стартапов с инвесторами в РФ в 2022–2023 гг.*[8]

Fig. 5. *Total number of joint deals between startups and investors in the Russian Federation in 2022–2023*

Как видим из рис. 5, наиболее активными участниками сделок со стартапами в РФ стали частные венчурные фонды и бизнес-ангелы, доля последних в общем объеме финансирования составила около 20%. Государственные фонды также наращивают обороты участия в финансировании стартапов, о чем свидетельствует увеличение числа сделок с 25 в 2022 г. до 39 в 2023 г. Каждый четвертый стартап в нашей стране финансируется за счет государственных инвестиций, однако сумма, выделяемая государством на продвижение высокотехнологичных проектов, минимальна в сравнении с капиталом других инвесторов венчурного рынка, объемы финансирования которых выше в разы. Санкции «недружественных» стран отразились на числе сделок с иностранными фондами, их количество сократилось в 2023 г. в сравнении с 2022 г. на 70%[9].

Относительно стадий жизненного цикла стартапов в РФ наблюдаются следующие тенденции:[10]

[8]см. там же

[9]Инвестиции в стартапы и развитие венчура в условиях новой реальности: что делать? [Электронный ресурс] // URL: https://www.skolkovo.ru/expert-opinions/investicii-v-startapy-i-razvitie-venchura-v-usloviyah-novoj-realnosti-chto-delat/ (Дата обращения: 13.06.2024).

[10]Венчурная Россия. Результаты 2023 года [Электронный ресурс] // URL: https://dsight.ru/company/studies-publications/VR2021.pdf (Дата обращения: 01.02.2024). Венчурная Россия. Результаты 2022 года. [Электронный ресурс] // URL: https://dsight.ru/company/studies-publications/VR2023.pdf (Дата обращения: 15.01.2024).

➢ менее жизнеспособными после введения санкций против РФ оказались проекты в поздней стадии развития. Общая сумма сделок по таким проектам в 2023 г. составила 13 млн долл. США. Некоторая часть стартапов в поздней стадии сменила локацию бизнеса, другая часть закрыла компании. Возникшие финансовые проблемы не позволили компаниям аккумулировать средства инвесторов в очередной инвестиционный раунд, что привело к необходимости прекращения их работы;

➢ доля сделок с высокотехнологичными проектами на ранней стадии также сократилась на 13 % в сравнении с предыдущим годом. Общая сумма сделок по таким проектам в 2023 г. составила 32 млн долл. США;

➢ более жизнеспособными оказались высокотехнологичные проекты посевных стадий, доля которых в 2023 г. возросла на 8 % в сравнении с прошлым годом и суммарно составила 39 млн долл. США.

В целях «спасения» собственного бизнеса российскими фаундерами стартапов в более зрелых стадиях развития были предприняты попытки привлечения иностранных фондов, для чего они презентовали свои проекты в странах Латинской Америки и Юго-Восточной Азии. Однако культурная, управленческая и законодательная «несовместимость» бизнеса, напряженная геополитическая обстановка, сложившаяся в стране, не позволили им реализовать намеченные цели.

Тренд к импортозамещению в РФ проявился и в выборе венчурными фондами проектов для финансирования. Наиболее привлекательными для инвесторов стали высокие технологии в сфере медицины и здравоохранения, а также стартапы разработчиков программного обеспечения для b2b-сектора.

Главные факторы непривлекательности российских стартапов для внутренних и внешних венчуров в современных реалиях таковы:

➢ политические факторы – санкции со стороны «недружественных» по отношению к России государств, геополитическая «изоляция» [5, с. 25], страх инвесторов из стран-партнеров России перед последующими санкциями;

➢ законодательные барьеры и противоречия, связанные с отсутствием эффективной системы защиты прав интеллектуальной собственности на территории РФ, определением и распределением рисков высокотехнологичных проектов;

➢ неготовность стартапов к выходу на рынок, очень малая доля стартапов находится на стадии малого промышленного производства, как правило, деньги у основателей заканчиваются на стадии НИОКР, следствием чего являются высокие риски дальнейших вложений;

➢ неспособность российских технологических стартапов конкурировать с аналогами других развитых государств, характеризующихся сверхдоходностью, выходом на биржевой рынок;

➢ существенная размытость доли бизнеса на ранних и более поздних этапах развития стартапов;

➢ нежелание фаундеров создавать команды для продвижения стартапов вследствие неуверенности в защите прав интеллектуальной собственности, приводящее к снижению экспертности в вопросах развития каждого последующего раунда;

➢ участие государственных финансов (в форме государственной поддержки) на начальных раундах развития стартапов, впоследствии приводящее к необходимости предоставления целого комплекса отчетов о результатах деятельности, отнимающих время, силы и энергию у фаундеров и венчурных фондов, которые присоединились к участию в стартапе на более поздних раундах.

Современные реалии таковы, что даже для российских венчурных фондов российские стартапы менее привлекательны, нежели зарубежные, что смещает фокус венчура

на трансграничное инвестирование, несмотря на комплекс «барьеров», возникающих в процессе такой сделки.

Для крупных российских корпораций с государственным участием стартапы мало интересны, так как они и так монополизировали рынок и имеют сверхдоходы, следовательно, к трансформации собственного бизнеса за счет внедрения инновационных технологий они активно не стремятся. Другие крупные российские инвесторы считают по ряду причин более привлекательными иностранные стартапы и реинвестируют в иностранные высокотехнологичные проекты. Перечисленные факторы отражаются крайне негативно на уровне спроса на результаты инновационной деятельности внутри РФ. Дефицит финансирования и отсутствие спроса на готовые инновационные товары и услуги со стороны частных инвесторов внутри страны снижают стимулы фаундеров для развития в пределах РФ, провоцируя их на изменение локации собственного бизнеса, однако и это так же труднореализуемая задача в «санкционный» период.

Российские стартапы сегодня находятся в крайне сложном положении: с одной стороны, они не имеют возможностей для эффективного развития внутри страны, с другой стороны, даже при наличии успешной идеи они сталкиваются с рядом бюрократических и политических барьеров, мешающих им релоцировать бизнес на территорию другого государства[11].

Венчурный капитал – это такой вид капитала, который инвестируется в условиях крайне высокой степени неопределенности. Неустойчивость венчурной экосистемы присуща любой мировой стране в той или иной степени. Даже Кремневой долине с, казалось бы, самой развитой венчурной системой присущи определенные риски, связанные, например, с финансированием исключительно «оригинальных» стартапов, с крайне высокой конкурентоспособностью, тогда как остальные стартапы, которые могли бы стать привлекательными для венчурных фондов других стран, могут остаться без внимания и окажутся в числе неуспешных.

Российские стартапы вынуждены работать в условиях крайне высоких рисков привлекательности проектов для внутренних и зарубежных венчуров. В этой связи целесообразно в целях нивелирования негативного влияния рисков на движение стартапов и их компенсации акцентировать внимание на повышении доходности стартапов. По мнению ряда аналитиков рынка, до момента снижения политической напряженности вокруг РФ в сложившихся турбулентных российских реалиях потенциалом для коммерциализации высокотехнологичных проектов и вывода их на рынок будут обладать исключительно масштабные корпорации, которые вытеснят с рынка небольшие стартапы. Это создает неблагоприятные с точки зрения стратегии инновационного развития РФ тренды, связанные со сменой локации, оттоком инвестиционно привлекательных стартапов и талантливой молодежи из РФ в страны ЕС, США, Турцию, ОАЭ и др., где у них есть возможности для привлечения дефицитных на территории страны финансовых ресурсов в последующие раунды, однако это сопровождается зачастую потерей (размыванием) фаундерами долей в стартапе либо занижением их реальной стоимости.

Исследование позволило сделать заключение о полной неготовности венчурной индустрии РФ к сложившимся неблагоприятным социо-экономико-политическим трансформациям, что усугубило и ранее характерные для данной сферы институционально-функциональные проблемы (рис. 6).

[11]Основные направления развития финансового рынка Российской Федерации на 2024 год и период 2025 и 2026 годов (Проект от 27.10.2023). Банк России, 2023 [Электронный ресурс] // URL: https://cbr.ru/Content/Document /File/155957/onrfr_2024-26.pdf. (дата обращения: 01.09.2024 г.).

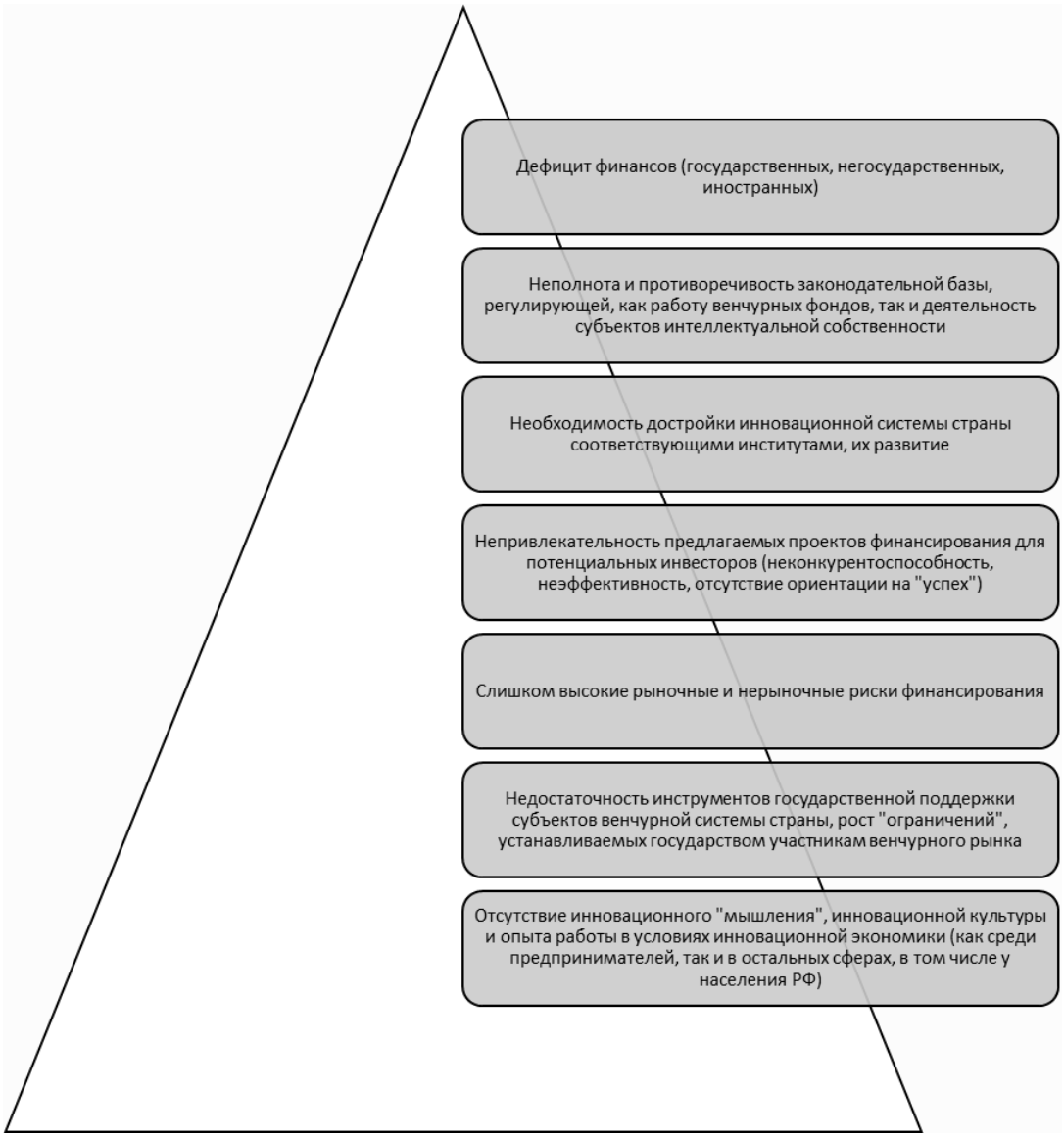


Рис. 6. *Фундаментальные проблемы развития венчурной системы РФ на современном этапе (составлено автором)*

Fig. 6. *Fundamental problems of current development of the venture system in the Russian Federation (compiled by the author)*

Выйти из «застоя» возможно только путем фундаментальных системных преобразований, и понимание этого должно быть в первую очередь у представителей законодательной и исполнительной власти, принимающих решения в финансово-экономической сфере страны[12]. В противном случае будущего у венчурного рынка в нашей стране вообще может и не быть.

Аналитики венчурного рынка определили факторы, которые влияют на мнение инвесторов при выборе проекта для осуществления капиталовложений на современном этапе развития венчурного рынка (рис. 7).

[12]Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" Собрание законодательства Российской Федерации, 4 марта 2024 г. № 10 ст. 1373.

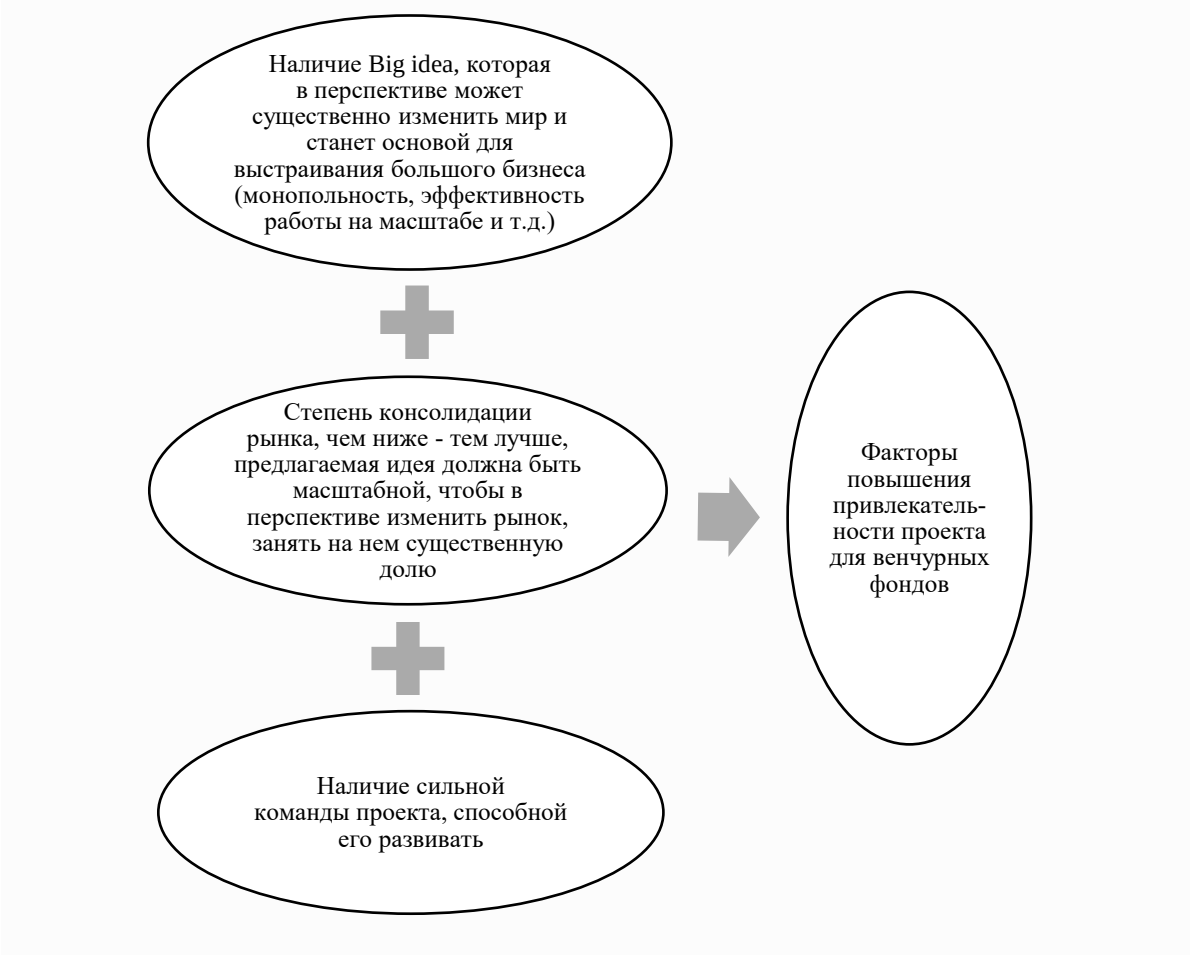


Рис. 7. *Стратегические характеристики компаний, привлекательные для потенциальных инвесторов*[13]

Fig. 7. *Strategic characteristics of companies that are attractive to potential investors*

Венчурные фонды в период мировых трансформационных процессов вынуждены сменить тактику отбора высокотехнологичных проектов, повысив требования к последним. Если ранее достаточными условиями привлекательности стартапов были «устойчивый» рост и потенциал проекта, то сейчас акцент венчурными фондами делается на уровне самоокупаемости проекта, его перспективах относительно «прибыльности» раундов, фундаментальной силы презентуемого бизнеса. Венчурные фонды стремятся к финансированию стартапов с прогнозируемым сроком выхода из точки безубыточности, следовательно, приоритеты инвесторов сменились в сторону выбора «растущих» компаний, а не просто компаний с высокими темпами роста инвестиционных раундов.

Трансформации на венчурном рынке коснулись также и используемых венчурными фондами инвестиционных инструментов. Наблюдается рост популярности так называемых SAFE – договоров, которые на сегодняшний день получили активное развитие в странах Европы и США. Первоначально они были разработаны и внедрены в мировой практике для решения проблемы привлечения венчурных инвестиций на ранних раундах

[13]Инвестора интересует Big idea [Электронный ресурс] // URL: https://www.forbes.ru/billionaire-school/400989-kak-privlech-horoshego-investora-v-startap-pyat-sekretov-skyeng (дата обращения: 22.06.2024).

развития стартапов в 2013 г.[14] Такой договор, по сути, представляет собой возможность владения инвестором доли бизнеса по его стоимости в будущем.

В нашей стране был принят Федеральный закон от 02.07.2021 № 354-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»[15], в котором предлагался механизм конвертируемого займа для венчурных фондов (других инвесторов) и реципиентов (стартапов и других получателей венчуров) – правовая модель заключения сделки, направленная на сбалансирование интересов каждой стороны путем предоставления капитала получателям инвестиций на первоначальном этапе развития проекта взамен на конвертирование «долга» в долю венчурного фонда (иной компании-кредитора) в будущем при наступлении заранее обговоренных условий. Стоимость будущей доли кредитора обговаривается заранее в случае «взлета» стартапа, в противном случае долг может быть возвращен кредитору реципиентом в денежном выражении.

Договоры SAFE (Simple Agreement for Future Equity) обладают рядом преимуществ как для стартапов, так и для инвесторов (рис. 8).

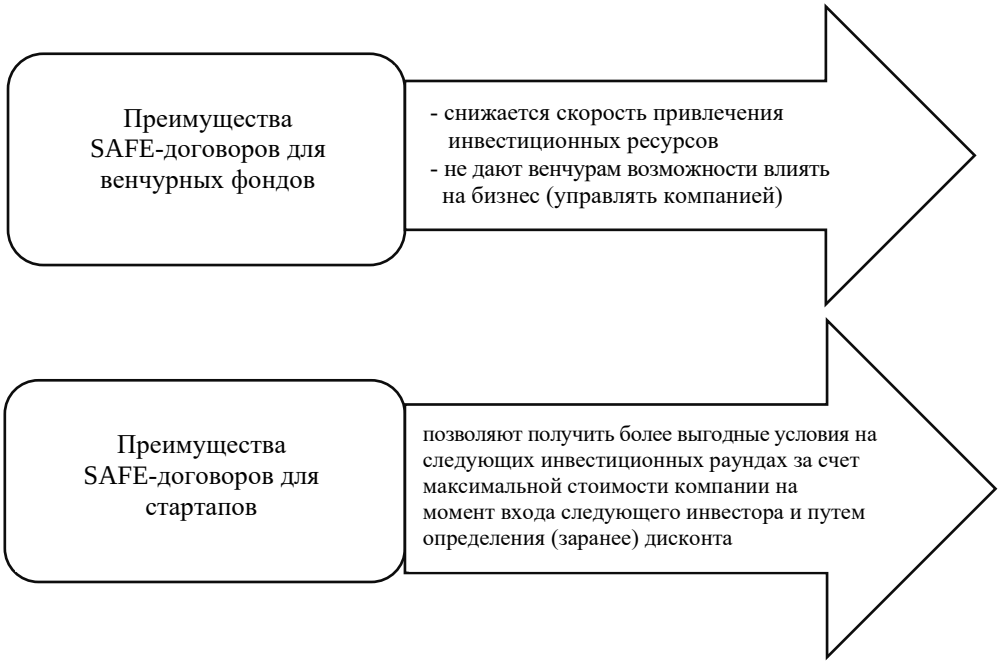


Рис. 8. *Преимущества SAFE-договоров для стартапов и венчурных фондов (составлено автором)*

Fig. 8. *Advantages of SAFE agreements for startups and venture funds (compiled by the author)*

Однако несмотря на явные преимущества SAFE-договоров для стартапов перед другими формами привлечения инвестиционных ресурсов, они обладают и рядом недостатков. Один из них – существенное размывание долей учредителей на более поздних этапах развития стартапа, когда в их владении остается менее 50 % бизнеса – в момент выхода стартапа на рынок и масштабирования продукции. Данная проблема негативна не только с

[14]Спасение или яд: как стартапу привлечь быстрые деньги и почему они могут навредить бизнесу [Электронный ресурс] // URL: https://www.forbes.ru/finansy-i-investicii/404613-spasenie-ili-yad-kak-startapu-privlech-bystrye-dengi-i-pochemu-oni-mogut (дата обращения: 27.06.2024).

[15]Федеральный закон от 02.07.2021 № 354-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Российская газета от 8.06.2021 г. N 150-151.

точки зрения основателей стартапов, но также и для венчурного фонда, который был привлечен в него на определенном раунде финансирования, так как размывание доли учредителей может впоследствии привести к снижению их мотивации, направленной на развитие стартапа в перспективе, и к стремлению продажи собственного бизнес-продукта. Присутствие большого числа инвесторов в SAFE-договорах – это знак для венчурных фондов о сомнительных перспективах стартапа в будущем, что снижает их привлекательность для капиталистов на каждом последующем раунде продвижения. В первую очередь это касается ранних инвесторов, которые в надежде на получение прибыли в будущем могут столкнуться, вступив в SAFE-сделку, с такими ситуациями, когда отсутствуют рычаги воздействия на учредителей компании; размываются доли фаундеров на более поздних раундах продвижения стартапа вновь присоединившимися венчурными фондами, действующими в собственных интересах.

Перечисленные риски, связанные с заключением SAFE-договоров, возможно снизить за счет предусмотрения на отдаленную перспективу конкретных условий, направленных на получение прибыли учредителями стартапа и венчурными фондами, участвующими в сделке. Условиями «стабильности» SAFE-договоров для стартапов и венчурных фондов могут быть:

- предложение одинаковых условий для всех инвесторов (ранних и более поздних) SAFE-сделки во избежание проблем в перспективе в процессе выделения рыночных долей фаундеров;
- установление фаундерами стартапа одного SAFE на ранних стадиях с более завышенной стоимостью, несмотря на увеличение длительности поиска и последующее снижение количества потенциальных инвесторов, для которых данный стартап окажется привлекательным. На более поздних этапах инвестирования это возможность соблюдения условий сделки для вновь привлеченных венчурных фондов;
- в процессе поиска участников SAFE-сделки стартапам целесообразно привлекать такие венчурные фонды, которые не имеют опыта и репутации «захватчиков» и управляющих долями фаундеров, т. е. характеризуются минимальным влиянием на развитие бизнеса в перспективе.

Исследование венчурной экосистемы наталкивает на вопрос о том, кто больше выгоды имеет от венчуров: государство-инвестор или государство, принимающее инвестиции. С одной стороны, можно с уверенностью сказать, что «победителем» венчурной сделки является государство-«инвестор», так как оно получает налоговые отчисления от доходов венчурных компаний, являющихся резидентами данного государства, и на его территории осуществляется расходование средств от итогов сделки. Но, с другой стороны, трансграничный капитал – это очень хорошая возможность для стартапов (в том числе российских) выйти на новый этап развития, наличие зарубежных инвесторов сделает стартап более привлекательным для деловых партнеров. Таким образом, ответить на заданный вопрос можно однозначно: венчуры обогащают обе стороны – и государство-«инвестор», на территории которого зарегистрирован венчурный фонд, и государство, принимающее инвестиции, о чем свидетельствует статистика глобального венчурного рынка, «перекрестное» движение инвестиций. Бонусом для обеих сторон, кроме будущих доходов, являются также наработанный опыт и экспертиза.

Выводы

По результатам проведенного исследования определено, что российские стартапы сегодня находятся в крайне сложном положении: с одной стороны, они не имеют возможностей для эффективного развития внутри страны, с другой стороны, даже при наличии успешной идеи они сталкиваются с рядом бюрократических и политических барьеров, мешающих им релоцировать бизнес на территорию другого государства. Это создает не-

благоприятные с точки зрения стратегии инновационного развития РФ тренды, связанные со сменой локации, оттоком инвестиционно привлекательных стартапов и талантливой молодежи из РФ в страны ЕС, США, Турцию, ОАЭ и др., где у них есть возможности для привлечения дефицитных на территории страны финансовых ресурсов в последующие раунды, однако это сопровождается зачастую потерей (размыванием) фаундерами долей в стартапе либо занижением их реальной стоимости.

Обострение геополитической обстановки вокруг страны привело к смещению акцентов: экономические приоритеты ушли на второй план, выдвинув на первое место политические проблемы, решение которых рассматривается федеральным правительством в качестве наиболее актуальной повестки, что в конечном итоге становится следствием снижения эффективности используемых финансово-экономических механизмов и стимулов для развития венчурной индустрии. Интересы российского рынка капитала и инновационной сферы должны быть выдвинуты на первый план для обеспечения финансовой безопасности страны в среднесрочной перспективе, а не наоборот.

Возможность обеспечения технологического суверенитета РФ видится только в осуществлении радикальных фундаментальных преобразований как в институциональной системе страны, так и в остальных сферах, непосредственно влияющих на венчурную индустрию. Если в нашей стране не будут предприняты государством соответствующие меры на «опережение» развития венчурной сферы, внедрение инновационных инструментов в сфере инвестирования и создание более выгодных условий, нежели в передовых странах с развитой венчурной экосистемой, для стартапов, фаундеров, частных иностранных и российских венчурных фондов, других субъектов венчурного рынка, преодолеть негативные последствия кризиса не представляется практически реализуемой задачей.

По итогам исследования венчурного рынка можно сделать заключение, что успешность работы венчурных фондов в современной рыночной «экосистеме» зависит от нескольких факторов:

- уровня и проблем развития экосистемы, в которой они функционируют;
- способности фондов не только к поддержанию трендов, но также к их инициированию;
- наличия необходимого опыта и экспертности для понимания рынка, выбора инвестиционных инструментов и т.п., что позволит оценивать не столько сиюминутную выгодность стартапов, но и будущие последствия осуществляемых вложений;
- наличия кэша для поддержания при необходимости более поздних раундов уже профинансированных стартапов;
- способности к быстрой адаптации стремительно трансформирующего рынка, извлечению важных «сигналов» из информационного «шума».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глазьев С. С.* Проблемы и перспективы развития институтов венчурного капитала в России // Российский экономический журнал. 2021. № 3. С. 81–103. DOI: 10.33983/0130-9757-2021-3-81-103

2. *Грачева Н. А., Полищук О. А., Пылайкина А. В.* Вопросы развития стартапов: оценка проблем роста и финансирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2023. Т. 13. № 6. С. 114–124. DOI: 10.21869/2223-1552-2023-13-6-111-124

3. *Зябликов Д. В., Тугаринова А. А.* Проблемы развития в современных условиях венчурного предпринимательства // Вектор экономики. 2020. № 6(48). С. 56. EDN: JNMWKR

4. *Павлова И. Г.* Исследование финансовых институтов инновационной инфраструктуры // Экономика. Информатика. 2021. Т. 48. № 4. С. 679–687. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-679-687

5. *Холодиева А. Н., Смирнова Е. А.* Состояние и развитие венчурного рынка в России // Наука через призму времени. 2023. № 2(71). С. 24–26. EDN: JTANUM

6. *Цителадзе Д. Д., Яшин С. Н.* Анализ тренда и потенциала развития современного венчурного капитала в России // Инновации. 2020. № 8(262). С. 31–40. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.262.8.004

7. *Шкодинский С. В., Степанов Д. А.* Российский венчурный рынок сегодня: проблемы трансформации // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 6. ID: 67.

8. *Vogel P.* From venture idea to venture opportunity // Entrepreneurship Theory and Practice. 2017. Т. 41. № 6. С. 943–971. DOI: 10.1111/etap.12234

REFERENCES

1. Glazyev S.S. Problems and Prospects for the Development of Venture Capital Institutions in Russia. *Rossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal* [Russian Economic Journal]. 2021. No. 3. Pp. 81–103. DOI: 10.33983/0130-9757-2021-3-81-103. (In Russian)

2. Gracheva N.A., Polischuk O.A., Pylaikina A.V. Startup Development Issues: Assessing Growth and Financing Problems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment* [Bulletin of the South-West State University. Series: Economics. Sociology. Management]. 2023. Vol. 13. No. 6. Pp. 114–124. DOI: 10.21869/ 2223-1552-2023-13-6-111-124. (In Russian)

3. Zyablikov D.V., Tugarinova A.A. Problems of development in modern conditions of venture entrepreneurship. *Vektor ekonomiki* [Vector of Economy]. 2020. No. 6 (48). P. 56. EDN: JNMWKR. (In Russian)

4. Pavlova I.G. Study of financial institutions of innovation infrastructure. *Ekonomika. Informatika* [Economy. Informatics]. 2021. Vol. 48. No. 4. Pp. 679–687. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-679-687. (In Russian)

5. Kholodieva A.N., Smirnova E.A. State and development of the venture market in Russia. *Nauka cherez prizmu vremeni* [Science through the prism of time]. 2023. No. 2(71). Pp. 24–26. EDN: JTANUM. (In Russian)

6. Tsiteladze D.D., Yashin S.N. Analysis of the trend and development potential of modern venture capital in Russia. *Innovatsii* [Innovations]. 2020. No. 8(262). Pp. 31–40. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.262.8.004. (In Russian)

7. Shkodinsky S.V., Stepanov D.A. Russian venture market today: problems of transformation. *Vestnik yevraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2023. Vol. 15. No. 6. ID: 67. (In Russian)

8. Vogel P. From venture idea to venture opportunity. *Entrepreneurship Theory and Practice*. 2017. Vol. 41. No. 6. Pp. 943–971. DOI: 10.1111/etap.12234

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Жанокова Марина Викторовна, канд. экон. наук, вед. науч. сотр., Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

s.marisabel@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8043-0531, SPIN-код: 1771-1674

Махошева Салима Александровна, д-р экон. наук, профессор, зав. отделом «Экономика знаний и опережающее региональное развитие», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

salima@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4249-9906, SPIN-код: 8414-5036

Жаноков Эльдар Мухамедович, аспирант очного вида обучения Кабардино-Балкарского аграрного университета им. В. М. Кокова;

360030, Россия, Нальчик, пр-т Ленина, 1в;

eldar.zhanokov@mail.ru

Information about the authors

Marina V. Zhanokova, Candidate of Economic Sciences, Leading Researcher, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

s.marisabel@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8043-0531, SPIN-code: 1771-1674

Salima A. Makhosheva, Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Knowledge Economy and Advanced Regional Development, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

salima@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4249-9906, SPIN-code: 8414-5036

Eldar M. Zhanokov, Full-time Postgraduate Student of the Kabardino-Balkarian Agrarian University named after V. M. Kokov;

360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue;

eldar.zhanokov@mail.ru

ИСТОРИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 93/94;908;904 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-344-362
EDN: XNUYFM

Аул Хумара. Краткий исторический очерк

И. Х. Гукемух

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В очерке предпринята попытка изложения предыстории и истории аула Хумара. Первая его часть представляет собой краткий историографический обзор средневековых источников X–XII вв., трудов отечественных и европейских авторов XVII–XIX вв., а также археологических исследований второй половины XX в., посвященных причинам возникновения в данной местности первого поселения и крепости. Во второй части освещается история аула – с момента его основания в XIX в. до наших дней. В ее основу легли архивные документы XIX в., научные публикации 2000-х гг., сведения краеведческих интернет-сайтов, газетные статьи и устные сообщения местных информантов

Ключевые слова: Северный Кавказ, Верхнее Прикубанье, Хумаринское городище, памятники эпохи раннего железа, крепость хазарского времени, Абуковы, аул Хумара, этапы истории

Поступила 11.11.2024, одобрена после рецензирования 06.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Гукемух И. Х. Аул Хумара. Краткий исторический очерк // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 344–362. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-344-362

Original article

Khumara village. Brief historical essay

I.Kh. Gukemukh

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The essay attempts to outline the prehistory and history of the Khumara village. The first part is a brief historiographical review of medieval sources of the 10th–12th centuries, works of Russian and European authors of the 17th–19th centuries, as well as archaeological research of the second half of the 20th century, devoted to the reasons for the emergence of the first settlement and fortress in this area. The second part covers the history of the village – from its foundation in the 19th century to the present. The paper is based on archival documents of the 19th century, scientific publications of the 2000s, information from local history websites, newspaper articles and oral reports from local informants.

Keywords: Northern Caucasus, Upper Kuban region, Khumara settlement, monuments of the early Iron Age, fortress of the Khazar period, the Abukovs, Khumara village, stages of history

Submitted 11.11.2024, approved after reviewing 06.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Gukemukh I.Kh. Khumara village. Brief historical essay. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 344–362. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-344-362

© Гукемух И. Х., 2024

Введение

История Верхней Кубани и расположенных в этом географическом районе населенных пунктов и археологических памятников привлекала внимание отечественных и зарубежных исследователей с XVII века. Такой интерес был обусловлен главным образом тем, что указанная местность на протяжении веков играла важную роль ввиду близости Клухорского перевала, связывающего долину Кубани и северный склон Большого Кавказа с Закавказьем и Восточным Причерноморьем. Этот путь использовался народами, населявшими территории по обе стороны Кавказских гор, в качестве важной коммуникации. Перевальный путь действовал как в мирные времена, так и в периоды войн, которыми изобиловала история региона. Здесь сталкивались интересы меотов, византийцев, хазар, алан и других народов. Здесь же в XIII–XIV вв. пытались утвердиться генуэзцы и монголы, а в период Кавказской войны (XVIII–XIX вв.) долина Верхней Кубани и ущелья, образуемые ее истоками, служили убежищем и естественной крепостью для адыгов. Все перечисленные события оставили след в духовной и материальной культуре автохтонного населения и стали причиной возникновения в указанном районе последовательно древнего селища, крепости, а затем и аула.

Актуальность предлагаемого очерка определяется ростом интереса российских ученых и краеведов к истории населенных пунктов разных регионов страны.

Его новизна состоит в том, что до сих пор не было опубликовано ни одного исторического исследования, которое охватывало бы период с момента возникновения на указанной территории первого поселения до наших дней.

Цель очерка – создание обобщающей картины истории данного населенного пункта, основанной на разрозненных сведениях, которые содержатся в дошедших до нас средневековых источниках, материалах археологических и краеведческих исследований.

Предыстория

Черкесский аул Хумара (каб.-черкес. название Хъумэрэн, производное от глагола хъумэн – охранять; абазин – Х1вмара) расположен на правом берегу р. Кубань, в верхнем ее течении, у подножия горы Калеж (в переводе с каб.-черк: старая крепость). До середины прошлого века ученые считали, что наиболее древний объект в окрестностях аула – это крепость (городище), сооруженная на плоской вершине этой горы в VII в. н. э., а затем использовавшаяся хазарами, византийцами, аланами, генуэзцами и адыгами.

Остов крепости (городища) площадью 25 га занимает плато древней надпойменной террасы. С него хорошо просматривается долина Кубани, прилегающие к ней возвышенности и подходы.

Византийские и грузинские источники IX–X вв. н.э. называют крепость Схимаром (Схимарис, Цхумар, Химар) [1; 2, с. 126]. Это название, вероятно, и было позднее преобразовано в топоним Хумара (каб.-черк. Хъумэрэн).

Сама природа сделала крепость практически неприступной – западный край плато, на котором она расположена, обрывается к долине реки Кубань, северный – защищен балкой Инал, а с юга и юго-востока – балкой Шугара (рис. 1).

Характер оборонительных сооружений крепости, применяемые при ее строительстве технологии (панцирная облицовка, забутовка стен) и общая планировка говорят о том, что, вероятно, она так же, как в свое время столица Хазарии Саркел, была построена византийскими инженерами по заказу хазарского кагана [3; 4, с. 101 – 159; 5, с. 474–502].

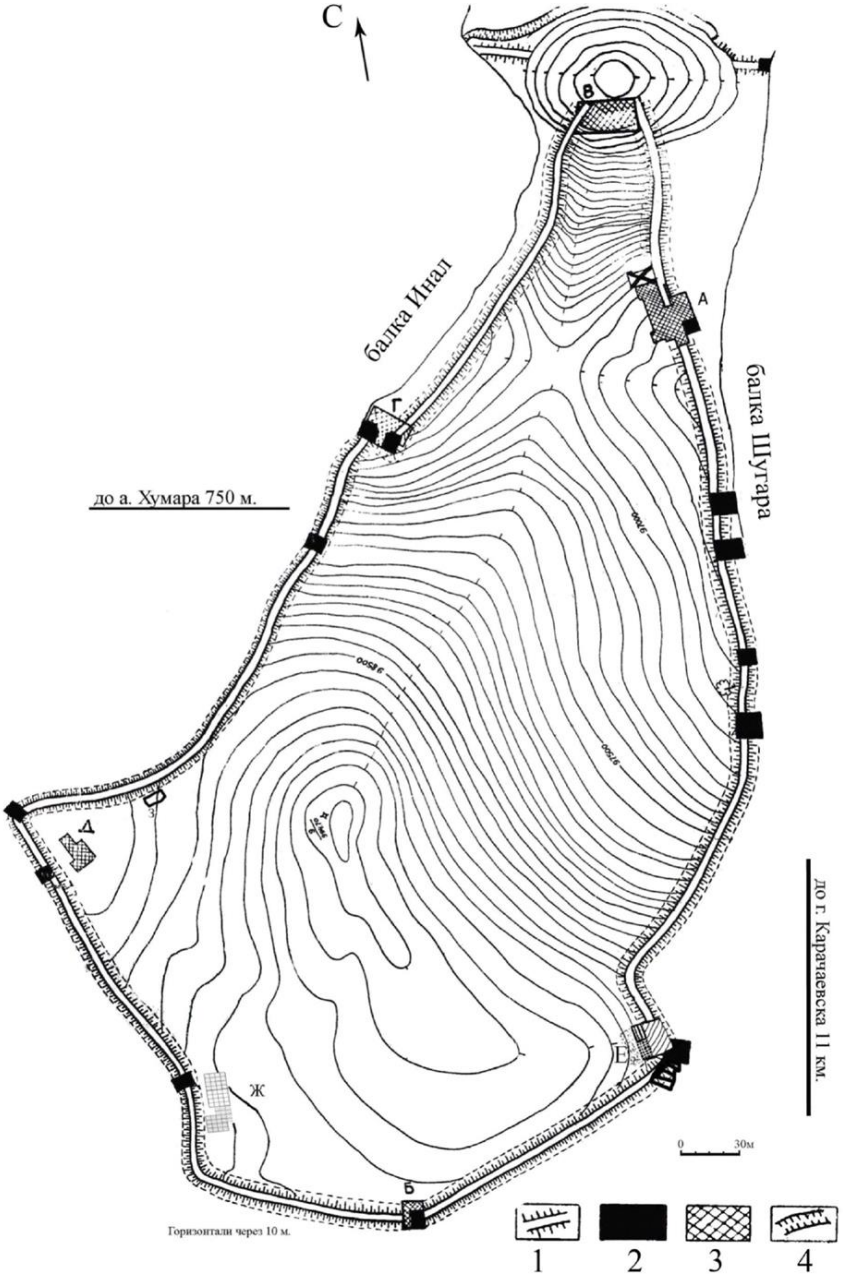


Рис. 1. *План Хумаринского городища по Х. Х. Биджиеву*
1 – крепостные стены; 2 – башни; 3 – раскопы; 4 – ров

Fig. 1. *Plan of the Khumarin settlement according to H.H. Bidzhiev*
1 – fortress walls; 2 – towers; 3 – excavations; 4 – ditch

Попытки реконструировать историю Хумаринской крепости и объяснить ее назначение предпринимались отечественными учеными с конца XIX в. В 1890-х гг. объект был исследован А. Н. Дьячковым-Тарасовым, который, основываясь на археологическом материале и письменных источниках, пришел к выводу, что в средневековье Хумаринская крепость была важным перевалочным пунктом на Великом Шелковом пути из Хорезма к восточному побережью Черного моря [6, с. 148–156].

Е. Д. Фелицын предполагал, что крепость была генуэзской торговой факторией. Однако, по мнению Е. П. Алексеевой, ввиду того, что укрепленные фактории генуэзцев на территории Северо-Западного Кавказа датируются XIII–XV вв., а присутствие здесь лю-

дей ограничено периодом раннего средневековья (конец IX–XIII вв.), эта версия представляется ей сомнительной [7, с. 13]. Возможно, настоящей причиной запустения крепости и ее окрестностей была война между адыгами и фереджами («ферендж» в переводе с каб.-черк. - генуэзец, т. е. романоязычный иностранец, аналог древнерусс. «фряг»), о которой говорит народное предание, записанное у закубанских кабардинцев и приведенное Ауесом Абдоковым в своей статье. Согласно этому преданию, князь *Инал* объединил адыгов, изгнал татар и повел войну против фереджей, которые, опираясь на свои крепости, совершали набеги на адыгские селения. Далее в предании говориться, что Иналу удалось разрушить все крепости фереджей за исключением Хумарана (Хумары), построенного на берегу Псыжа (адыгский гидроним р. Кубань). Крепость держалась долго, много воинов-адыгов погибло во время осады. Согласно легенде, фереджи сдали крепость только в обмен на обещание Инала отдать свою жену их военачальнику и дать им без боя покинуть адыгскую землю. Сделка состоялась, но после того, как гарнизон противника вышел из земли адыгов, Инал напал на фереджей и, истребив врагов, вернул себе жену [8, с. 142–143].

То же предание с указанием места под названием Камара (Хумара), но без упоминания имени Инала и эпизода с осадой неприступной крепости со слов генерала Энгельгардта записал Дюбуа де Монпере [9, с. 23–24].

Если верить этому преданию, крепость Схимар была населена и после указанной Е. П. Алексеевой хронологической границы – то есть после XIII в., так как время жизни Инала укладывается в период с конца XIV по первую половину XV в.

Достоверность событий, о которых говорит предание, подтверждается и топонимикой. Одна из глубоких балок, защищающих Хумаринское городище с севера, носит название Инал, возможно, это название она получила от имени осаждавшего крепость адыгского князя.

В 1963 г. В. А. Кузнецов, посетивший объект, опубликовал несколько обнаруженных здесь рунических тамгообразных надписей и символов [10, с. 298–305]. Он также указывал, что в верховьях Кубани и обоих Зеленчуков, кроме ираноязычных алан, вероятно, жили и кавказские автохтоны [11, с. 53, 61, 64, 69]. Об этом же говорит и Е. П. Алексеева, подразделяя автохтонное доаланское население данного района на кобанцев и древних адыгов [7, с. 103].

Версия о принадлежности укреплений туркам-османам, появившаяся в XVIII в., была опровергнута в следующем XIX в. Братья Нарышкины в своем «Отчете» пишут о том, что турки, будучи мусульманами, не стали бы мириться с присутствием на подконтрольной им территории каменного креста, установленного кем-то из их предшественников-гяуров [7, с. 132]. Вполне возможно, что крест был установлен предками адыгов или аланами, которые стали принимать христианство соответственно в VI и X в. н. э. [7, с. 54].

Основываясь на добытых археологами материалах, а также на сведениях письменных источников, можно сказать, что в средневековую эпоху Хумаринская крепость, вероятно, принадлежала поочередно хазарам, византийцам, а после них, возможно, и аланам. Также, с большой долей вероятности, можно допустить, что в разное время в рамках указанного периода Схимар был либо пограничным укреплением, либо промежуточным пунктом на торговой коммуникации, связывающей районы Центрального и Западного Кавказа (включая Сев-Вост. побережье Черного моря). Вполне вероятно, что это укрепление выполняло обе функции в зависимости от политической ситуации. Можно также говорить и о приблизительном периоде функционирования крепости со времени утверждения здесь Хазарского каганата до момента появления в долине Кубани монголо-татар, то есть в VIII – XIII вв.

Источники указывают на некое «крепкое место» в верховьях Кубани, где в январе 1644 г. кабардинские князья *Алегуко Шегануков* и *Хатахшоко Казыев* с подкреплением из ногайцев Малой орды наголову разбили вторгшееся в Прикубанье войско калмыков, воз-

главляемое основателем калмыцкого государства тайшой (наследником ханства) *Урлюком*. Сам тайша Урлюк и трое его сыновей были убиты. Описание тех событий сохранилось в записях турецкого путешественника Эвлии Челеби, посетившего Северный Кавказ в 1666 году [12, с. 38].

В ходе войны против ногайцев калмыки сначала вытеснили Малую ногайскую орду из волжских степей (1635), после чего ногайцы стали переселяться дальше на запад. В 1643 году 10-тысячное конное войско тайши Урлюка (Хо-Урлюка) напало на ногайские стойбища в Прикубанье. Ногайский мурза *Карашаим* с подвластными вынужден был откочевать к верховьям Кубани, где в то время находились селения его тестя – князя Алегуки Шеганукова. Э. Челеби рассказывает о другом мурзе – *Арсланбеке*, который нашел прибежище у кабардинцев и которого они отказались выдать калмыкам. Там же автор «Путешествия» говорит о «благоустроенных и удобных селениях в труднодоступных местах», которые управляются *«Коджой Мисостом»* [12, с. 38].

Сами братья Алегуко и Хатахшоко переселились из Кабарды на Кубань незадолго до этих событий, в 1641 году. Причиной переселения были неудачные столкновения с феодалами Малой Кабарды и их союзниками из числа кумыков, ногайцев и русского гарнизона Терского городка.

В документе из РГАДА говорится, что Алегуко и Хатохшоко «от Кубану подвинулись в горы в крепкие места и кочуют ныне с абазинскими черкасы вместе» [13]. Можно предположить, что «подвинулись» они вверх по Кубани – до хорошо укрепленных природой окрестностей нынешнего аула Хумара, где и расположились вместе с абазинами.

Новые сведения о появлении в этих местах современного аула Хумара относятся уже ко второй половине XVIII в. и напрямую связаны с событиями Кавказской войны, о чем речь пойдет во второй части очерка.

Существенно удревнить историю заселения этой локальной территории позволили материалы раскопок, произведенных на территории городища в 60-х годах XX в.

В 1963–1964 годах археологическая экспедиция Карачаево-Черкесского НИИ под руководством Е. П. Алексеевой открыла на ее территории в слоях VIII – VI вв. до н.э. древнее селище (остатки жилищ из тесаного камня, каменные и галечные вымостки, а также погребения). Грунтовые могилы, перекрытые каменными плитами, Е. П. Алексеева отнесла к периоду V–VII вв. н.э. [7, с. 83]. Тогда же были обследованы остатки 5-метровой каменной крепостной стены, возведенной значительно позднее – в VIII–X вв. н.э. Е. П. Алексеева отмечала, что Хумаринское селище является одним из немногих памятников Северо-Западного Кавказа, где были обнаружены наиболее ранние для этого региона изделия из железа и следы его обработки, и датировала его VIII–VII вв. до н. э. Правда, сама автор указывала, что эти находки могут относиться и к средневековому периоду существования Хумаринского городища [7, с. 50, 52–55].

В 1974–1983 гг. на протяжении шести сезонов на раскопках городища работала экспедиция Карачаево-Черкесского НИИ. На основе материала, добытого в ходе раскопок, руководитель экспедиции Х. Х. Биджиев опубликовал две монографии [14].

В 1983–1985 гг. на холме, примыкавшем к цитадели, М. П. Абрамова обнаружила слои скифского времени с материалами, идентичными ранее обнаруженным Е. П. Алексеевой. Это были остатки прямоугольных в плане построек из плохо отесанных каменных глыб, которые располагались на склоне холма террасами, круглые угольные пятна, прямоугольные очажные углубления, выложенные изнутри камнями, галечные вымостки участков древних улочек и вымощенные каменными плитами полы в помещениях. Кроме того, археологи нашли части бронзовых предметов, осколки керамики, среди которых были фрагменты довольно крупных сосудов, ручек от них, а также орудия труда (камен-

ные терочники, проколки, глиняные пряслица, пест), фрагмент костяного псалия и кости животных. Керамика в основной своей массе – сероглиняная, редко – коричнево-красноглиняная с геометрическим орнаментом [15, с. 97].

М. П. Абрамова считала, что орнамент, сохранившийся на осколках керамики данного поселения, типичен для широкого круга Кабардино-Пятигорья 1-й пол. I тыс. до н.э. и говорит о ее принадлежности кобанцам [15, с. 99, 101], которые в VIII – VII вв. до н. э. уже испытывали сильное влияние скифской культуры – вели оживленный торговый обмен со степняками, роднились с ними и участвовали в их военных предприятиях. В VII-V вв. до н.э. появление скифов на Северном Кавказе наложило отпечаток на общий облик местной материальной культуры, придавая ей скифоидный характер [16].

Вероятно, в этот же период времени в окрестностях нынешнего аула Хумара появляются и следы меотов (древних адыгов). В одном из раскопов Е.П. Алексеева обнаружила керамические сосуды с рельефным орнаментом, которые за пределами современной территории КЧР аналогов почти не имеют и которые исчезают в VI в. до н. э. Е. П. Алексеева была склонна отнести их к одному из вариантов прикубанской (протомеотской, раннемеотской или меото-скифской) культуры [7, с. 55].

О жительстве в окрестностях Хумаринского городища предков адыгов говорит и предание о нарте *Челахстене* З*лоязычном*, который жил в замке «Чуана» (Шоанинский храм, расположенный выше по ущелью). Там же лежит и большой камень, на котором, по легенде, оставил следы конь нарта Сосруко [17, с. 16].

Шора Ногмов пишет о «кирпичных домах» в верховьях Кубани. «Один из них называется шонна, а другой – хасамыва. Шонна есть испорченное слово от шуунне, что значит «дом всадников» (каб.- черк.: шу унэ)…Хасамыва (каб.- черк.: хасэ мывэ) значит «камень заседания судей». Говорят, что вместо зерцала там имели камень с изображением конского копыта и собачьей лапы. По преданию, там устроено было тесное отверстие, чрез которое надлежало проходить для испытания в невинности. Виновный, сколько бы ни был тонок, не мог пролезть, а невинный пролезал, хотя и с большим трудом»[1].

Обнаружение в данной локации предметов, относящихся к разным, но существовавшим примерно в одно время, археологическим культурам приводит к мысли о том, что верхнее течение Кубани являлось своеобразным культурным фронтиром между ранними меотами (древними адыгами) и кобанцами. В пользу этого предположения говорит сам факт сочетания в одних и тех же памятниках раннемеотских и кобанских черт. Примером могут служить материалы раскопок Хумаринского городища, а именно обломки красноглиняных сосудов с полосатым и сетчатым лощением, датируемых X–XIII вв. Такой орнамент характерен для средневековой адыгской керамики [7, с. 56, 99] (рис. 2).

В начале 2000-х гг. Карачаево-Черкесская экспедиция Института Археологии РАН возобновила работу на городище под руководством У. Ю. Кочкарова. На территории городища было заложено несколько раскопов, в которых найдены орудия труда, оружие, предметы быта. В 2016 г. с помощью аэрофотосъемки был получен точный ортофотоплан памятника и сформирована 3-мерная компьютерная модель [18, с. 226].

Возникшая позднее на месте селища крепость Схимар (Схимарис, Цхумари, Химар) известна благодаря письменным источникам, посвященным жизни и гибели *св. Максима Исповедника*. Этот монах и подвижник веры, боровшийся против имперской монофелитской ереси Византии, был подвергнут пыткам и отправлен в ссылку в эту крепость, где и скончался [19].

[1]Ногмов Ш. История адыхейского народа. Нальчик: Эльбрус, 1994. С. 62-63

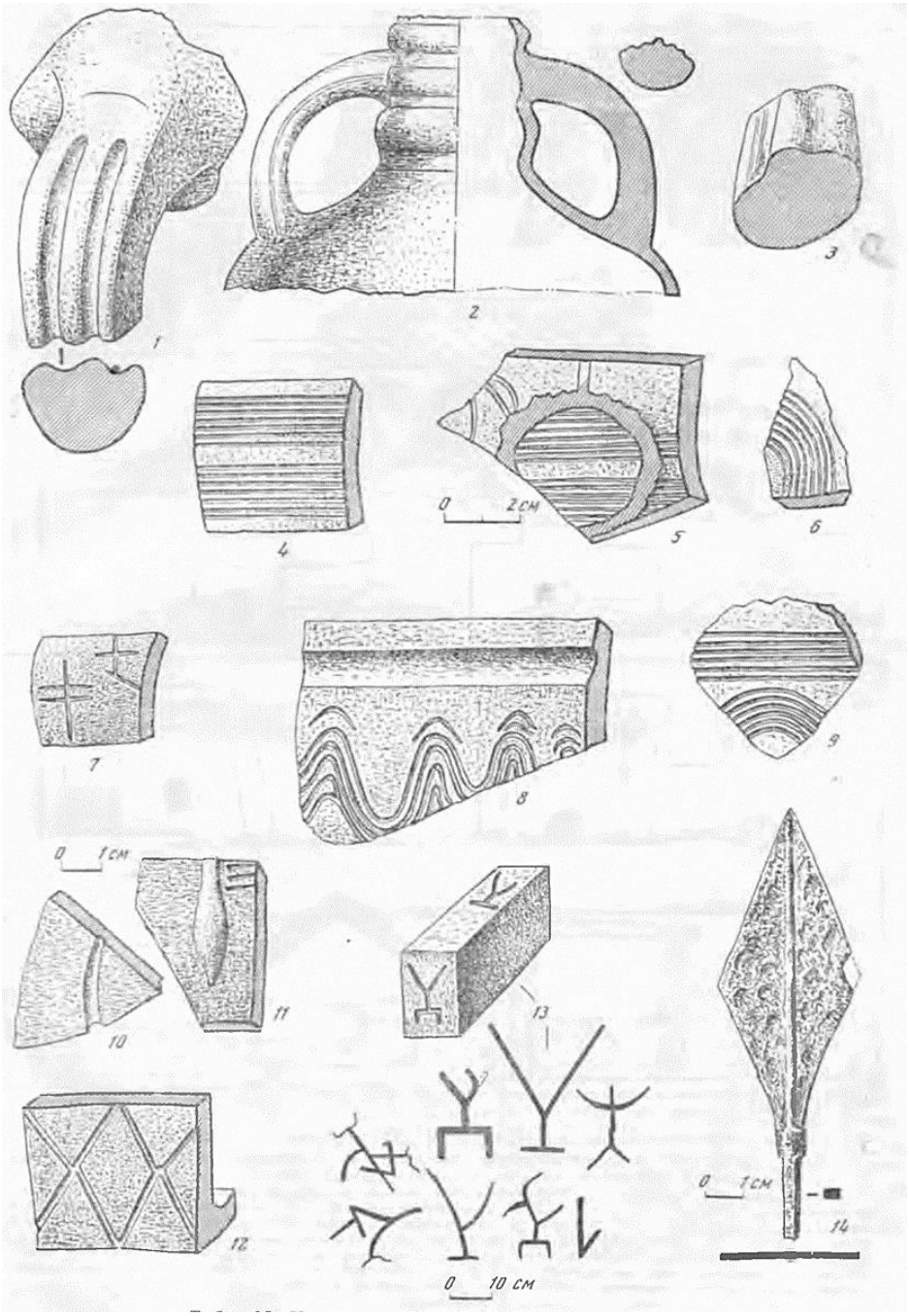


Рис. 2. *Керамика Хумаринского городища*

Фрагменты адыгской красноглиняной керамики: 1 – ручка амфоры; 2 – верхняя часть амфоры; 3 – ручка амфоры; 4–9 – обломки красноглиняной керамики с врезанным линейным и линейно волнистым орнаментом, X–XIII вв.; 10–12 – обломки красноглиняной керамики с лощением адыгского типа, X–XIII вв.; 13 – знаки на камнях Хумаринского городища; 14 – железный наконечник стрелы монгольского типа, найденный на северо-восточных подступах к Хумаринскому городищу (экспедиция КЧНИИ 1963–1964 гг.)

Fig. 2. *Ceramics of the Khumara settlement*

Fragments of Adyghe red clay ceramics: 1 – amphora handle; 2 – upper part of the amphora; 3 – amphora handle; 4–9 – fragments of red clay ceramics with incised linear and linear-wavy ornamentation, 10th–13th centuries; 10–12 – fragments of red clay ceramics with Adyghe-type burnishing, 10th–13th centuries; 13 – signs on stones of the Khumara settlement; 14 – iron arrowhead of the Mongolian type, found on the north-eastern approaches to the Khumara settlement (KChNII expedition in 1963–1964)

Есть и другое мнение о месте последней ссылки и смерти св. Максима. Архиепископ Цагерский и Лентехский Стефан в качестве такового называет местность Скимари у подножия горы Лайла[2]. По мнению А. Ю. Виноградова, речь может идти об Омаришарской крепости Химар [20]. Таким образом, данный вопрос остается спорным.

История аула

История аула Хумара получает продолжение в XIX в. и тесно связана с фамилией Абуковых – кабардинских дворян с абазинскими корнями. Согласно данным исследователей и краеведов, а также информации, содержащейся в архивных источниках, на рубеже XVIII–XIX вв., после ухода от абазинских владельцев Джантемировых (прибл. в 1700 г.), Абуковы владели аулом в районе Пятигорья, в верховьях рек Подкумок и Эшкакон. Местность эта в фамильном предании носит название Шыпэж (ЩIыпIэжь в переводе с каб.-черкес. «старое место»)[3].

Судя по архивным данным, Абуковы в конце XVIII в. из-за распрей с кабардинскими князьями ушли из Кабарды и были поселены генералом Потемкиным за Кабардинской линией, где проживали до 1820-х гг. В конце 1-й четверти XIX в. они в числе жителей разных аулов были отселены обратно – на территорию Кабарды (южнее р. Малка), которая к тому времени была уже покорена Российской империей [21, с. 104]. Череда переселений Абуковских аулов, равно как и других кабардинских населенных пунктов, начавшаяся в XVIII в., продолжалась на протяжении всего последующего столетия и была следствием меняющихся военно-политических обстоятельств и зависящих от них соображений русской военной администрации. Свое отражение эти непрерывные миграции находят в документах того времени. В прошении, поданном в 1842 г. Атажуко Абуковым исполняющему дела начальника Центра Кавказской линии полковнику Голицыну, указывается, что до 1822 года Абуковы владели землей около крепости Кисловодской и станицы Боргустанской, но в том же году по настоянию командира Кавказского корпуса А. П. Ермолова переселились в Кабарду и до 1838 г. «беспрепятственно пользовались землею для скотоводства, хлебопашества и сенокоса по обеим сторонам Малки вниз от Каменного моста…» [21, с. 105; 22, ф. 1209. Оп. 14 доп. Д. 31].

В документе, датированном 1825 г., говорится, что дети Солемана Абукова (Ислам, Ахмед и Али) со своими сыновьями и внуками (рис. 3) проживают во владениях князя Мисоста Атажукина [23, с. 78], а в конце 1830-х аулы Атажуки (сына Мусы) и Мухамеда (сына Хусина) Абуковых переселяются сначала на р. Чегем, а затем на р. Баксан (1839–1840 гг.), где продолжают оставаться на землях князей Атажукиных и находятся «большею частию между жителями, фамилии его принадлежащими» [21, с. 105–106; 24, ф. 262, оп. 1, д. 71. л. 74 об. - 75].

[2]История обретения мощей преподобного Максима Исповедника / Русская православная церковь. Официальный сайт Московского Патриархата: patriarchia.ru URL:http://www.patriarchia.ru/db/text/2034049.html (дата обращения: 15. 09.2024)

[3]Об истории и памятниках селений Абуковых / zolka.ru: сайт URL: https://www.zolka.ru/ob-istorii-i-pamyatnikax-selenij-abukovyx (дата обращения: 11.09.2024).

Рис. 3. *Схема одной из генеалогических ветвей Абуковых на 1825 год [23, с. 78]*

Fig. 3. *Diagram of one of the genealogical branches of the Abukovs in 1825 [23, p. 78]*

Землю на Подкумке, отданную в период отсутствия Абуковых в казну и превращенную в Абуковский казенный участок [21, с. 106], колониальная администрация им долго не возвращает, но в 1846 г., учитывая заслуги Атажуко перед Российской империей (он участвовал во многих военных предприятиях русских войск), власти все же выделяют ему некоторую часть (14 000 десятин). Тем не менее, в 1861 г. Атажуко с подвластными переселяется в пределы Османской империи. Что касается Али Абукова, то его переселение в район нынешнего а. Хумара произошло раньше – в начале 1840-х гг. – из-за имущественного конфликта с двоюродным братом Адильгиреем[4]. В 1865 г. аул Али Абукова встречается в списках населенных пунктов по Эльбрусскому округу под названием Хумаринский. В этом же списке упоминается еще один аул Абукова, но без указания его конкретного месторасположения и имени владельца [25, с. 26].

О появлении на Верхней Кубани аула Ново-Абуковского (Хумаринского) краеведы сообщают, что прибывший сюда в сер. XIX в. Али Абуков поселился сначала в месте впадения в Кубань р. Мара, затем перешел в Кубранское ущелье (к северу от современного пос. Новый Карачай), а позднее, из-за сурового климата и недостатка пастбищ, с подвластным ему аулом спустился еще ниже по течению Кубани и выбрал для жительства местность на правом берегу реки (у г. Калеж), то есть на территории нынешнего аула Хумара[5].

В другом документе сообщается, что Ново-Абуковский аул был основан раньше (в 30–40-е гг. XIX в.). В нем, в частности, указывается, что «*Аул Эфендия Али Абукова был водворен на реке Хумаре* (информант Абрек Шакманов сообщает, что сегодня это ручей в пределах

[4] История и хозяйство а. Хумара / zolka.ru: сайт: URL: https://www.zolka.ru/istoriya-i-xozyajstvo-a-xumara (дата обращения: 05.07.2024)

[5]Об истории и памятниках селений Абуковых / zolka. ru: сайт URL:https://www.zolka.ru/ob-istorii-i-pamyatnikax-selenij-abukovyx/

аула) *генералом Муравьевым в видах нередко случавшегося в то время прорыва хищнических партий, а также по просьбе самого Абукова*» [26, ф – 774, оп. 2, ед. хр. 116, л. 10 – 10 об.].

Вопрос о том, кто же на самом деле основал нынешний аул Хумара (Ново-Абуковский), долгое время оставался не до конца выясненным. Так, в первых же строках краеведческой статьи, посвященной истории этого аула, говорится, что основателем Хумары был князь Али Эдыгович Абуков[6]. Однако А. Б. Мамхегов в своем исследовании доказывает, что аул основал Али Солеманович Абуков, а сведения о том, что его заложил некий князь Али Эдыгович Абуков, считает ошибкой, происходящей из неправильного написания фамилии ногайского князя Абулова. Аул его отца Эдыга Абулова в то время располагался на р. Уруп, в окрестностях с. Армавир, что подтверждается списком населенных пунктов по новообразованным округам [21, с. 106; 27, с. 25]. Справедливым представляется и еще одно замечание А. Б. Мамхегова, касающееся титулования Али Абукова «князем». «Абуковы – не князья, а абазинские узденя-агмиста», – пишет он [21, с. 106]. Уточним лишь, что Абуковы были не просто «агмиста» (абазинские уздени), а «агмиста-ду», то есть в абазинской феодально-сословной системе они занимали положение первостепенных узденей (окончание «-ду» в абазинском языке означает «большой») и незадолго до перехода под покровительство кабардинских князей Атажукиных служили абазинским князьям Джантемировым. Правда, сам А. Б. Мамхегов допускает в своем исследовании ошибку (или опечатку), именуя аул Али Абукова Старо-Абуковским [21, с. 106], тогда как до 1925 года он назывался либо Абуковским, либо Хумаринским, либо Ново-Абуковским, а название «Старо-Абуковский» носил аул на Подкумке (ныне с. Первомайское, Малокарачаевского р-на КЧР).

Административное устройство края после его вхождения в состав Российской империи в XIX в. было неустойчивым и перманентно реформировалось в зависимости от военных, политических и экономических соображений властей. Аулы переселялись, переименовывались, укрупнялись или, напротив, дробились как по собственной инициативе, так и по распоряжению администрации. Названия, происходящие от родовых фамилий прежних владельцев, заменялись наименованиями племен, рек и урочищ [25, с. 27]. Этими обстоятельствами и объясняются неточности и ошибки, которые в условиях многоступенчатой и разветвленной бюрократической системы множились, «перекочевывая» из одного документа в другой. Например, на карте Терской области (1898 г.), которую в своем исследовании дает А. В. Савойский[7], обозначены два аула Абукова – один на месте современного с. Учкекен, другой – в верховьях Подкумка. Аул Хумара на Верхней Кубани в документах также иногда называется аулом Абуковским.

Процесс заселения Хумаринского аула происходил в период с 1862 по 1863 гг. Первыми переселенцами из аула в устье р. Кубрань в аул у г. Калеж стали: сам Али Абуков, Тым Гукемухов и братья Имам и Осман Цаговы (всего 18 дворов) [27, с. 193]. Вслед за ними здесь обосновались семьи Астежевых, Дзамыховых, Дугужевых, Темировых, Тлепсеруковых, Джегутановых, Джатежевых, Дышековых, Коблевых, Ешеровых, Тамбиевых, Бесленеевых, Хожевых и др.[8].

В 1868 г. Ново-Абуковский аул состоял из 24 дворов, из которых 10 принадлежали кабардинским и абазинским узденям и 14 – крестьянам [26, оп. 1, ед. хр. 123, л. 16–17, 37–38].

[6]История и хозяйство а. Хумара / zolka.ru: сайт URL: https://www.zolka.ru/istoriya-i-xozyajstvo-a-xumara (дата обращения: 05.07.2024).

[7]Савойский А. В. Род Абуковых в истории Залукокаже / zolka.ru: сайт: URL:https://www.zolka.ru/rod-abukovyx-v-istorii-zalukokoazhe

[8]История и хозяйство а. Хумара / zolka.ru: сайт: URL: https://www.zolka.ru/istoriya-i-xozyajstvo-a-xumara (дата обращения: 05.07.2024).

Столь малое количество дворов объясняется тем, что во второй половине XIX в. почти все Абуковы, проживавшие на Верхней Кубани, переселились в Османскую империю. По этой причине аул и стали называть Хумаринским. Архивные документы сообщают, что «после смерти А. Абукова его вдова, продав принадлежавшие мужу земли, переселилась с детьми в Турцию» [26; ф - 774, оп. 2, ед. хр. 116, л. 10-10 об.].

А. Б. Мамхегов пишет, что в представленных в сословную комиссию списках привилегированного сословия Баталпашинского уезда (1872 г.) в Абуковском ауле значатся всего две семьи Абуковых (эфенди Али Абукова – 2 души мужского пола и Асланбека Абукова – 1 душа) и по одной семье Тамбиевых, Окоовых и Кетежовых (Гетежевых). Тамбиевы и Окоовы обозначены тлекотлешами (то есть принадлежащими к сословию первостепенной родовой знати), а Гетежевы – дыжынуго (служилыми дворянами первой степени) [21, с. 109]. О каком именно из Абуковских аулов идет речь в приводимом А. Б. Мамхеговым фрагменте, мы сказать не можем, хотя слова «эфенди Али», вероятно, указывают на то, что в данном случае имеется в виду аул Ново-Абуковский (Хумаринский), основанный А. С. Абуковым.

После смерти Али Абукова старшиной аула стал его сын (или родственник) *Бекмырза Абуков*, а после него – один из жителей Ново-Абуковского аула – *Махмуд Дзамыхов*. Другой сын Али Абукова – *Кучук* инициировал строительство аульной мечети, куда из Кабарды был приглашен эфенди *Али Абхудов* [27, с. 193]. Уроженец а. Хумара Хамед Бесланеев сообщал, что материалами для постройки мечети аульную общину обеспечил углепромышленник *Утянов.*

Основными занятиями жителей аула были разведение крупного и мелкого рогатого скота и коневодство, земледелие и традиционные ремесла – кузнечное и скорняжное. Большим спросом у черкесов и соседних народов пользовались лошади из абуковских табунов [28]. У кабардинцев сохранилась поговорка: «Зы абыкъурэ аркъэнрэ уиІмэ, уунагъуэщ» (Если у тебя есть одна абуковская лошадь и аркан – ты имеешь хозяйство) [29, с. 11]. Главной земледельческой культурой было просо. В конце 60-х годов XIX в. начальник Эльбрусского округа Н. Г. Петрусевич писал, что жители его «сеют исключительно просо и отчасти кукурузу. Сеять просо выгоднее всякого другого хлеба по сильному урожаю, которое оно делает» [26; ф. 774, оп. 1, д. 124, л. 160].

Во второй половине XIX в. в аульных хозяйствах стали выращивать и картофель [28].

В начале XX в. в окрестностях аула заработали каменноугольные шахты, и здесь поселились прибывшие с Донбасса шахтеры. Вместе с их появлением среди местных жителей стали распространяться идеи социального переустройства общества. В Ново-Абуковском прошла юность известного революционера-народовольца *М. Ф. Фроленко* (1848–1938 гг.) [27, с. 193]. За участие в двух покушениях на императора *Александра II* (в ноябре 1879 и марте 1881) он был приговорен к смертной казни, замененной вечной каторгой. В 1905 году М. Ф. Фроленко был освобожден из Шлиссельбургской крепости и вплоть до 1917 года находился под надзором полиции[9].

Гражданская война, последовавшая за Октябрьской революцией, пощадила аул, хотя в этот период его попеременно занимали вооруженные отряды противоборствующих сторон. В Абуковском ауле, в доме местного жителя Насыпа Джегутанова, скрывался *Я. Ф. Балахонов* (1892–1935)[10], впоследствии командир 5-й Кубанской кавалерийской

[9]Фроленко Михаил Федорович / «Общество некрополистов»; сайт: URL: http://www.necropolsociety.ru/frolenko.html (дата обращения: 09.10.2024)

[10]Осадчая Л. Из племени воинов и созидателей / День республики 23.11.2020; сайт: https://denresp.ru/2021/11/23/ iz-plemeni-voinov-i-sozidatelej/

дивизии Красной Армии, а затем военком Карачаево-Черкесской АО и одновременно заместитель председателя облисполкома КЧАО[11].

После утверждения советской власти из названий населенных пунктов удалялись имена и фамилии бывших владельцев, а их носители подвергались репрессиям. Так с 1925 года Хумаринский аул официально был переименован в аул Хумара[12].

В 1930-е годы по обвинению в «руководстве буржуазно-националистической контрреволюционной организацией» был расстрелян уроженец аула, один из зачинателей черкесской советской литературы, председатель Черкесского отделения Союза писателей СССР Халид Кучукович Абуков [30].

В 1937 г. был осужден Хатажук Османович Абуков[13], трудившийся до ареста в Хумаре, в колхозе им. Н. И. Ежова.

В том же 1937 году в с. Мерхеули Сухумского района Абхазской АССР (ныне с. Мархаул Гульрипшского района Республики Абхазия) был арестован и через год расстрелян Григорий Хуршудович Абуков, родной брат одного из организаторов отечественного спорта *Алексея Абукова* (1919–2003) [31].

Репрессиям подверглись также некоторые партийные и советские работники аула. Среди арестованных и казненных по ложным обвинениям был и отец будущего второго секретаря КЧАО *Умара Темирова* – Ереджиб Карович Темиров, занимавший должность заместителя председателя колхоза. Он умер в тюрьме в 1938 году[14].

С 1922 г. аул административно входил в состав Карачаево-Черкесской (до 1926 г.), а затем в состав Карачаевской автономных областей (1926–1944 гг.) [27, с. 194]. В настоящее время он находится в составе Карачаево-Черкесской Республики.

В год переименования аула (1925) в Хумаре родилась Герой Социалистического Труда, первая в истории черкешенка-шахтерка *Маржан Дугужева.* С 1937 по 1950 г. она трудилась в колхозе им. Якова Балахонова (позднее – XVIII съезда ВКП (б)), первыми председателями которого были Хызыр Дзамыхов и Аюб Джегутанов (награжден орденом Трудового Красного Знамени). В 1950 году Маржан Муссаевна поступила работать на шахту №6 треста «Ставропольуголь», где трудилась до выхода на пенсию[15].

В начале 1930-х годов в Хумаре создаются первые коллективные хозяйства – имени А. Г. Евсеева (первого секретаря Карачаевского обкома ВКП (б)) и имени Я. Ф. Балахонова. После их объединения образовался один колхоз, который до 1938 г. носил имя наркома внутренних дел СССР Николая Ежова, а после его ареста и расстрела он был переименован в колхоз имени XVIII партсъезда [27, с. 194].

В 1932 году в а. Хумара родился будущий второй секретарь Карачаево-Черкесского обкома КПСС (1965–1991), делегат от РФ на парламентской ассамблее Совета Европы (1991–1993), руководитель аппарата комитета Государственной Думы РФ по делам национальностей (1994-2000) Умар Ереджибович Темиров. Его деятельность на разных постах была отмечена 23 правительственными наградами, в числе которых: два ордена Трудово-

[11]Балахонов Яков Филиппович / Музей Карачаево-Черкесской Республики; сайт: URL: https://museumkchr.ru/geroi/821-balahonov-jakov-filippovich.html (дата обращения: 09.10.2024)

[12]Хумара // Википедия; сайт: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D1%83%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%B0

[13]Абуков Хатажук Османович // Открытый список; сайт: URL:, https://ru.openlist.wiki

[14]Абидокова Л. Человек, который оставил свой след в истории // День республики, 20.01.2023; сайт URL: https://denresp.ru/2023/01/20/chelovek-kotoryj-ostavil-svoj-sled-v-istorii/ (дата обращения: 22.08.2024)

[15]Дугужева Маржан Муссаевна // Герои страны: международный патриотический интернет-проект; сайт: URL: https://warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero_id=20377 (дата обращения: 09.10.2024)

го Красного Знамени, два ордена «Знак Почета», орден Дружбы народов, орден Республики Абхазия «Честь и Слава»[16].

В первые дни Великой Отечественной войны на фронт отправились 150 жителей аула. Всего же в боях против захватчиков приняли участие 227 (по другим данным 242) аульчан разных национальностей [27, с. 194]. Пали, защищая Брестскую крепость, Рашид Дышеков, Исмаил Дзамыхов и Павел Змеевский. Сражаясь в рядах партизан, погибли Билял Темиров, его сын Хазрет-Али и Ибрагим Хатуев. Не вернулись с войны Николай Приходько и трое его сыновей. Хумаринец Хазгери Бесленеев в 1941 году участвовал в первых советских бомбардировках Берлина. Высокими государственными наградами (орденами Красной Звезды, Отечественной войны II степени, медалями «За отвагу») были отмечены Татлустан Алакаев, вскоре погибший на Донбассе, и Кашиф Гукемухов, павший под Керчью. Погибли на разных участках фронта Ибрагим Темиров, Галим (Борис) Коблев, Хаджи-Умар Бесленеев, Аскерби Гукемухов, Магомет Джегутанов, Канамат Бесланеев, Касбот Темиров, Хамид Дугужев, Мухамадин и Хасин Тлепсеруковы, Федор, Андрей и Иван Зеленские и многие другие. Всех своих детей – по четыре сына от каждой семьи – проводили на фронт Дадина Джегутанова и Хауа Бесланеева. Нурдин Джегутанов, Николай Фатеев, Хаджи-Мусса Темиров, Федор Шумикин в мае 1945 года участвовали в штурме Берлина[17]. С войны не вернулись 157 хумаринцев[18] (по другим данным – 56 человек) [27].

Жители Хумары, остававшиеся в тылу, активно участвовали в сборе средств для строительства эскадрильи «Красный Карачай», отправили на фронт 300 верховых лошадей и теплые вещи для бойцов. Хумаринцы помогали также и Кисловодскому госпиталю, снабжая его продуктами для питания раненых (см. сноску 17).

12 августа 1942 г. в ходе стремительного продвижения немецких войск вглубь Кавказа аул Хумара был занят частями 1-й горнопехотной дивизии вермахта (цветок эдельвейса, изображенный на эмблеме дивизии, стал ее нарицательным именем). Во второй половине августа 1942 года подразделения этой дивизии овладели Клухорским и Марухским перевалами и водрузили нацистские флаги на обеих вершинах Эльбруса. В 1943 году, после взятия советскими войсками Нальчика, возникла угроза окружения всей немецкой группировки, и дивизия была выведена с Кавказа[19].

Под оккупацией Хумара находилась до 6 января 1943 года. Две из трех шахт были взорваны отступающими советскими частями (после изгнания оккупантов к восстановленным шахтам добавилась еще одна). В Хумаре немецкая военная администрация проводила такие «мероприятия», как составление списков партийных активистов, расстрел партизан и т. д. 8 января 1943 года территория КЧР была очищена от немецких войск.

Именно в ауле Хумара в 1965 году в ознаменование 20-летия Победы был воздвигнут первый в Карачаево-Черкесии памятник воинам, погибшим на фронтах Великой Отечественной войны (см. сноску 17).

На сегодняшний день из числа вернувшихся с войны ветеранов в живых не осталось никого. Последним ушел из жизни орденоносец Караль Тлябичев[20].

---

[16]Абидокова Л. Человек, который оставил свой след в истории// День республики, 23.10.2024; сайт: URL: https://denresp.ru/2023/01/20/chelovek-kotoryj-ostavil-svoj-sled-v-istori (дата обращения: 23.10.2024)

[17]Приведенные в разных источниках данные по числу ушедших на фронт, погибших и вернувшихся жителей а. Хумара разнятся.

[18]Осадчая Л. Во всем единокровна судьба аула и страны…// День республики, 01.20.2017; сайт: URL: https://denresp.ru/2017/01/20/vo-vsem-edinokrova-sudba-aula-i-stranu/ (дата обращения: 22.08.2024)

[19]1-я горнопехотная дивизия // Википедия, сайт: https://ru.wikipedia.org/wiki/

[20]Тлябичев Караль Масхудович // сайт: Бессмертный полк. https://www.moypolk.ru/soldier/tlyabichev-karal-mashudovich (дата обращения: 27.10.2024)

Информант Х. Бесланеев сообщал, что к 1970 г. 7 уроженцев аула получили степени кандидатов наук. Во всех республиках, где компактно проживают адыги, широко известно имя хумаринца Курмана Дугужева – журналиста и писателя, оставившего 6-томное литературное наследие. В Хумаре родились государственные деятели Крым Астежев и Нарыч Джегутанов, известный мулла Каспот Темиров, певец Мухамед Джегутанов. Сам Х. Бесланеев участвовал в конном параде, возглавляемом маршалом Буденным, и в двух восхождениях на Эльбрус.

В 1992 году Хумаринский сельсовет был преобразован в Хумаринское сельское поселение, куда вошли также населенные пункты Белая Гора и Кубрань. Сегодня с. п. Хумара граничит с сельскими поселениями Сары-Тюз, Кумыш и с землями Карачаевского городского округа. Его население составляет около 1700 человек. Основную роль в экономике играют сельское хозяйство и туризм. Аул газифицирован, в нем действуют амбулатория, средняя школа, детский сад, магазины. В аульной средней школе с 1972 г. работает секция бокса, организованная Газраилем Ахабековым. Кроме детей из самой Хумары, в ней занимаются учащиеся из соседних населенных пунктов – Сары-Тюза, Орджоникидзевского, Малокурганного. К землям сельхозназначения, часть из которых занята фермерскими хозяйствами, проложена автодорога. Родившиеся в Хумаре предприниматели нередко спонсируют мероприятия по благоустройству аула и улучшению качества жизни соотечественников[21].

Некоторые жители аула пытаются возродить традиционные ремесла и занятия. Один из таких энтузиастов – Султан Дугужев. Он занимается шорным делом – изготовлением конской сбруи, черкесских седел и прочих аксессуаров для верховой езды. Этому ремеслу С. К. Дугужев обучился у своего отца, а также у мастеров-шорников Адыгеи и Кабардино-Балкарии. Мать Султана Дугужева – Гуашаней – была известной в округе рукодельницей, изготавливала на заказ кожаные ноговицы и другие предметы национального костюма. Продолжая традиции коннозаводчиков Абуковых, Дугужевы содержат верховых и вьючных лошадей.

Заключение

Исходя из накопленных материалов, можно утверждать, что первые следы оседлого пребывания людей – представителей западно-кобанской культуры – в окрестностях нынешнего аула Хумара относятся к VIII–VII вв. до н. э. Позднее, в VII–VIII вв. н. э., в эпоху раннего средневековья здесь появляется хазарская крепость, возведенная с помощью инженеров из Византии, в то время союзной хазарам. После крушения Хазарского каганата (X в. н. э.) крепость перешла под власть византийцев. К этому периоду, вероятно, следует отнести и присутствие на Верхней Кубани западных алан, бывших в союзе с хазарами, а также попытки Византии христианизировать местное население. В эпоху расцвета торговли по Великому Шелковому пути в долину Кубани прибывают генуэзские купцы и миссионеры. Материалы, обнаруженные советскими археологами на Хумаринском городище, и предания об изгнании генуэзцев князем Иналом позволяют с уверенностью говорить о пребывании в X–XIII вв. н. э. здесь адыгов (зихов, касогов). В более позднюю эпоху (XVII в.) районом Верхней Кубани безуспешно пытались овладеть крымцы и калмыки. К началу череды военных конфликтов, именуемых в отечественной историографии Кавказской войной (1763–1864), территории вокруг современного с. Хумара населяли абазины (шкарауа), адыги (абадзехи и кабардинцы) и карачаевцы. Результатом военных экспедиций и земельных преобразований, проводимых российской колониальной администрацией, этническая картина района Верхней Кубани коренным образом изменилась.

[21]Осадчая Л. Во всем единокровна судьба аула и страны // День республики; сайт: URL:https://denresp.ru/2017/01/20/vo-vsem-edinokrova-sudba-aula-i-stranu/ (дата обращения: 22.08.2024)

Подавляющая часть адыгов и абазин была либо истреблена, либо покинула долину р. Кубань, переселившись в другие районы Северного Кавказа и в пределы Османской империи. Оставшиеся переселились в предгорья. В результате административно-территориальных реформ появился современный аул Хумара, первыми жителями которого стали выходцы из разных абазинских и адыгских селений, а позднее и прибывшие сюда для работы на угольных копях русские семьи из других областей России.

История аула в XX – нач. XXI вв. тесно связана с новейшей историей России. Став подданными российской короны, а затем гражданами СССР и Российской Федерации, жители аула вместе с другими народами Карачаево-Черкесии пережили все политические катаклизмы, связанные с Октябрьской революцией, Гражданской и Великой Отечественной войнами. В период послевоенного восстановления из числа жителей аула выдвинулся ряд ярких личностей, реализовавших свои способности в разных областях государственной, хозяйственной и творческой деятельности. В 60–80-е гг. XX в. уровень жизни местного населения существенно вырос. В ауле были построены социальные объекты, проведены необходимые для полноценной жизни коммуникации, однако реформы конца 1980-х – начала 1990-х гг., повлекшие крушение всей советской государственной системы, нанесли ощутимый удар по его экономике. Ликвидация местного колхоза и закрытие шахт привели к оттоку трудоспособного населения в города. Лишившись рабочих рук, приходят в упадок многие приусадебные хозяйства. В то же время часть населения старается выжить, возрождая традиционные отрасли – земледелие, скотоводство, коневодство, торговлю сельскохозяйственной продукцией.

Несмотря на уже опубликованные исследования и отрывочные сведения из разных источников, до сих пор остаются открытыми многие вопросы, связанные с этнической и политической историей Верхней Кубани и расположенных в этом районе населенных пунктов. Ответы на них должны дать дальнейшие научные изыскания в области археологии, эпиграфики, фольклора и документоведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Письмо Анастасия Апокрисиария Феодосию Гангрскому. Исповедник Преподобный Максим. URL: https://religion.wikireading.ru/hRYjKiPtHG (дата обращения: 12.10.2024).

2. *Картлис Цховреба* (история Грузии). Тбилиси: Артануджи, 2008. С. 126. URL: http://science.org.ge/old/books/Kartlis%20cxovreba/Kartlis%20Cxovreba%202012%20Rus.pdf (дата обращения: 12.10.2024).

3. *Константин Багрянородный.* Об управлении империей (948–952 гг.) // Восточная литература. Средневековые исторические источники Востока и Запада. URL: https://www.vostlit.info/Texts/rus11/Konst_Bagr_2/frametext42.htm (дата обращения: 25.09.2024).

4. *Калинина Т. М., Флеров В. С., Петрухин В. Я.* Сб. Хазария в кросскультурном пространстве: историческая география, крепостная архитектура, выбор веры. 2014. М.: Рукописные памятники Древней Руси. 208 с.

5. *Флеров В. С.* Византийское в нижне-донских крепостях Хазарского каганата // Сб. статей к 60-летию проф. С. Б. Сорочана. Харьков, 2013. С. 474–502

6. *Дьячков-Тарасов А. Н.* Неизвестный торговый путь из Хорезма в Византию через Кавказ // Новый Восток. 1930. Т. 28. С. 148–156.

7. *Алексеева Е. П.* Древняя и средневековая история Карачаево-Черкесии. М: Наука, 1971. 355 с. URL: http://www.elbrusoid.org/library/history/400995/ (дата обращения: 07.09.2024).

8. *Абдоков А. И.* Откуда пошло название «Кабарда»? // Мир культуры. Вып. 1. Нальчик: 1990. С. 142–143. URL: https://www.adygi.ru/index.php?newsid=8805 (дата обращения: 13.10.2024).

9. *Дюбуа де Монпере Фредерик.* Путешествие вокруг Кавказа. Т. I. Сухуми: 1937. С. 23–24. URL: file:///C:/Users/user/Downloads/dubua_de_monpere_f_puteshestvie_vokrug_kavkaza_1937.pdf (дата обращения: 22.10.2024)

10. *Кузнецов В. А.* Надписи Хумаринского городища // Советская археология. 1963. № 1. С. 298–305.

11. *Кузнецов В. А.* Аланские племена Северного Кавказа. М.: АН СССР, 1962. 164 с.

12. *Челеби Эвлия.* Книга путешествия (Извлечения из сочинения турецкого путешественника XVII века). Перевод и комментарии. Вып. 2. Земли Северного Кавказа, Поволжья и Подонья. 106 с. URL: https://www.rulit.me/books/kniga-puteshestviya-vypusk-2-zemli-severnogo-kavkaza-povolzhya-i-podonya-read-677241-38.html

13. Российский государственный архив древних актов. Ф. 115. 1642 г. № 1. Л. 224.

14. *Биджиев Х. Х.* Хумаринское городище / под ред. Плетневой С. А. Черкесск: Карачаево-Черкесское отделение Ставропольского книжного издательства, 1983. 226 с.

15. *Абрамова М. П.* Поселение скифского времени у аула Хумара на Верхней Кубани // Древности Северного Кавказа. М.: Институт археологии РАН, 1999. С. 89–102. URL: https://instituteofhistory.ru/media/library/publication/files (дата обращения: 12.09.2024).

16. *Гутнов Ф. Х.* Рецензия на брошюру Тахира Моллаева «Новый взгляд на историю осетинского народа». URL: http://генофонд.рф/?page_id=5920

17. Нарты. Адыгский героический эпос. М.: Наука, 1974. 415 с.

18. *Кочкаров У. Ю., Жуковский М. О.* Некоторые вопросы планиграфии и системы укреплений Хумаринского городища // Вестник ВолГУ. Серия 4: История. Регионоведение. Международные отношения. 2020. Т. 25. № 4. С. 225–235. DOI: 10.15688/jvolsu4.2020.4.15

19. *Протоиерей Георгий Флоровский.* Преподобный Максим Исповедник. Житие и творения // Византийские отцы V–VIII вв. Минск. Изд-во Белорусского Экзархата. 2006. 335 с. URL: https://azbyka.ru/otechnik/Georgij_Florovskij/vizantijskie-ottsy-v-viii-vekov/10 (дата обращения: 15. 09.2024).

20. *Виноградов А. Ю.* Еще раз к вопросу о месте ссылки, кончины и погребения прп. Максима Исповедника и его спутников // Богословские труды. 2013. Вып. 45. URL: https://azbyka.ru/otechnik/Maksim_Ispovednik/eshhe-raz-k-voprosu-o-meste-ssylki-konchiny-i-pogrebenija-prp-maksima-ispovednika-i-ego-sputnikov/#source (дата обращения: 19.08.2024).

21. *Мамхегов А. Б.* Материалы к биографии действительного статского советника Д. С. Кодзокова // Кавказология. 2019. № 1. С. 95–122. DOI: 10.31143/2542-212X-2019-1-95-122

22. Центральный государственный архив КБР. Ф. 1209. Оп. 14 доп. Д. 31.

23. Сборник документов по сословному праву народов Северного Кавказа, 1793–1897 гг.: в 2-х т. Т. 2 / Сост. Х. М. Думанов и др. Нальчик: Эль-Фа, 2003. 343 с.

24. Центральный государственный архив РСО-Алания [Ф. 262. Оп. 1. Д. 71. Л. 74 об. 75].

25. Основные административно-территориальные преобразования на Кубани (1793–1985 гг.). Краснодар: 1986. 98 с. URL: https://adm-kush.ru/administratsiya/podrazdeleniya/files/ KnigaN1.pdf (дата обращения 12.09.2024).

26. Государственный архив Краснодарского края [Ф-774. оп. 2, ед. хр. 116, л. 10-10 об.].

27. Победители. Ставрополь: Ставропольсервисшкола, 2005. 280 с. URL: http://www.elbrusoid.org/upload/iblock/e29/e2904d07458c4aa37afe4ed1d03e5e82.pdf (дата обращения: 17.10.2024).

28. *Данилова Е. Н.* Абазины. Историко-этнографическое исследование хозяйства и общинной организации. XIX век. М.: Изд-во Московского университета, 1984 г. 144 с. URL:http://apsnyteka.org/1539-danilova_e_abaziny.html#3 (дата обращения: 29. 10.2024)

29. *Кожев З. А.* Черкесское (адыгское) коневодство и всадническая традиция // Исторический вестник. Нальчик, 2012. Вып. XI. С. 3–26.

30. *Баков Х. И.* О творческой судьбе первого черкесского романиста Халида Абукова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: филология и искусствоведение. 2018. Вып. 1(212). С. 111–115. EDN: XPTVUT

31. Большой террор в Абхазии (Абхазская АССР): 1937–1938 гг. Сухум, 2017. Т. 1. С. 119. https://iverieli.nplg.gov.ge/bitstream/1234/258736/1/Bolshoi_Teror_V_Abxazii_Tom_I.pdf (дата обращения: 07.10.2024).

REFERENCES

1. *Pis'mo Anastasiya Apokrisiariya Feodosiyu Gangrskomu. Ispovednik Prepodobnyy Maksim* [Letter of Anastasius Apocrisiarius to Theodosius of Gangra. Confessor Venerable Maximus]. URL: https://religion.wikireading.ru/hRYjKiPtHG (date of access: 12.10.2024). (In Russian)

2. Kartlis Tskhovreba (history of Georgia). Tbilisi: Artanuji. 2008. P. 126. URL: http://science.org.ge/old/books/Kartlis%20cxovreba/Kartlis%20Cxovreba%202012%20Rus.pdf (date of access: 12.10.2024). (In Russian)

3. Constantine Bagryanorodnyy. *Ob upravlenii imperiyey (948–952 gg)* [On the governance of the empire (948–952)]. *Vostochnaya literatura. Srednevekovyye istoricheskiye istochniki Vostoka i Zapada* [Eastern literature. Medieval historical sources of the East and West]. URL: https:// www.vostlit.info/Texts/rus11/Konst_Bagr_2/frametext42.htm (date of access 09/25/2024). (In Russian)

4. Kalinina T.M., Flerov V.S., Petrukhin V.Ya. *Sb. Khazariya v krosskul'turnom prostranstve: istoricheskaya geografiya, krepostnaya arkhitektura, vybor very* [Collection Khazaria in the cross-cultural space: historical geography, fortress architecture, choice of faith]. 2014. M.: Rukopisnyye pamyatniki Drevney Rusi. ISBN: 978-5-9905759-2-9. 208 p. (In Russian)

5. Flerov V.S. Byzantine in the lower Don fortresses of the Khazar Kaganate. *Sb. statey k 60-letiyu prof. S. B. Sorochana* [Collection of articles for the 60th anniversary of prof. S.B. Sorochan]. Kharkov, 2013. Pp. 474–502. (In Russian)

6. Dyachkov-Tarasov A.N. Unknown trade route from Khorezm to Byzantium via the Caucasus. *Novyy Vostok* [Novy Vostok]. 1930. Vol. 28. P. 148–156. (In Russian)

7. Alekseeva E.P. *Drevnyaya i srednevekovaya istoriya Karachayevo-Cherkesii* [Ancient and medieval history of Karachay-Cherkessia]. Moscow: Nauka, 1971. 355 p. URL: http://www.elbrusoid.org/library/history/400995/ (date of access: 09/07/2024). (In Russian)

8. Abdokov A.I. Where did the name "Kabarda" come from? *Mir kul'tury* [World of Culture]. No. 1. Nalchik: 1990. Pp. 142–143. URL: https://www.adygi.ru/index.php?newsid=8805 (accessed 13.10.2024). (In Russian)

9. Dubois de Montpere, Frederic. *Puteshestviye vokrug Kavkaza* [Journey around the Caucasus]. Vol. I. Sukhumi: 1937. Pp. 23–24. URL: file:///C:/Users/user/Downloads/dubua_de_monpere_f_puteshestvie_vokrug_kavkaza_1937.pdf (accessed on 22.10.2024). (In Russian)

10. Kuznetsov V.A. Inscriptions of the Khumara settlement. *Sovetskaya arkheologiya* [Soviet archeology]. 1963. No. 1. Pp. 298–305. (In Russian)

11. Kuznetsov V.A. *Alanskiye plemena Severnogo Kavkaza* [Alanian tribes of the North Caucasus]. Moscow: AN SSSR, 1962. 164 p. (In Russian)

12. Chelebi Evliya. *Kniga puteshestviya (Izvlecheniya iz sochineniya turetskogo puteshestvennika XVII veka). Perevod i kommentarii* [The Book of Travel (Extracts from the work of a Turkish traveler of the 17th century). Translation and commentary]. No. 2. Zemli Severnogo Kavkaza, Povolzh'ya i Podon'ya. 106 p. URL: https://www.rulit.me/books/kniga-puteshestviya-vypusk-2-zemli-severnogo-kavkaza-povolzhya-i-podonya-read-677241-38.html (In Russian)

13. *Rossiyskiy gosudarstvennyy arkhiv drevnikh aktov* [Russian State Archive of Ancient Acts]. F. 115. 1642. No. 1. L. 224. (In Russian)

14. Bidzhiev Kh. Kh. *Khumarinskoye gorodishche (pod red. Pletnevoy S. A.)* [Khumara settlement (ed. by Pletneva S.A.)] Cherkessk: Karachayevo-Cherkesskoye otdeleniye Stavropol'skogo knizhnogo izdatel'stva, 1983. 226 p. (In Russian)

15. Abramova M.P. Scythian-era settlement near the Khumara village in the Upper Kuban. *Drevnosti Severnogo Kavkaza* [Antiquities of the North Caucasus]. Moscow: Institut arkheologii RAN. 1999. Pp. 89–102. URL: https://instituteofhistory.ru/media/library/publication/files (accessed: 12.09.2024). (In Russian)

16. Gutnov F.Kh. *Retsenziya na broshyuru Takhira Mollayeva «Novyy vzglyad na istoriyu osetinskogo naroda»* [Review of the brochure by Takhir Mollaev "A New Look at the History of the Ossetian People"]. URL: http://генофонд.рф/?page_id=5920. (In Russian)

17. *Narty. Adygskiy geroicheskiy epos* [Narty. Adyghe Heroic Epic]. Moscow: Nauka, 1974. 415 p. (In Russian)

18. Kochkarov U.Yu., Zhukovsky M.O. Some issues of the planigraphy and fortification system of the Khumara settlement. *Vestnik VolGU. Seriya 4: Istoriya. Regionovedeniye. Mezhdunarodnyye otnosheniya.* [Bulletin of VolSU. Series 4: History. Regional Studies. International Relations]. 2020. Vol. 25. No. 4. Pp. 225–235. DOI: 10.15688/jvolsu4.2020.4.15. (In Russian)

19. Protoierey George Florovsky. *Prepodobnyy Maksim Ispovednik. Zhitiye i tvoreniya* [Reverend Maximus the Confessor. Life and Works]. *Vizantiyskiye ottsy V–VIII vv.* [Byzantine Fathers of the 5th–8th Centuries]. Minsk: Izd-vo Belorusskogo Ekzarkhata. 2006. 335 p. URL: https://azbyka.ru/otechnik/Georgij_Florovskij/vizantijskie-ottsy-v-viii-vekov/10 (accessed: 15.09.2024). (In Russian)

20. Vinogradov A.Yu. Once again on the question of the place of exile, death and burial of St. Maximus the Confessor and his companions. *Bogoslovskiye trudy* [Theological Works]. 2013. No. 45. URL: https://azbyka.ru/otechnik/Maksim_Ispovednik/eshhe-raz-k-voprosu-o-meste-ssylki-konchiny-i-pogrebenija-prp-maksima-ispovednika-i-ego-sputnikov/#source (date of access: 19.08.2024). (In Russian)

21. Mamkhegov A.B. Materials for the biography of the actual state councilor D.S. Kodzokov. *Kavkazologiya* [Kavkazology]. 2019. No. 1. Pp. 95–122. DOI: 10.31143/2542-212X-2019-1-95-122. (In Russian)

22. *Tsentral'nyy gosudarstvennyy arkhiv KBR* [Central State Archives of the Kabardino-Balkarian Republic]. F. 1209. Op. 14 add. D. 31. (In Russian)

23. *Sbornik dokumentov po soslovnomu pravu narodov Severnogo Kavkaza, 1793–1897 gg*. Vol. 2. [Collection of documents on the class law of the peoples of the North Caucasus, 1793–1897]. Vol. 2. Comp. H. M. Dumanov et al. Nalchik: El-Fa, 2003. 343 p. (In Russian)

24. *Tsentral'nyy gosudarstvennyy arkhiv RSO-Alaniya* [Central State Archives of the Republic of North Ossetia-Alania]. [F. 262. Op. 1. D. 71. L. 74 ob. 75]. (In Russian)

25. *Osnovnyye administrativno-territorial'nyye preobrazovaniya na Kubani (1793–1985 gg.)* [The main administrative-territorial transformations in Kuban (1793–1985)]. Krasnodar, 1986. 98 p. URL: https://adm-kush.ru/administratsiya/podrazdeleniya/files/ KnigaN1.pdf (date of access 12.09.2024). (In Russian)

26. *Gosudarstvennyy arkhiv Krasnodarskogo kraya* [State archives of Krasnodar krai]. [F-774. op. 2, unit. chr. 116, p. 10-10 rev.]. (In Russian)

27. *Pobediteli* [Winners]. Stavropol: Stavropol'servisshkola, 2005. 280 p. URL: http://www.elbrusoid.org/upload/iblock/e29/e2904d07458c4aa37afe4ed1d03e5e82.pdf (accessed: 17.10.2024). (In Russian)

28. Danilova E.N. *Abaziny. Istoriko-etnograficheskoye issledovaniye khozyaystva i obshchinnoy organizatsii. XIX vek* [Abazins. Historical and ethnographic study of the economy and

community organization. XIX century]. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1984. 144 p. URL: http://apsnyteka.org/1539-danilova_e_abaziny.html#3 (date of access: 29. 10.2024). (In Russian)

29. Kozhev Z.A. Circassian (Adyghe) horse breeding and equestrian tradition. *Istoricheskiy vestnik* [Historical Bulletin]. Nalchik, 2012. No. XI. Pp. 3–26. (In Russian)

30. Bakov Kh.I. On the creative fate of the first Circassian novelist Khalid Abukov. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: filologiya i iskusstvovedeniye* [Bulletin of Adyghe State University. Series: Philology and Art Criticism]. 2018. No. 1(212). Pp. 111–115. EDN: XPTVUT. (In Russian)

31. *Bol'shoy terror v Abkhazii (Abkhazskaya ASSR): 1937–1938 gg*. [The Great Terror in Abkhazia (Abkhaz ASSR): 1937–1938]. Sukhum, 2017. Vol. 1. P. 119. https://iverieli.nplg.gov.ge/bitstream/1234/258736/1/Bolshoi_Teror_V_Abxazii_Tom_I.pdf (accessed: 07.10.2024). (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Гукемух Ибрагим Халидович, канд. ист. наук, науч. сотр., Центр естественно-научных методов в археологии, антропологии и археографии, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
IBRAGUK22@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7908-6463, SPIN-код: 2415-2346

Information about the author

Ibragim Kh. Gukemukh, Candidate of Historical Sciences, Researcher, Center for Natural Science Methods in Archaeology, Anthropology and Archaeography, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
IBRAGUK22@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7908-6463, SPIN-code: 2415-2346

ФИЛОЛОГИЯ

УДК 811.512.142 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-363-368
EDN: XSOTAO

Народные названия растений в цокающем диалекте карачаево-балкарского языка

Л. Б. Кучмезова

Институт гуманитарных исследований –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18

Аннотация. Статья посвящена исследованию названий растений, которые встречаются в цокающем диалекте карачаево-балкарского языка. В работе исследуются такие геоботанические единицы, которые отражают богатство и разнообразие карачаево-балкарского языка. Словарные единицы рассматриваются в этимологическом аспекте, а также выявляются их словообразовательные структуры и закономерности смысловых и формальных связей. На примере народных названий растений приведены многозначные и изосемантические ряды слов, относящихся к флористической терминологии.

Ключевые слова: народные названия, флористическая терминология, структура слова, цокающий диалект, словообразовательные особенности, инвентарные единицы

Поступила 09.10.2024, одобрена после рецензирования 19.11.2024, принята к публикации 02.12.2024

Для цитирования. Кучмезова Л. Б. Народные названия растений в цокающем диалекте карачаево-балкарского языка // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 363–368. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-363-368

Original article

Folk names of plants in the click dialect of the Karachay-Balkar language

L.B. Kuchmezova

Institute of Humanitarian Researches –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street

Abstract. The article is devoted to the study of the names of plants that occur in the click dialect of the Karachay-Balkar language. The paper examines such geobotanical units that reflect the richness and diversity of the Karachay-Balkar language. Dictionary units are considered in an etymological aspect, and their word-formation structures and patterns of semantic and formal connections are revealed. Using the example of folk names of plants, polysemantic and isosemantic series of words related to floral terminology are given.

Keywords: folk names, floral terminology, word structure, clink dialect, word-formation features, inventory units

Submitted 09.10.2024, approved after reviewing 19.11.2024, accepted for publication 02.12.2024

For citation. Kuchmezova L.B. Folk names of plants in the click dialect of the Karachay-Balkar language. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 363–368. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-363-368

© Кучмезова Л. Б., 2024

Введение

В исследуемом языке названия растений представляют обширный материал для исследования в различных аспектах. Эта лексическая группа вызывает интерес ученых древностью своего происхождения [9, с. 4]. Народная флористическая терминология балкарцев очень разнообразна. Она включает в себя названия деревьев и кустарников, а также трав, растущих в высокогорье. Однако в современном карачаево-балкарском языке отсутствуют исследования, посвященные специальному их изучению. В первую очередь, кажется, нужно обратиться к таким терминам, которые тесно связаны с внешней стороны с бытом и культурой балкарского народа.

Поскольку в работе анализируются названия растений и кустарников, источниками служат диалектные словари и записи диалектной речи. Народные названия растений впервые использованы в произведениях Д.М. Таумурзаева.

В процессе работы автором были использованы материалы картотеки сектора карачаево-балкарского языка, собранные для ТСКБЯ в трех томах, «Краткий словарь малкарского (Ц/З) диалекта» [2] и др.

Для растений, являющихся исконными или хорошо знакомыми местному населению, число названий и их разнообразие (разносторонность семантической характеристики таких растений) значительно больше, чем для малоизвестных.

Основу лексико-семантических моделей названий растений, относящихся к их анатомии, составляют реальные свойства этих растений и их составных частей – форма, цвет, вкус плодов, характер цветения, оттенки цвета листьев, ствола, их форма, прочность древесины и коры и т.д.

Среди лексико-семантических моделей растений имеются основы, восходящие к глаголам, что особенно характерно для старых пластов лексики цокающего диалекта. С одной стороны, встречаются модели, построенные по принципу сходства с общеизвестными. В целом наблюдается перенесение видового наименования растения на родовое.

Как отмечает Л.Б. Семенова, «Основу (ядро) составляют лексемы общетюркского происхождения, однако есть слова, образованные на чисто карачаево-балкарской основе, это подчеркивает их самостоятельную жизнедеятельность на определенной этнотерритории» [5, с. 5].

В статье исследуются наименования, встречающиеся в Верхнебалкарском высокогорье и отмеченные в фольклорно-этнографических произведениях собирателя фольклора Д. Таумурзаева. Привлекаются для сравнения и литературные наименования: **гедгин** (лит.) / **агъач гедгин / хуржели** (ц.-диал.) ХУРЖЕЛИ ат. **Съедобное растение, напоминающее укроп / Ашаргъа жараучу, жыгырагъа ушагъан ханс.** Примеры: **Зына ёзенинде хуржели жыяргъа чыкъгъан, сабийчикле чаукалача эсленедиле** «*В поляне Зына детишки, вышедшие собирать съедобное растение, похожее на укроп, напоминали грачей, галок*».

К числу отличительных признаков растительного многообразия Верхней Балкарии относятся словообразовательные особенности фитонимической лексики, употребляемые в карачаево-балкарской художественной литературе (на материале цокающего диалекта), аффиксация: **хурже-ли** «*съедобное растение, напоминающее укроп*», **ёрюм-дюк** «*берёза*», **шыкъе-ли** «*дерево, растущее на скале*» и др.; словосложение: **итбурун** «*шиповник*», **кюцюк цапыракъ** «*подорожник*» и др. Эти конструкции представляют собой лексикализованные сочетания, в которых отмечается потеря компонентного значения. Они употребляются по этой причине в едином значении. Особенностью этих конструкций является то, что нет лексико-семантической связи между значениями лексикализованных и свободных словосочетаний.

В карачаево-балкарском языке в произведениях художественной литературы, написанных на цокающем диалекте, встречаются названия растений, которые употребляются

только в ареале носителей цокающего диалекта. Их словообразовательной особенностью является то, что к линейным единицам морфологии присоединяются инвентарные единицы – различные словообразовательные аффиксы, участвующие в организации частеречной принадлежности геоботанических терминов.

В произведениях Далхата Таумурзаева – собирателя фольклорных материалов, встречаются именно такие основы, характеризующие особенности растительного мира верхнебалкарского ареала. Он является исследователем, который обращает внимание и на морфологические особенности фитонимической лексики, встречающейся только в районах высокогорья: **къайын ёрюмдюк** «*березовое деревце*», **белауу жёге** «*белоствольная осина*», **жёнгертме** «*пень*», **штанкъул** «*растение, растущее возле реки, со съедобными корнями*», **шанкъурт** «*съедобное растение*», **шыкъели эркек** «*одинокое дерево, растущее на скале*», **хомпутай / ханкютей / агъац кертме** «*боярышник*», **залкъыды/ залыкъылды** «*рододендрон*», **цыгъанек** «*колючка*», **къылкъы** «*игла*», **бурцакъ / къудору** «*фасоль*», **тошлакъ** «*гриб*», **терекни хууурунда** «*в сердцевине древесины/ дерева*», **мыстыкъулакъ / къозукъулакъ** «*щавель*», **бидиш** «*злаковое растение, похожее на пшеницу*», **зыгыра** «*съедобное растение, напоминающее укроп*», **балам / муртку** «*калина*» и др. Слово **балам** является общетюркской лексемой, встречающейся в башкирском и татарском языках в форме **балан** «*калина*». Так, в татарском языке, например, **балан** «*калина*» встречается в составе словосочетания **кара балан** «*гордовина*», «*черная калина*» [3, с. 98]. В карачаево-балкарском литературном языке слово **балам** не встречается, употребляется **муркку/ муртку/ мурукку**.

Например: ***Неда жаз биченлик сакълагъан заманча болуп, сабийле биченликге зыгыра жыяргъа къояр эсе деп, тилеп сёлешир эдил***е «*Или как будто пора ожидания сенокоса, дети приходили и просили разрешить собирать съедобное растение, напоминающее укроп*» [7, с. 9].

Эти слова, которые перечисляются в фольклорно-этнографических произведениях Далхата Таумурзаева, собранных в 70-80-х годах, в литературном обиходе не встречаются. Поэтому имеют важное научно-практическое значение в описании историко-этнографических терминов.

Скорее всего, под словом *зыгыра* Далхат Таумурзаев подразумевает *хуржели*, из листьев которого готовят балкарские хычины (*пироги*).

Кроме того, особенностью его произведений является то, что он фиксирует в них не только словообразовательные формы, но и словоизменительные. Отмечая словообразовательные особенности верхнебалкарского мира, он не оставляет без внимания и названия, которые имеют колоративные особенности, активно участвующие в образовании геоботанических терминов, которые напрямую участвуют в обогащении лексики карачаево-балкарского языка. Например: **Шережени чынар кюйдюргюч, къайын (мырзы, шаумырзы, къарамырзы, акъмырзы) агъачладан ишлейдиле** «*Лыжи изготавливали из чинара, ясени, березы белоствольной, вяза, березняка*» [7, с. 7].

Словообразовательные особенности фитонимической лексики цокающего диалекта в его произведениях отражаются не только в составе свободных и лексикализованных словосочетаний, идиом фразеологического типа, но и в пословицах и поговорках, паремий, употребляемых в многочисленных произведениях Далхата Таумурзаева. Примеры: **Балдыргъан башын жыйгъан санар, батыр а жыкъгъанларын тергер** «*Собирающий борщевик, посчитает количество, а храбрец – тех, кого поборол*»; **Къызынг мурса жыя билмей эсе, федугугъа жиберме** «*Если твоя дочь не может собрать крапиву, незачем отправлять ее за лебедой (разновидность лебеды, из которой балкарцы готовят хычины)*»; **Алысын мурсача кюйдюрме, къул адамча сюйюнме**

«*Не жги, как молодая крапива, не веди себя, как холоп*»; **Къаяда тамыр къазса да, нарт ачлыкъ сынамаз** «*Нарт не испытает голода, даже если будет копать коренья в горах*»; **Нарт къубултхан жерде бюртюк ёседи** «*Там, где нарт говорит красиво, прорастает зерно*»; **Ажаллыгъа тары бюртюк сылтау болур** «*Кому суждено уйти, тому причиной станет зернышко проса*»; **Къургъакъ жерде ханс ёсмез, къызгъанчха ырысхы къонмаз** «*В сухой земле трава не прорастет, а скупой не разбогатеет*»; **Тели ханс бийик ёседи** «*Сорная трава высоко растет*»; **Адамны кёркем этген кийимди, терекни кёркем эткен а – чапыракъ** «*Человека украшает одежда, а дерево – листва*» [8, с. 427, 428, 431, 435, 437].

Эти словообразовательные особенности как с растительным компонентом, так и без него, в литературном карачаево-балкарском языке не встречаются: примеры: **балам** «*калина*», **федугу (федгу)** «*разновидность лебеды, из которой готовили хычины*», **залкъыды/ залыкъылды** «*рододендрон*» [2, с. 48], **шанкъурт** «*съедобное растение*», **мыстыкъулакъ/ къозукъулакъ** «*щавель*», **бурцакъ** «*фасоль*», **тошлакъ** «*гриб*», **хуржели** «*дикий укроп*», **зыка** «горчица дикая» [1, с. 24], **хомпутай/ ханкютей/ жабышмакъ** «*бояръышник*», **штанкъул** «*растение, растущее возле реки, со съедобными корнями*», **балдыргъан / тели балдыргъан** «*анис, борщевик*». Это слово употребляется в литературном языке, в ц-диалекте употребляется *тели балдыргъан* – производное словосочетание, является ядовитым растением, при попадании жидкости на кожу человека вызывает ожоги. В других тюркских языках *тели балдыргъан* не встречается. *Балдыргъан* является съедобным растением, а *тели балдыргъан* – ядовитым.

Если в карачаево-балкарском языке встречается словосочетание «итбурун» в художественных произведениях верхнебалкарских писателей, то в остальных тюркских языках участвует и в других словосочетаниях. Сложное слово итбурун в исследуемом языке является регтонализмом (карачаизмом). «…Слово **ит** «собака» (к.-балк., кирг.) в различных фонетических вариантах ийт «собака» (ног.), йит «собака» (караим.), эт «собака» (тат., башк.) является одним из наиболее значимых базовых терминов в тюркских языках, известных с древнейших времен своей употребительностью, начиная с памятников древнетюркской рунической письменности. С его участием образовалось во всех языках огромное количество свободных словосочетаний, большинство из которых впоследствии перешли в лексикализованные. Значительное место занимает слово ит «собака» во фразеологии тюркских языков – то, что оно оседает в устойчивых конструкциях, интегрирующих в себе семантические оттенки лексических значений различных терминов.

Слово ит «собака» активно употреблялось и употребляется в тюркских языках как в нарицательной лексике, так и в именах собственных, оно активно функционирует в литературных языках, диалектных формах, в языке художественных и фольклорных произведений, участвует в создании определенных участков национально-культурной картины мира тюркских народов» [4, с. 146].

В работе известного ученого Б. А. Мусукова «слово ит «собака» участвует в образовании лексикализованных словосочетаний, являющихся названиями растений, например, it тумчугу (tel, Радл..), it пурду (shor., Радл..), it буруну (osm. Радл.), it бурун (тов., Радл.), it мурун (kir., Радл.), «шиповник»; it ỏdỹ (tel., Радл.) «собачки» (растение); it когун (ot., Радл.) «дикий виноград», it ŭzŭmi «дикий виноград» (Rach II 180a, 2_{67}); ит бурун «шиповник» (кум.); ийт сарымсак бот. «чеснок»; ийт бурын бот. «шиповник»; ийт юва бот. «собачий лук» (ног.); эт шомырты «крушина»; эт эчеге «вьюнок полевой»; эт тигинеге бот. «череда трехраздельная» (тат.); ит тили чапыракъ бот «подорожник» (карач.); ср. еще балк. Кючюк чапыракъ «подорожник» (к.-балк.) и др. [4, с. 147].

В Толковом словаре карачаево-балкарского языка отмечено *итбурун* ат *ц.диал*. къ. улёкъу; *итбурун терек ц.диал*. (къ.улёкъу). [6, с. 132].

В тюркских языках, начиная со времени памятников древнетюркской письменности, активно участвует в образовании не только нарицательной лексики, но и широкоупотребительных ономастических терминов, имеющих тесную связь с этнографическими, культурно-историческими, географическими особенностями тюркских этнических племен и родов. …Среди различных тотемов, функцию которых выполняли названия волков, птиц и некоторых растений, можно встретить и название собаки, в связи с чем неслучайны распространенные тюркские двусложные имена, в составе которых присутствует слово ит «собака» [3, 148].

Заключение

Таким образом, во многих названиях растений, употребляемых в ц-диалекте и встречающихся в фольклорных произведениях Далхата Таумурзаева, отмечаются как словообразовательные процессы с участием аффиксальных морфем, так и функционирование словосложительных моделей. В названиях геоботанических единиц выделяются лексемы, характерные для определенного ареала. Следует подчеркнуть, что исследование флористической терминологии позволяет глубже понять представление о растительном мире балкарского народа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахматова С. С*. Словарь природы: Карачаево-балкарско-русский и русско-карачаево-балкарский словарь. Нальчик: Эльбрус, 2009. 144 с.

2. *Гузеев Ж. М., Махиева Л. Х*. Краткий словарь малкарского (Ц/З) диалекта карачаево-балкарского языка. Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2015. 149 с.

3. *Мусуков Б. А*. Формально-семантическая парадигма колоративной лексики в тюркских языках: монография. Нальчик: Binding2016, 2023. 163 с. ISBN: 978-5-6051-0031-7

4. *Мусуков Б. А*. Лексико-семантическое поле слова *ит* «собака» в тюркских языках // Проблемы сохранения языка и культуры в условиях глобализации: Материалы VII международного симпозиума «Языковые контакты Поволжья»: на рус. и тат. языках, 2–5 июля 2008. Казань: Казанский гос. университет, 2009. 412 с.

5. *Семенова Л. Б*. Фитонимия карачаево-балкарского языка: автореф. дисс. ... канд. филол. наук. Махачкала, 2011. 23 с.

6. *Толковый* словарь карачаево-балкарского языка: в 3-х томах / Под ред. Ж. М. Гузеева. Т. 2. З–Р. Нальчик: Эль-ФА, 2002. 1171 с.

7. *Таумурзаев Д. М*. Кто раньше? Нальчик: Эльбрус, 1978. 80 с.

8. *Таумурзаев Д. М*. Асмаран. Нальчик: Тетраграф, 2015. 456 с.

9. *Хайрутдинова Т. Х*. Народные названия растений в татарском языке. Казань: Фикер, 2004. 222 с.

REFERENCES

1. Akhmatova S.S. *Slovar prirody: Karachaevo-balkarsko-russkiy i russko-karachaevo-balkarskiy slovar`* [Dictionary of nature: Karachay-Balkar-Russian and Russian-Karachay-Balkar dictionary]. Nalchik: Elbrus, 2009. 144 p. (In Russian, Karachay-Balkar)

2. Guzeev Zh.M., Makhieva L.Kh. *Kratkiy slovar` malkarskogo (Cz/Z) dialekta karachaevo-balkarskogo yazyka.* [A short dictionary of the Malkar (C/W) dialect of the Karachay-Balkar language]. Nalchik: Izd-vo KBNC RAN, 2015. 149 p. (in Karachay-Balkar)

3. Musukov B.A. *Formal`no-semanticheskaya paradigma kolorativnoy leksiki v tyurkskih yazy`kah* [The formal semantic paradigm of coloristic vocabulary in the Turkic languages]: a monograph. Nalchik: Binding 2016, 2023. 163 p. ISBN: 978-5-6051-0031-7. (In Russian)

4. Musukov B.A. *Leksiko-semanticheskoe pole slova it «sobaka» v tyurkskih yazykah* [The lexical and semantic field of the word IT "dog" in the Turkic languages]. *Problemy sohraneniya yazyka i kultury v usloviyah globalizacii* [Problems of preserving language and culture in the context of globalization]: materials of the VII International Symposium "Language contacts of the Volga region"]. Kazan, 2008. Nauch. red. I.A. Gilyazov. Kazan: Kazan. gos. un-t, 2009. 412 p. (In Russian, Tatar)

5. Semenova L.B. *Fitonimiya karachaevo-balkarskogo yazyka* [Phytonymy of the Karachay-Balkar language reference]: Avtoref. diss. … kand. filol. nauk. Makhachkala, 2011. 23 p. (In Russian)

6. *Tolkovyi slovar karachayevo-balkarskogo yazyka* [Explanatory dictionary of the Karachay-Balkarian language]: in 3 vol. Pod red. Zh. M. Guzeeva. Vol. 2. Z–R. Nalchik: El-FA, 2002. 1171 p. (In Karachay-Balkar)

7. Taumurzaev D.M. *Kto ran'she?* [Who was earlier?]. Nalchik: El'bruc, 1978. 80 p. (In Karachay-Balkar)

8. Taumurzaev D.M. Asmaran. Nalchik: Tetragraf, 2015. 456 p. (In Karachay-Balkar)

9. Khairutdinova T.Kh. *Narodnye nazvaniya rasteniy v tatarskom yazyke* [Folk names of plants in the Tatar language]. Kazan: Ficker, 2004. 222 p. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Кучмезова Лариса Борисовна, канд. филол. наук, ст. науч. сотр., сектор карачаево-балкарского языка, Институт гуманитарных исследований – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

larisakuchmezova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7384-1455, SPIN-код: 3634-1757

Information about the author

Larisa B. Kuchmezova, Candidate of Philological Sciences, Senior Researcher, The Karachay-Balkar language Sector, Institute of Humanitarian Researches – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street;

larisakuchmezova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7384-1455, SPIN-code: 3634-1757

ФИЛОЛОГИЯ

УДК 398+811.512.142 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-369-381
EDN: YJBXUN

Функциональная роль алгышей (благопожеланий) и каргышей (проклятий) в карачаево-балкарских историко-героических песнях

Ж. М. Локьяева

Институт гуманитарных исследований –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18

Аннотация. В статье проводится анализ функционирования благопожеланий и проклятий в карачаево-балкарских историко-героических песнях. Отмечается, что они служат индикаторами моральных ориентиров, социальных норм и исторической памяти, демонстрируя представления о добре и зле, справедливости и несправедливости, а также о народных идеалах в различные исторические эпохи. Материалом для исследования послужили тексты заявленных жанров, выявленные методом сплошной выборки. Благопожелания и проклятия в историко-героических песнях являются важными инструментами социальной коммуникации, укрепляющими коллективную память и этноидентичность, а также оказывающими влияние на формирование ценностных ориентиров в традиционном обществе. Исследование показало, что в анализируемых текстах сохраняется значительный объем закодированной информации, отражающей языковую и этническую картину мира карачаевцев и балкарцев. Кроме того, оно будет способствовать более глубокому пониманию символической функции *алгышей* и *каргышей* как выразительных средств в историко-героической поэзии и их воздействия на реципиента в части осмысления исторических событий и уроков нравственности.

Ключевые слова: карачаево-балкарский фольклор, историко-героические песни, благопожелания, проклятия

Поступила 15.10.2024, одобрена после рецензирования 21.11.2024, принята к публикации 03.12.2024

Для цитирования. Локьяева Ж. М. Функциональная роль алгышей (благопожеланий) и каргышей (проклятий) в карачаево-балкарских историко-героических песнях // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 369–381. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-369-381

Original article

The functional role of algysh (benevolence) and kargysh (curses) in Karachay-Balkar historical and heroic songs

Zh.M. Lokyaeva

Institute of Humanitarian Researches –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street

Abstract. The article analyzes the functioning of benevolence and curses in Karachay-Balkar historical and heroic songs. It is noted that they serve as indicators of moral guidelines, social norms and historical memory, demonstrating ideas about good and bad, justice and injustice, as well as folk ideals in various historical epochs. The texts of the declared genres, identified by the continuous sampling method, served as the material for the study. Benevolence and curses in historical and heroic songs are

© Локьяева Ж. М., 2024

important tools of social communication, strengthening collective memory and ethnic identity, as well as influencing the formation of value orientations in traditional society. The study showed that the analyzed texts retain a significant amount of encoded information reflecting the linguistic and ethnic picture of the world of the Karachais and Balkars. In addition, it will contribute to a deeper understanding of the symbolic function of lgysh and kargysh as expressive means in historical-heroic poetry and their suggestive impact on the recipient in terms of understanding historical events and moral lessons.

Keywords: Karachay-Balkar folklore, historical and heroic songs, benevolence, curses

Submitted 15.10.2024, approved after reviewing 21.11.2024, accepted for publication 03.12.2024

For citation. Lokyaeva Zh.M. The functional role of algysh (benevolence) and kargysh (curses) in Karachay-Balkar historical and heroic songs. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 369–381. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-369-381

Введение

Карачаевцы и балкарцы на протяжении многих столетий создавали песенный фольклор, который отличался жанровым многообразием. Народная поэзия горцев отражает глубокие культурные и исторические традиции, охватывая широкий спектр тем – от героических подвигов до философских размышлений о жизни и смерти.

Важной частью устной традиции этноса являются историко-героические песни, игравшие ключевую роль в сохранении и передаче культурных, моральных и социальных ценностей. В этих фольклорных эпических и лиро-эпических повествованиях «... воспевается история народа. Эти песни имеют историческую мотивировку, описывают реальных личностей, отображают конкретные территориальные названия» [1, с. 473]. Также они выполняют значимые функции, связанные с выражением народной этики и социальной оценки различных явлений. Возникая в разные исторические эпохи, они претерпевали изменения, утрачивая в некоторых случаях свою актуальность, но продолжали существование, обретая новую духовную жизнь и отражая изменения в социокультурном пространстве. В прошлом эти произведения существовали исключительно в устной форме, с цикличностью появления и исчезновения, и со временем стали значимым элементом культурного наследия, сохраняющим актуальные ценности в течение столетий.

Историко-героические песни представляют собой ценнейший источник, зафиксировавший ключевые события социальной и антифеодальной борьбы, междоусобиц, войн, депортаций и других значимых исторических эпизодов; в своей основе они содержат элементы героизма отдельных личностей, народного сопротивления. Концепт воина остается доминирующим на всем протяжении эпико-героической истории народа, «инициирующим началом его поступков становятся… конкретные (социально-глобальные) мотивы – защита угнетенных, защита родной земли и другие» [2, с. 261]. Следует отметить, что исторические песни служат не только частью фольклорного наследия, но и важным инструментом для исследования социальной и политической динамики соответствующего времени.

Исследованию данной разновидности песенного фольклора карачаево-балкарского народа посвящен ряд научных работ Х. Х. Малкондуева («Поэтика карачаево-балкарской народной лирики» [3], «Историко-героические песни карачаево-балкарского народа (конец XIV–XVIII вв.)» [4]), М. А. Хубиева («Карачаево-балкарские народные песни советского периода» [5]), Р. А.-К. Ортабаевой («Карачаево-балкарские народные песни» [6]), А. И. Рахаева («Песенная эпика Балкарии» [7]) и др. В обозначенных трудах объектами научного интереса стали главным образом тематический диапазон, внутрижанровая классификация, содержательные, композиционные и художественно-стилевые особенности, изобразительно-

выразительные средства историко-героических песен и т.д. Тем не менее многие аспекты все еще требуют более детального, углубленного изучения. К числу таковых можно отнести и вопросы межжанровой диффузии, включения элементов и даже отдельных текстов (пословиц, поговорок, клятв и т.п.) в произведения более крупных жанровых форм.

Историко-героические песни представляют собой своего рода «героический репортаж», отражающий реальные события из жизни народа. Достоверность и документальность их содержания во многом объясняются отсутствием письменных летописных источников, которое в определенной мере компенсировалось песнями, выполнявшими функцию исторической хроники.

Основными элементами жанра историко-героических песен являются морально-этические нормы и принципы, которыми руководствовались народные сочинители и рассказчики. В произведениях акцент делается на изображении героев, ключевых событий и описании окружающей местности.

В историко-героических песнях нашли отражение и межэтнические контакты карачаевцев и балкарцев, что выражается не только в наличии произведений, посвященных отдельным событиям истории соседних народов, взаимодействию с ними в условиях противостояния внешним врагам, а также внутренним конфликтам, но и в бытовании различных вариантов одних и тех же песен в их этносреде. Как отмечал Х. Х. Малкондуев, «исключительная схожесть, а порой и общность ряда дигорских и карачаево-балкарских песен историко-героического характера, таких как "Песнь о Сары Асланбек Кайтукине", объясняется не только географической близостью этих народов, что способствует взаимному восприятию и заимствованию культурных элементов, но и их этнической близостью, что особенно проявляется в случае дигорцев и балкарцев» [4, с. 12]. Особое внимание в подобных произведениях уделялось теме дружбы и добрососедства, взаимопомощи [8]: «Примером такого культурного взаимопонимания служат героико-исторические песни "Аче улу Ачемез" и "Азнаур", повествующие о совместной борьбе адыгов и таулу (балкаро-карачаевцев) против крымских ханов, а также о дружбе и совместных подвигах героев из адыгской и балкаро-карачаевской этнических групп» [4, с. 14].

А. Бегиев, анализируя песни переселенческого фольклора, отмечает, что «... эти стихи и песни можно рассматривать как своего рода молитву – повторяемую самим автором для того, чтобы сохранить свою человечность, правду и внутреннюю целостность. Для них песня стала средством преодоления трагедии, борьбы за моральное и духовное самоопределение, попыткой передать свою правду в условиях угнетения и страха» [9, с. 5]. «Исторические песни ценны как поэтические памятники стойкости народа, его несгибаемости. По ним можно судить о восприятии народом беспрецедентного исторического события, об отношении к трагедии и путях ее преодоления» [10, с. 27]. Указанное актуализируется и в ряде работ лингвистической и культурологической направленности, посвященных анализу народной лирики, отражающей трагедию балкарского этноса в 1944–1957 гг. [11, 12].

Вполне естественно, что песнетворцы старались высказать свое отношение к излагаемым событиям, поступкам отдельных исторических личностей, попавших «в прицел» песни. Значительную роль при этом играло включение в текст благопожеланий и проклятий, выражавших соответственно одобрение или порицание создателя песни, а в его лице – и всего народа.

Исходя из этого основной целью данной статьи является анализ функциональной роли благопожеланий (*алгъыш*) и проклятий (*къаргъыш*) – значимых элементов художественно-изобразительной системы и поэтики – в историко-героических песнях карачаевцев и балкарцев.

Обсуждение и результаты

Алгыши и *каргыши* оказывают значительное воздействие на формирование образов героев, их взаимоотношений, а также на восприятие событий, связанных с моральной оценкой действий персонажей. Это позволяет утверждать, что они занимают важное место в структуре произведений, способствуя не только эмоциональному насыщению текста, но и глубинному отражению ценностей народной культуры.

Использование проклятий и благопожеланий в карачаево-балкарских историко-героических песнях способствует углубленному раскрытию жизненных ситуаций персонажей и передаче интенсивности их переживаний, особенно в контексте ключевых событий. Эти элементы не только усиливают эмоциональную окраску текста, но и выполняют важную роль в формировании нравственных оценок происходящего, отражая моральные ценности и социальные установки народа. Благопожелания и проклятия помогают подчеркнуть трагизм, героизм, протест, надежду, утрату или жертвенность, что актуально для исторической и культурной реальности того времени. В целом они играют ключевую роль в создании эмоционального контекста произведений и раскрытии психологических и моральных аспектов изображаемых событий. «В фольклоре народов мира жанры благопожелания и проклятия относят к магической обрядовой поэзии, имеющей разнонаправленные векторы воздействия – от позитивного и созидательного до негативного и разрушительного – на определенный объект или явление, генетически связанные с архаическими жанрами заговоров и заклинаний» [13, с. 420].

Каргъыш (проклятие) представляет собой словесную форму, которая выражает пожелания зла в адрес обидчика, а также служит средством осуждения греховных поступков. Однако не каждый человек способен оперативно придумать или использовать уже существующие проклятия, поскольку реакция на причиненное зло индивидуальна для каждого сочинителя песен. О человеке, произносящем проклятия без явных на то причин, говорят *ачыаууз* «со злым / горьким ртом», *кирауз* «с грязным ртом», *ауузунда ит ёлген* «(человек,) у которого во рту собака сдохла», что обозначает склонность человека к злословию и злобным высказываниям. Эти выражения метафорически указывают на наличие в речи такой личности негативных и ядовитых слов, которые, по народным представлениям, могут нанести ущерб окружающим. Такие фразы могут отсылать к популярному представлению о «темной» или «опасной» речи как носителе разрушительной силы, способной причинить вред как в прямом, так и в переносном смысле.

Однако проклятия отражают не только психологический аспект человеческих отношений в традиционном обществе, но и социальные нормы, регулирующие допустимые формы выражения эмоций и конфликтов. В то же время следует отметить, что жанр проклятий не регулируется жесткими нормами этикета, а их применение может быть связано с проявлением агрессии, негативных эмоций и моральной оценкой поступков адресата проклятия. Например:

Къуруп къалгъы элле да,
Кючменни мыгау къоллары, ой, къоллары! [14, с. 219].

Да отсохли бы
Кривые руки Кучмена, ой, Кучмена![*]

*Здесь и далее, если не указано иное, подстрочные переводы наши. – *Ж.Л.*

В данном случае пожелание «*отсохли бы кривые руки*» произнесено с ярко выраженной злостью (агрессией), что предполагает наличие соответствующей эмоциональной энергии, которая сопровождает песню. Пожелания, будь то негативные или позитивные, всегда несут в себе энергию говорящего, и их воздействие зависит не только от слов, но и от интонации, контекста и психологического состояния того, кто их произносит. В народе верили, что в случае с негативными пожеланиями, такими как «*отсохли бы руки*», важно учитывать, что они могут оказывать отрицательное воздействие на адресата, если произнесены с намерением причинить вред. Однако если адресат не несет ответственности за ситуацию или не воспринимает слова как угрозу, данное пожелание может не оказать на него существенного влияния. Таким образом, эмоциональная окраска, вложенная в слова, играет решающую роль в их эффекте, а сам текст пожелания не всегда является решающим фактором в его воздействии. Важно также учитывать культурные и социальные контексты, в которых данные выражения приобретают дополнительную значимость и могут варьировать в своем воздействии в зависимости от восприятия и отношения к определенной ситуации.

ЫстауатыI малсыз къалып, Азнорну
Къош итлери улусун, ой, улусун,
Ултхагъа жыйгъан сюрюу къойлары
ЫстауатыI бла къурусун, ой къурусун!

Жиляй къалгъанды Кюннюм элинде
Жашыуну тапхан анасы, ой, анасы,
Сокъур Азнорну къарнына кирсин,
Белиндеги кюмюш къамасы, ой, къамасы! [Там же, с. 220].

Пусть стойбища Азнора останутся без скота
И завоют его овчарки, ой, овчарки,
Собранные за взятки стада его овец
Пусть вместе с его стойбищем сгинут, ой, сгинут!

Осталась плакать в селении Кюннюм
Родная мать Жашыу, ой, мать.
Пусть в живот слепому Азнору войдет
Серебряный кинжал, который висит у него на поясе, ой, на поясе!

Пожелания типа *«Пусть стойбища Азнора останутся без скота», «Пусть собранные за взятки стада овец сгинут с его стойбищ»*, *«Пусть в живот слепому Азнору войдет серебряный кинжал»* направлены против главного героя, характеризуя его как несправедливого и аморального. Эти проклятия символизируют наказание за его злодеяния, включая потерю материальных благ и насилие, что подчеркивает моральное осуждение его и заслуженную кару в контексте народных нравственных норм.

Кеси тенгли бир таш тюшге эди
Сени жойдургъан элинге! [Там же, с. 386].

На твое село, которое дало тебе погибнуть,
Пусть упадет камень величиной с него (село)!

Проклятие «*Пусть упадет камень величиной с него*» адресовано всему поселению, а не конкретному лицу, и выражает осуждение за его пассивность и неспособность защитить героя. Такое пожелание символизирует коллективную ответственность и наказание за бездействие, ставшее причиной гибели защитника. Оно отражает моральные и этические

нормы, связанные с понятием социальной ответственности и ценности человеческой жизни в традиционном обществе, где нарушение коллективного долга воспринималось как серьезное преступление.

Ой, башынгдагъы акъ къалпагъынгы,
Жамал, жел уруп, артха къайырды,
Къара къан жаусун Къалмукъ улуна,
Ол тенглерингден айырды. [Там же, с. 380].

Ой, на голове твоей белую шляпу,
Жамал, ветер, подумав, загнул назад.
Пусть черная кровь прольется на сына Калмыкова,
Это он разлучил тебя с друзьями.

В данном случае проклятие *«Пусть черная кровь прольется на Калмыкова»* адресовано конкретному лицу и представляет собой форму наказания, выражающую глубокое осуждение за совершенное зло. В этом контексте использование «черной крови» как символа несчастья и гибели придает проклятию особую силу и эмоциональную нагрузку, указывая на крайнюю степень враждебности и неприязни к объекту зложелания. Процесс разлучения с друзьями в данном случае выступает не только как личная утрата, но и как нарушение важнейших социальных и моральных связей, что усиливает эмоциональную и этическую значимость этого проклятия в народной культуре.

Депортация оставила глубокий след в коллективной памяти народа, став трагическим событием, оказавшим огромное влияние на его культурное самосознание. В историко-героических песнях ярко выражены чувства стойкости, патриотизма народа, который несмотря на трагические испытания, сохранил непоколебимую любовь к родной земле и традициям. Через народные песни, используемые в них проклятия народ выразил свою ненависть к репрессиям, осудил жестокость и безжалостность политического режима:

Тапхан балаларын къум тюзге кёме,
Сарнай къалгъан жарлы анала.
Ёлген аналаны ёшюнлерин эме,
Жиляй тургъан ёксюз балала.

Жиляулукъ болгъан а жарлы Къарачайгъа
Буслийман халкъ бары жилясын.
Бу къыйынлыкъланы бизге уа сынатхан,
Бизнича, къыйынлыкъ сынасын! [15, с. 44].

Своих детей хороня в песчаной степи,
Бедные матери рыдали.
Умерших матерей сосали холодную грудь
Плачущие дети-сироты.

Бедный Карачай, достойный оплакивания,
Весь мусульманский народ пусть оплакивает.
Пусть тот, кто поверг нас в эту напасть,
Испытает то, что мы испытали!

Таким образом, можно утверждать, что проклятия в народной поэзии играют важную роль в отражении эмоциональных и моральных переживаний народа. Они часто ассоциируются с осуждением жестокости, несправедливости, насилия и предательства, что делает

их значимым инструментом для выражения народного протеста и усиления социальной и политической позиции. Через них народ выражает свою боль, страдание и надежду на восстановление справедливости, а также на наказание тех, кто нарушает моральные и этические нормы, и они зачастую являются реакцией на угнетение, разрушение социального и культурного порядка, а также служат контекстом для осмысления исторических трагедий и социальных катастроф. В этом ключе проклятия становятся не только выражением личных чувств, но и коллективной памятью, фиксирующей народную оценку исторических событий, включая трагические моменты в истории народа [16].

Не менее важную, чем проклятия, задачу в историко-героических песнях выполняют и благопожелания (*алгъыш*): являясь частью коллективного восприятия нравственных и духовных ценностей, они определяют идеал человека в традиционном обществе. В произведениях этой разновидности устной народной поэзии такие пожелания часто сопровождают изображения героических поступков и подвигов, служа завершающим аккордом в оценке заслуг персонажей:

Сен къууанч бла сау келгин, Шукур,
Жарлы анангы къолуна.
Мен бауруму салырем, Азрет,
Кавказгъа барлыкъ жолунга.

Мамукъдан болсун, Шукур, жолунг,
Жибек байлансын къолунга.
Азрет харип жатады, Шукур,
Жетикашарны жолунда [15, с. 154].

Чтобы ты живым и здоровым вернулся, Шукур,
К бедной матери.
Я бы жизнь отдал, Азрет,
Дороге, которая тебя вернет на Кавказ.

Пусть ватной будет, Шукур, твоя дорога,
Шелковая нить будет привязана к твоей руке.
Бедный Азрет лежит, Шукур,
На дороге Жетикашар.

Значительное место в рассматриваемых песнях занимают благопожелания, связанные с надеждой на посмертное вознаграждение и почести для героев и праведников.

Ой, жарлы Джаттай, ой, аллыбызда,
Къара ташдан, эрип, суу чыкъсын,
Сен жатхан жерден, сени къабырынгдан,
Алтын мюйюзлю буу чыкъсын [14, с. 375].

Ой, бедный Джаттай, пусть из (лежащего) перед нами
Черного камня просочится вода.
Из-под земли, в которой ты лежишь, из твоей могилы
Пусть златорогий олень выйдет.

Пожелание «*Пусть златорогий олень выйдет*» связано с древними народными верованиями и символизирует возвышенные идеи о душах героев и праведников. В народной традиции существовало представление о том, что из могил злодеев и закоренелых преступников по ночам выходят черные кабаны, которые, хрюкая, бродят по кладбищам,

олицетворяя нечистую силу и мрак. Напротив, души героев и праведников, по народному представлению, воплощаются в образах златорогих оленей, символизируя светлую и чистую духовность. Они не только выступают как эмблемы духовного величия и добродетели, но и являются знаком бессмертной славы тех, кто посвятил свою жизнь служению высокому моральному идеалу. Таким образом, данный образ несет в себе глубокое символическое значение, отражая народные представления о посмертной судьбе душ и их связи с моральным и нравственным порядком мира.

Сюда же примыкают историко-героические песни, содержащие благопожелания, связанные с концептом «рай».

Жаннет «рай» (от арабского слова *джáннат*, озн. «сады»[1]) в исламской традиции символизирует обитель блаженства и вечного мира. Рай воспринимается как идеальное пространство, в котором верующий достигает вечного счастья, освобождения от страданий, болезней, печали и смерти. В рамках исламской доктрины Рай существует как уже свершившаяся реальность, и просьба о прощении грехов и обеспечении доступа в рай без мучений является важным благопожеланием, имеющим глубокое религиозное и духовное значение. Оно отражает центральные ценности исламской веры, связанные с надеждой на обретение духовного спасения и вечного покоя.

В историко-героических песнях пожелание о даровании входа в рай без мучений используется как форма почтения к героям и праведникам, признания их высоких моральных качеств и служения идеалам добродетели. Одним из таких выражений является фраза «*Жаннетли болсун!*» – «Да удостоится раем!», которая в различных вариантах может звучать как «*Жаннетли болсунла!*» – «Пусть покоятся в раю!» или «*Жаннетлени жети эшиги бош болсун!*» – «Пусть семь райских врат будут отворены перед ним!». Эти благопожелания отражают связь идеалов праведности и героизма с духовным вознаграждением в загробной жизни, служа важным элементом культурной и религиозной идентификации, а также выражают уважение к заслугам личности в контексте моральных и этических ориентиров общества.

Жаннетли болсун Тебердиде ыйых эфенди,
Алтын бла жазылсын элине ол этгени [14, с. 14].

Да пребудет в раю Тебердинский святой мулла,
Пусть золотом будет написано то, что он сделал для своего села.

Благопожелание, выраженное в форме *фразы «Пусть золотом будет написано то, что он сделал для своего села»*, подчеркивает значимость памяти о добрых деяниях и заслугах человека, которые остаются актуальными и ценными на протяжении длительного времени. Слова «*Алтын бла жазылсын*» – «Пусть будет написано золотом» символизируют непреходящую ценность поступков, ставших основой народной памяти и моральных ориентиров. Сравнение с золотом, которое, несмотря на внешние загрязнения, сохраняет свою суть и ценность, отражает глубоко укорененные в народной культуре представления о настоящих человеческих ценностях – добродетели, честности и самоотверженности. В данном контексте *золотое написание* символизирует не только долговечность воспоминаний о выдающихся поступках, но и неизменность моральных ориентиров, на которых строится общественное сознание.

Здесь интересно отметить, что в фольклоре карачаевцев и балкарцев нередко встречаются фразы «*Жаннетни жети эшиги ачылсын!*» – «Пусть откроются семь врат рая!», «*Жаннетни жети къатысында тынчайсын!*» – «Пусть покоится в семи покоях / уровнях

[1]https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B6%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%82

рая!», что представляет собой благопожелание, направленное на достижение духовного вознаграждения.

В историко-героических песнях часто встречаются благопожелания, произносимые близкими людьми, когда они провожают своих мужей, сыновей или братьев на подвиги. Напутственные слова не только выражают эмоциональную поддержку, но и служат важным элементом в формировании моральной и духовной составляющей народного эпоса. Благопожелания в таких контекстах становятся своеобразным актом передачи надежды и благословения, отражая силу родственных и социальных уз, а также подчеркивают важность духовной связи с родиной и предками. Они призваны укрепить моральный дух героев, подготавливая их к испытаниям, и в то же время служат символом любви, уважения и признательности за их готовность приносить себя в жертву ради благополучия и защиты своего народа.

Арымасын къылыч тутхан къолугъуз,
Жауну къырып, бетжалада солугъуз,
Тангдан алгъа жау аллына чыгъыгъыз,
Бирден атып, ийнаралны джыгъыгъыз! [Там же, с. 116–117].

Пусть устали не знают ваши руки, держащие сабли,
Перебив врагов, отдыхайте в укрытиях,
Выходите навстречу неприятелю до рассвета,
Стреляя залпами, свалите генерала!

Эти пожелания могут быть восприняты как выражение коллективной моральной ответственности, ведь они не только поддерживают личные стремления героя, но и связаны с общей судьбой народа. Посредством благопожеланий, как правило, выражают веру в героизм и моральное величие тех, кто отправляется на борьбу, надежду на их возвращение с победой. Если обратиться относительно указанного действа к опыту других национальных литератур, то нетрудно заметить очевидное разнообразие форм проявления благопожелания: к примеру, в калмыцкой художественной словесности отмечен «дорожный йорял (благопожелание. – *Ж.Л.*), сказанный стариками молодежи, но уже без прямого воспроизведения речи: Хотнас йовсн көвүд / Хортан дархар һарла. / Хаалһинь көгшд йөрәҗ / Халун үгән келлә («Ребята из селения отправились бить врага. Старики, благословляя их в дорогу, сказали сердечные слова»)» [17, с. 407].

Благопожелания, встречающиеся в карачаево-балкарских историко-героических песнях, могут отражать и глубокие патриотические чувства народа, выражающие надежду на силу и процветание родины. Эти пожелания также акцентируют важность гордости за свою страну, уважения к ее истории и культуре, а также стремления к светлому будущему. Песни служат выражением национальной идентичности и патриотизма, поддерживая идеалы общественного единства и духовной преемственности:

Къралыбыз тынчайып, баш къырал болсун,
Хар кърылны башчысы болсун.
Хар джюрюген сабийибиз башчы болсун.
Бу къууанчны юсюнде тилеген тилегибиз къабыл болсун [15, с. 132].

Пусть наша страна, обретя покой, станет самой главной страной,
Пусть она будет во главе всех стран.
Пусть каждый наш бегающий ребенок станет предводителем,
Пусть сбудутся пожелания, которые мы произносим на этом празднике.

Таким образом, исходя из изложенного, можно констатировать, что благопожелания являются не только выражением личной или коллективной благожелательности, но и важным инструментом формирования общественной моральной оценки, представления о нравственно ориентированных идеалах и социально одобряемых формах поведения.

Заключение

Проведенное исследование показало, что благопожелания и проклятия в сознании человека обладают значительной психологической и эмоциональной силой, оказывая влияние на внутренний мир как тех, кто их произносит, так и тех, кто их воспринимает. Эти формы словесного воздействия не только представляют собой выражение эмоциональных состояний, но и становятся важными элементами социальной коммуникации, играющими роль в моральной и духовной регуляции поведения.

В традиционном обществе, где коллективные ценности и нормы имеют особое значение, благопожелания и проклятия служат не только средством выражения личных чувств, но и инструментом влияния на общественные отношения. Пожелания добра или зла могут усиливать чувство социальной солидарности или, наоборот, угрожать социальной гармонии. Например, благопожелания типа «Да удостоится раем!» не только символизируют почтение и уважение к человеку, но и укрепляют веру в идеалы справедливости и моральной вознагражденности.

В историко-героических песнях рассмотренные паремические фразы не только подчеркивают моральные ориентиры и ценности народа, но и действуют как мощные средства воздействия на коллективную память. Влияние этих слов не ограничивается только личной сферой, но распространяется на более широкие культурные и социальные процессы, определяя нормы и установки общества на протяжении поколений.

Алгыши и *каргыши* в историко-героических песнях, в отличие от их изначального обрядово-религиозного значения, утрачивают свою связь с заговорной поэзией. В этих произведениях они становятся неотъемлемой частью эмоционального напряжения, возникающего в моменты душевного подъема или всплеска чувств, что обусловлено конкретными событиями или жизненными обстоятельствами, выражают не просто религиозные или магические обращения, но прежде всего отражают морально-этическую оценку происходящего. В этих контекстах благопожелания содержат просьбы о даровании человеку благополучия, материальных ценностей, удачи или же, наоборот, о наказании тех, кто нарушает моральные нормы или совершает несправедливые поступки. Это превращает благопожелания и проклятия в средства, с помощью которых народ выражает свои надежды, протесты и оценку происходящего. В историко-героических песнях они становятся инструментами формирования и поддержания моральных ориентиров, идеалов народа. Использование данных вербальных моделей не только обогащает словарный запас, но и значительно усиливает образность и выразительность произведений. Другими словами, в историко-героических песнях эти жанры становятся ключевыми индикаторами социального и эмоционального контекста, в котором формировались и развивались народные представления о мире, справедливости, жизни и смерти. Через них можно проследить трансформацию взглядов на важнейшие исторические события и процессы, а также понять, как народ воспринимал изменения в своей жизни и судьбе. Они также служат своеобразным мостом между прошлым и настоящим, перенося нас в другие эпохи, знакомя с духовным и социальным обликом людей тех времен, раскрывая глубокую тайну историко-героических песен, где музыкальные и словесные формы сливаются в единое целое, аккумулирующее в себе память о народной истории и культуре.

По результатам проведенного исследования можно заключить, что проклятия и благопожелания в историко-героических песнях выполняют особую эмоционально-смысловую функцию, становясь неотъемлемыми элементами художественной структуры произведений. Они являются завершенными и цельными в идейном, сюжетном и композиционно-стилевом отношении, вносят значительный вклад в формирование общего содержания песни, сохраняя при этом динамичную связь с основными темами произведений, выступая выразительными средствами передачи моральных и духовных ценностей, присущих героическим эпопеям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Локьяева Ж. М.* Историко-культурное и нравственно-этическое значение карачаево-балкарских историко-героических песен // Электронный журнал «Кавказология». 2023. № 4. С. 470–480. DOI: 10.31143/2542-212X-2023-4-470-480

2. *Узденова Ф. Т.* Понятие воинской чести в системе этико-эстетических представлений народов Северного Кавказа // Нартоведение в XXI веке: Современные парадигмы и интерпретации: сб. науч. статей. Владикавказ, 2012. С. 257–261.

3. *Малкондуев Х. Х.* Поэтика карачаево-балкаркой народной лирики. Нальчик: Эль-Фа, 2000. 218 с.

4. *Малкондуев Х. Х.* Историко-героические песни карачаево-балкарского народа (конец XIV–XVIII в.). Нальчик: Печатный двор, 2015. 312 с.

5. *Хубиев М. А.* Карачаево-балкарские народные песни советского периода. Черкесск: Ставроп. кн. изд-во, 1968. 185 с.

6. *Ортабаева Р. А.* Карачаево-балкарские песни. Традиционное наследие. Черкесск: Карач.-Черкес. отделение Ставропольского книжного изд-ва, 1977. 78 с.

7. *Рахаев А. И.* Песенная эпика Балкарии. Нальчик: Эльбрус, 1988. 168 с.

8. *Кетенчиев М. Б.* О языке историко-героической песни «Сын Темиркана Ачемез» // Фольклорный текст: рубеж тысячелетий. Нальчик: Принт Центр, 2021. С. 132–137.

9. *Бегиев А.* Шагъатлыкъ этеме (Свидетели живые: Песни-плачи, стихотворения, лирические песни). Нальчик: Эльбрус, 2004.

10. *Берберов Б. А.* Тема народной трагедии и возрождения в карачаево-балкарской поэзии (на материале устной и письменной словесности 1943–2000 гг.). Нальчик: Изд. отдел КБИГИ, 2011. 215 с.

11. *Кетенчиев М. Б., Додуева А. Т., Мизиев А. М.* Особенности вербализации депортации 1943–1957 гг. в карачаево-балкарской народной лирике // Актуальные проблемы филологии и педагогической лингвистики. 2020. № 1. С. 112–119. DOI: 10.29025/2079-6021-2020-1-112-119

12. *Узденова Ф. Т.* Депортация (1943–1957) в художественной литературе карачаевцев и балкарцев // Труды Института истории НАН Азербайджана. 2018. № S70. С. 482–486. DOI: 10.18411/702018486491

13. *Ханинова Р. М.* Жанр харал в калмыцкой поэзии XX в. // Монголоведение (Монгол судлал). 2022. Т. 14. № 2. С. 418–440. DOI: 10.22162/2500-1523-2022-2-418-440

14. Аланский историко-героический эпос / сост., пред. и коммент. М. Ч. Джуртубаев. Т. 3. Нальчик: Тетраграф, 2015. 400 с.

15. Къарачай халкъ джырла (Карачаевские народные песни) / сост. С. А. Гочияева, Р. А.-К. Ортабаева, Х. И. Сюйюнчева: на карач. яз. М.: Вост. лит., 1969. 278 с.

16. *Локьяева Ж. М.* Проклятия как жанр карачаево-балкарского фольклора // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 3(95). С. 114–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-3-95-114-121

17. *Ханинова Р. М.* Жанр йорял в калмыцкой поэзии XX в. (по материалам газетной периодики 1930–1940-х гг.) // Oriental Studies. 2022. Т. 15. № 2. С. 397–413. DOI: 10.22162/2619-0990-2022-60-2-397-413

REFERENCES

1. Lokyaeva Zh.M. Historical, cultural, moral and ethical significance of the Karachay-Balkar historical and heroic songs. *Elektronnyy zhurnal «Kavkazologiya»* [Electronic journal "Caucasology"]. 2023. No. 4. Pp. 470–480. DOI: 10.31143/2542-212X-2023-4-470-480. (In Russian)

2. Uzdenova F.T. The concept of military honor in the system of ethical and aesthetic ideas of the peoples of the North Caucasus. *Nartovedeniye v XXI veke: Sovremennyye paradigmy i interpretatsii* [Nartoscience in the XXI century: Modern paradigms and interpretations]: collection scientific articles. Vladikavkaz, 2012. Pp. 257–261. (In Russian)

3. Malkonduev Kh.Kh. *Poetika karachayevo-balkarkoy narodnoy liriki* [Poetics of Karachay-Balkarian folk lyrics]. Nalchik: El-Fa, 2000. 218 p. (In Russian)

4. Malkonduev Kh.Kh. *Istoriko-geroicheskiye pesni karachayevo-balkarskogo naroda (konets XIV–XVIII v.).* [Historical and heroic songs of the Karachay-Balkarian people (the end of the XIV–XVIII centuries)]. Nalchik: Pechatnyy dvor, 2015. 312 p. (In Russian)

5. Khubiev M.A. *Karachayevo-balkarskiye narodnyye pesni sovetskogo perioda* [Karachay-Balkarian folk songs of the Soviet period]. Cherkessk: Stavrop. kn. izd-vo, 1968. 185 p. (In Russian)

6. Ortabayeva R.A. *Karachayevo-balkarskiye pesni. Traditsionnoye naslediye* [Karachay-Balkar songs. Traditional heritage]. Cherkessk: Karach.-Cherkes. otd-iye Stavrop. kn. izd-va, 1977. 78 p. (In Russian)

7. Rakhaev A.I. *Pesennaya epika Balkarii* [Song epic of Balkaria]. Nalchik: El'brus, 1988. 168 p. (In Russian)

8. Ketenchev M.B. *O yazyke istoriko-geroicheskoy pesni «Syn Temirkana Achemez»* [About thelanguage of the historical and heroic song "Son of Temirkan Achemez"]. In: *Fol'klornyy tekst: rubezh tysyacheletiy* [Folklore text: the turn of the millennium]: Collection of articles. Nal'chik: Print Centr, 2021. Pp. 132–137. (In Russian)

9. Begiev A. Shagatlyk eteme (Living Witnesses: Crying songs, poems, lyrical songs). Nalchik: Elbrus, 2004. (In Karachay-Balkar)

10. Berberov B.A. *Tema narodnoy tragedii i vozrozhdeniya v karachayevo-balkarskoy poezii (na materiale ustnoy i pis'mennoy slovesnosti 1943–2000 gg.)* [The theme of folk tragedy and rebirth in Karachay-Balkar poetry (based on the material of oral and written literature 1943–2000)]. Nalchik: Izd. otdel KBIGI, 2011. 215 p. (In Russian)

11. Ketenchiev M.B., Dodueva A.T., Miziev A.M. Features of verbalization of deportation 1943–1957 in Karachay-Balkar folk lyrics. *Aktualnyye problemy filologii i pedagogicheskoy lingvistiki* [Actual problems of philology and pedagogical linguistics]. 2020. No. 1. Pp. 112–119. DOI: 10.29025/2079-6021-2020-1-112-119. (In Russian)

12. Uzdenova F.T. Deportation (1943–1957) in the fiction of Karachais and Balkars. *Trudy Instituta istorii NAN Azerbaydzhana* [Proceedings of the Institute of History of the National Academy of Sciences of Azerbaijan]. 2018. No. S70. Pp. 482–486. DOI: 10.18411/702018486491. (In Russian)

13. Khaninova R.M. The Haral genre in Kalmyk poetry of the twentieth century. *Mongolovedeniye (Mongol sudlal)* [Mongolian Studies (Mongol Sudlal)]. 2022. Vol. 14. No 2. Pp. 418–440. DOI: 10.22162/2500-1523-2022-2-418-440. (In Russian)

14. *Alanskiy istoriko-geroicheskiy epos / sost., pred i komment. M.Ch. Dzhurtubayev* [Alan historical and heroic epic / comp., prev. and comment. M.Ch. Dzhurtubaev]. Vol. III. Nalchik: Tetragraf, 2015. 400 p. (In Karachay-Balkar)

15. Karachai folk songs / comp. S.A. Gochiyaeva, R.A.-K. Ortabaeva, H.I. Syuyuncheva. M.: Vost. lit., 1969. 278 p. (In Karachay-Balkar)

16. Lokyaeva Zh.M. Curses as a genre of Karachay-Balkarian folklore. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 3(95). Pp. 114–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-3-95-114-121. (In Russian)

17. Khaninova R.M. The yoryal genre in Kalmyk poetry of the twentieth century. (based on materials newspaper periodicals of the 1930s–1940s*). Oriental Studies*. 2022. Vol. 15. No 2. Pp. 397–413. DOI: 10.22162/2619-0990-2022-60-2-397-413. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Локьяева Жаухар Магомедовна, мл. науч. сотр., сектор карачаево-балкарского фольклора, Институт гуманитарных исследований – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

lokyayeva.zh@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-1599-4397, SPIN-код: 8416-9163

Information about the author

Zhauhar M. Lokyaeva, Junior Researcher, The Karachay-Balkar Folklore Sector, Institute of Humanitarian Researches – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS;

360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street;

lokyayeva.zh@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-1599-4397, SPIN-code: 8416-9163

ФИЛОЛОГИЯ

УДК 82.09 Обзорно-аналитическая статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-382-391
EDN: ZJHSDY

Филологическое осетиноведение в контексте северокавказской исследовательской мысли

И. В. Мамиева

Северо-Осетинский институт гуманитарных и социальных исследований им. В. И. Абаева – филиал Федерального государственного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»
362040, Россия, г. Владикавказ, пр-т Мира, 10

Аннотация. В статье во взаимосвязи с динамикой движения гуманитарной науки в Северо-Кавказском регионе рассмотрены тенденции и перспективы развития осетинского литературоведения первых десятилетий XXI века. Работа базируется на исследовательских данных филологов СОИГСИ в рамках проекта «История осетинской литературы в свете формирования, развития и взаимодействия эстетических систем»; очерчены виды научного поиска: теоретико-философский и эмпирический. Теоретическое направление релевантно задачам осмысления генетических истоков реализма, его исторической типологии, единства традиции и новаций. В поле второго вектора – анализ и интерпретация конкретных произведений, их поэтики и семантики, сложной внутренней структуры, также с выходом к теоретическим обобщениям, позволяющим охарактеризовать связи и закономерности творческой деятельности писателей и историко-литературного процесса в целом. Актуальность темы продиктована необходимостью систематизации накопленного литературоведческого опыта, выработки совместной парадигмы исследований по истории национальных литератур. Изложены результаты научного поиска по четырем содержательным направлениям в сфере современной осетиноведческой мысли: 1) соцреализм как мировоззрение и как художественный метод в его эволюционном развитии; 2) структура осетинского повествования, изучение литературных феноменов в переходные этапы словесной культуры осетин; 3) литература, адресованная детской аудитории: жанрово-стилевые особенности, система образов, регулятивно-воспитательные и иные функции; 4) художественный перевод как феномен межкультурной коммуникации, теоретические и практические аспекты переводческого процесса: передача национального колорита, идиостиля автора, реализация смыслового пространства оригинала. Векторный анализ взаимосвязанных стратегий исследования в осетинском литературоведении определяется впервые.

Ключевые слова: научный обзор, литературоведческое осетиноведение, регион, контекст, история, современное состояние, исследовательские подходы, аналитический инструментарий, проблемы, перспективы

Поступила 08.11.2024, одобрена после рецензирования 06.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Мамиева И. В. Филологическое осетиноведение в контексте северокавказской исследовательской мысли // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 382–391. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-382-391

© Мамиева И. В., 2024

Review and analytical article

Philological Ossetian studies in the context of North Caucasian research thought

I.V. Mamieva

V.I. Abaev North Ossetian Institute of Humanities and Social Research –
Branch of the Federal State Institution of Science of the Federal Scientific Center
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
362040 Vladikavkaz, 10 Mira avenue

Abstract. The article examines the trends and prospects of development in Ossetian literary studies of the first decades of the 21st century in interrelation with the dynamics of humanitarian science in the North Caucasus region. The work is based on the research data of SOIGSI literary scholars within the framework of the project History of Ossetian literature in the light of the formation, development and interaction of aesthetic systems; utilized theoretical-philosophical and historical-literary types of scientific research. The theoretical direction is relevant to the tasks of studying the genetic origins of realism, its historical typology, the unity of tradition and innovation. The field of the second vector includes the analysis and interpretation of specific works, their poetics and semantics, complex internal structure, – but also with access to theoretical generalizations, allowing to characterize the connections and regularities in the creative activity of individual masters of the word and the historical and literary process as a whole. The relevance of the topic is dictated by the need to comprehend and systematize the accumulated literary experience and to develop a joint paradigm of research on the history of national literatures. The results of scientific research in four substantive directions in the sphere of modern Ossetian studies thought are presented: 1) socialist realism as a worldview and as an artistic method in its evolutionary development; 2) structure of Ossetian narrative, study of literary phenomena in the transitional stages of Ossetian verbal culture; 3) literature addressed to children's audience: genre and style features, system of images, regulative-educational and other functions); 4) fiction translation as a phenomenon of intercultural communication, theoretical and practical aspects of the translation process: transfer of national color, individual style of an author, realization of the semantic space of the original. Vector analysis of interrelated research strategies in Ossetian literary studies is defined for the first time.

Keywords: scientific review, Ossetian literary studies, region, context, history, current state, research approaches, analytical tools, problems, perspectives

Submitted 08.11.2024, approved after reviewing 06.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Mamieva I.V. Philological Ossetian studies in the context of North Caucasian research thought. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 382–391. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-382-391

Введение

Целью настоящей статьи являются краткий обзор состояния региональной литературоведческой мысли по ключевому направлению эстетико-парадигматических исследований, а именно по работе над созданием историй национальных литератур, и характеристика научного задела осетинских авторов в данной области. Используются методы краткой систематизации исходных данных и их аналитической обработки.

Известно, что первые попытки изучения истории национальных литератур, северокавказских в том числе, были предприняты в конце 1950-х – 1960 гг. В указанное время увидели свет очерки истории абазинской, ингушской, кабардинской, карачаевской, ногайской, черкесской, чеченской литератур и два очерка истории осетинской литерату-

ры – дооктябрьского (1959) и советского (1967) периодов. В 1970–1974 гг. выработанный «на местах» опыт был обобщен в шеститомной «Истории советской многонациональной литературы» [1].

Богатый фактический материал, преимущественно справочного (описательного) характера, расширял представление о тематическом диапазоне и жанровых формах, процессе художественного творчества народов нашей страны и мог бы послужить исходной основой для создания научных историй национальных литератур. Этого не произошло, поскольку в последней трети XX века из тематики научных учреждений фактически исчезли разработки в указанном направлении [2]. Исключение в Северо-Кавказском регионе составила «История осетинской литературы (дооктябрьский период)» Н. Г. Джусойты [3].

Лишь в 2000-е гг. наметился некий сдвиг в возобновлении интереса к проблеме – важной и в теоретическом, и в практическом плане. Фундаментальный труд – учебник по истории осетинской литературы (1917–1956 гг.) высокого теоретического уровня пишет для студентов-филологов на родном языке Ш. Ф. Джикаев [4]. Издаются истории адыгейской литературы – параллельно на родном (т. 1, 2008) и русском (т. 1– 3, 1999–2006) языках; в такой же языковой форме издана История адыгской (кабардино-черкесской) литературы – на родном (в 3-х томах; 2010–2017) и на русском (т. 1, 2019) языках. С разницей в два десятилетия выходят «Очерки истории балкарской литературы» (1981, 2010).

Вопросы истории литературы решаются и в последующих изданиях.

В 2023 году выходит в свет монография Ю. М. Тхагазитова, посвященная изучению стадиальности развития кабардинской и в целом адыгской литературной классики через призму динамики культурной идентичности этноса, закономерностей перестройки и пересечений различных форм общественного сознания в переломные моменты его истории [5]. Комплексное исследование аспектов литературно-фольклорного взаимодействия в балкарской прозе предпринято А. М. Сарбашевой (2019). Анализируются особенности рефракции народно-образных традиций в структуре художественной прозы, специфика творческой адаптации в ней ресурсов эстетики фольклора [6]. Немаловажная роль в осмыслении литературного процесса отводится персоналиям, внесшим заметный вклад в обогащение художественной мысли этноса на том или ином этапе развития. Книга А. М. Сарбашевой (2024) об Алиме Теппееве – одной из ключевых фигур современной карачаево-балкарской литературы – отличается концептуальной выстроенностью, органичным соединением элементов биографической документалистики и глубины постижения самобытности художественного дарования писателя [7]. В центре внимания Л. Б. Хавжоковой – эволюционный путь системы адыгского стихосложения, прослеженный ею от фазы становления в устных текстах и ранней авторской поэзии до письменного стиха новейшего времени (вопросы ритмики, метрики, рифмы, строфики) [8]. Профессиональный интерес Р. А. Керимовой сосредоточен на творчестве поколения стихотворцев рубежа эпох. Реализуемый в ее книге [9] новаторский подход базируется на идее инновационной модели осмысления эстетики и философии мировосприятия молодых авторов, специфики позиционирования ими себя и окружения. В рамках рассматриваемой в настоящей статье проблемы заслуживает внимания попытка воспроизведения исследователем на основе поэзии балкарских и карачаевских авторов единого мирообраза, единого типа кавказской идентичности (ментальной репрезентации), свойственного художественному сознанию региона, которое формируется, по утверждению автора, вне отрыва от социокультурной динамики российского общества.

Констатируя несомненные достижения, отметим вместе с тем, что для карачаево-балкарской гуманитарной науки, как и осетинской, насущной задачей остается написание академической Истории литературы второй половины XX века.

К глубокому прискорбию, ушли из жизни зубры филологического осетиноведения: Х.-У. Алборты, Х.-М. Дзуццати, Ш. Ф. Джикаев, Н. Г. Джусойты. Последний особое место занимал и в пространстве региональной культуры. В отрицание пословицы он, бесспорно, был один в поле воин, и не случайно народный писатель Кабардино-Балкарии А. Теппеев именовал Нафи Григорьевича «одним из головных журавлей кавказской духовной культуры», воплотившем в себе «и мудрость веков, и отчаянный рывок горцев к культуре». «Он не любит наставлять, навязывать свое мнение, но в то же время никогда не назовет твою медь золотом»[1] - так образно и емко характеризовал Алим Магомедович личность своего старшего друга и покровителя.

Показательно пронзительное «Послание друзьям в страну безмолвия», в котором Джусойты поверяет уже покинувшим этот мир литературным соратникам «заметы сердца», выстраданные в эпоху перестроечного раздрая: «…Я говорю с Кайсыном Кулиевым, с великим певцом из Чегемского высокогорья; с Магометом Мамакаевым из Чечни, Джемальдином Яндиевым из Ингушетии, с Адамом Шогенцуковым из Кабарды, с Аткаем Аджаматовым из Дагестана, а они все — отзывчивые, мужественные и мудрые кавказцы, люди редкостного благородства. Верю, что мы, как были, так и остались близкими по сердечной сути и разумению мира людьми…» [10]. По сути же это есть обращение к ныне здравствующим представителям гуманитарной интеллигенции региона, призыв быть достойными традиций, сложившихся в литературном содружестве его поколения. Поколения, которому было по плечу решать *глобальные задачи* сохранения как культурного наследия, так и мира на Кавказе – «в нашем общем доме», каковым без тени сомнения считал его Джусойты.

На ум приходят стихи А. Городницкого о титанах, держащих небесный свод «на каменных руках»: *«Держать его, махину – Не мед со стороны. Напряжены их спины, Колени сведены… Их тяжкая работа Важней иных работ: Из них ослабни кто-то – И небо упадет».*

Продолжать дело кавказских «атлантов» предстоит нам, их наследникам. Но есть проблемы. Ни для кого не секрет, что в постсоветские 1990-е облегченный порядок повышения научного статуса породил настоящий бум диссертационных защит, приведший к заметному снижению качественного уровня исследований. Возник серьезный дисбаланс фактической численности защитивших диссертации и тех, кто после защиты стал работать по специальности в научных учреждениях. Нового притока исследовательских кадров в последние десятилетия практически нет, и это чревато в научном пространстве разрывом «связи времен».

Создание «Истории литературы…», отвечающей современному уровню развития филологической науки, бесспорно, требует коллективных усилий. Свидетельство тому – впечатляющий результат труда адыгских авторов.

Результаты исследования

В настоящей обзорной статье представлены результаты литературоведческих штудий сотрудников СОИГСИ по вышеуказанному исследовательскому проекту, реализация которого осуществлялась по четырем содержательным направлениям.

I. Теоретико-философский аспект связан с осмыслением генетических истоков реализма, его исторической типологии, значения соцреализма как мировоззрения и методологии, особенностей функционирования его как художественного метода. В ходе

[1]Теппеев А.М. Аланский всадник // Южная Осетия. 26 февр. 2015 г. URL: https://south-ossetia.info/alanskij-vsadnik/ (дата обращения: 31.08.2024).

изучения выведена модель социалистического реализма, представленная в эволюционном развитии двумя типами: 1) соцреализм «жесткий» (1930–50-е гг.), тесно связанный с антропологической концепцией марксистско-ленинской философии и ее планом идеологического проекта-формирования «нового человека» с новым типом сознания, чувствования и отношения к миру; 2) соцреализм мифолого-философского склада (1960–80-е гг.) – тип художественного познания действительности, активно оперирующий мифологическими сюжетами, разрешающими творчески использовать философскую антропологию и аксиологию [11, 12].

II. Следующий вектор научного поиска касается структуры осетинского повествования. В рамках этого направления преимущественное внимание уделялось исследованию литературных феноменов в переходные этапы словесной культуры осетин как индикаторов движения поэтологических категорий в их исторической преемственности. Выделены наиболее значимые, на наш взгляд, вехи ситуации перехода.

Аналитический инструментарий контекстно-ориентированного подхода дал возможность научно осмыслить процессы, происходящие в осетинской прозе на ранней стадии ее становления. Впервые под углом зрения особенностей формирования в них авторского начала рассмотрены ранние просветительские тексты [13] и литературный тауpаг рубежа XIX–XX веков – жанрово-стилевое образование, основанное на синтезе эстетики устной поэзии и повествовательных принципов рассказа. Проанализированы приемы и способы, через посредство которых проза Сека Гадиева достигает результата, позволившего заложить основы художественного повествования на родном языке.

Изучение творчества Н. Джусойты, М. Булкаты, С. Хугаева, Б. Гусалова и др. выявило активизацию в осетинской прозе на рубеже XX–XXI вв. мифологического начала и коррелирующие с ним жанрово-стилевые трансформации. Показано, что мифофольклорные инсталляции как способ продуцирования новой многоплановой нарративной структуры обладают грандиозной энергетикой творения вневременных универсальных смыслов, становятся источником формирования неоднозначных межвидовых дискурсов [14, 15]. Еще один рубежный временной отрезок в осетинской художественной словесности приходится на середину XX столетия (1940–1960); он связан с процессом возникновения в северокавказских литературах романной эпопеи. Произведения региональных авторов (В. Гаглоев, Х. Теунов, И. Машбаш) рассмотрены в разрезе единого мотивного поля, отсылающего исследовательскую мысль к классическим традициям семейно-родового романа (Ф. Достоевский, М. Салтыков-Щедрин, И. Франко, Д. Голсуорси, М. Горький, Т. Манн) [16]. Наблюдения над жанровой спецификой романа-эпопеи показали также общую тенденцию к дезактуализации национально-этнического в обрисовке характеров и обстоятельств, в поведенческих алгоритмах персонажей и, наоборот, акцентирование внимания на их идеологической идентичности. Наряду с этим отмечается, что «произведения эпопейного типа, несмотря на ощутимые издержки идеологического и отчасти эстетического порядка, явились новой ступенью в осмыслении осетинской литературой эпохальных событий прошлого в их сопряжении с бытием народа, микромиром семьи и отдельной личности» [17, 280].

Осуществлено новое прочтение ряда классических и современных произведений с опорой на интертекстуальные отсылки, способствующие полноте восприятия глубинных значений художественного текста. В частности, выявлены многоаспектные мотивные переклички «Фатимы» Коста Хетаурова с поэмой А. С. Пушкина «Полтава» [18], в том числе на уровне идеи обреченности противостояния ходу Истории. Внесены серьезные коррективы в сложившиеся интерпретационные подходы к ряду стихотворений в программ-

ном сборнике корифея осетинской литературы в ракурсе отражения в них народнических идей теории П. Л. Лаврова, касающихся отдачи интеллигенцией «долга народу»[2].

III. Концептуальное осмысление осетинской литературы как целостной системы предполагает введение в научный оборот и такой значимой ее составляющей, как произведения, адресованные детской аудитории. Художественный мир осетинских авторов рассмотрен в различных аспектах [19]. Проведен многоуровневый анализ произведений осетинской детской литературы как особой подсистемы, характеризующейся формально-содержательными и функциональными признаками. В частности, сделан акцент на актуализации регулятивно-воспитательных, культурно-просветительских алгоритмов детской литературы, обобщены тенденции, связанные с ее национальной спецификой как каналом воспроизводства духовных ценностей народа [20]. Отдельные тексты изучены с позиций психологической коррекции детей и как действенный инструмент сказкотерапии [21]. Отмечено, что занимательность в осетинской детской литературе стала дополняться выдвижением и решением естественнонаучных проблем, вопросов экологии; это привело к появлению новых жанровых форм природоведческого рассказа. Литературоведческой интерпретации подверглось еще одно нововведение: рассказы-диалоги, адресованные читателям дошкольного и младшего школьного возраста. Модифицируя фольклорную традицию, осетинские писатели выводят в них на первый план игру как способ вовлечения ребенка в доступной ему форме в сложный мир научных знаний, что значительно расширило возможности детской литературы и подняло ее на принципиально новый качественный уровень. Выводы об идентичности процессов, происходящих в региональной литературе, подтверждены типологическими выходами к материалу балкарских, адыгских, дагестанских авторов; отмечена тесная связь с традициями русского словотворчества.

IV. Существенным показателем степени развития литературы является художественный перевод. В поле данного вектора исследования он представлен как феномен межкультурной коммуникации, как действенное средство диалога культур. Художественные тексты, вовлеченные в переводческий процесс, рассмотрены с учетом исторического фактора сквозь призму адекватной передачи жанровой специфики, формальных и содержательных категорий, стилистических особенностей, воссоздания эстетической составляющей текста. Раскрытие теоретических и практических аспектов переводческого процесса осуществлено на уровне передачи национального колорита, идиостиля автора, реализации смыслового пространства оригинала. Впервые в осетинском переводоведении последовательно изучены этапы процесса перевода, виды переводческих трансформаций; представлена развернутая классификация переводческих стратегий; на материале осетинской поэзии рассмотрен переводческий опыт многих известных русских поэтов: А. Ахматовой, Н. Заболоцкого, Н. Тихонова, В. Шаламова и др. [22, 23].

Заключение

История современной отечественной литературы ощущает воздействие совокупности разновекторных факторов: «общих закономерностей формирования мировой культуры XX века, особенностей развития искусства советского периода и особых культурно-исторических условий кризиса перестроечного времени» [24, с. 214]. Как никогда актуальным сегодня является совершенствование традиционного литературоведческого инструментария и разработка современных моделей научного исследования, позволяющих сочетать теоретико-философские подходы к истории национальных литератур с

[2] Вестник КИГИ РАН. 2016. № 3. С. 137–142.

эмпирическим исследованием конкретного произведения, его поэтики и семантики, его сложной внутренней структуры.

Несмотря на заметные сдвиги в указанном направлении остается целый ряд нерешенных вопросов. Неравновесное состояние, в котором находится изучение истории литературы, и перспективы развития регионального литературоведения в целом стали предметом обсуждения на круглом столе «Опыт создания академического труда по истории литератур народов Северного Кавказа»; мероприятие проходило 16 ноября 2015 года на базе Института гуманитарных исследований в г. Нальчике с приглашением видных ученых Института мировой литературы (г. Москва) и из соседних республик [2, с. 18]. Минуло 9 лет, обсуждение проблем и перспектив развития современного кавказоведения, филологического в том числе, в октябре этого года продолжила конференция, организованная Институтом истории, археологии и этнографии и Институтом языка, литературы и искусства Дагестанского федерального исследовательского центра РАН. И это внушает надежду на консолидацию научных кадров ареала для успешной реализации давней идеи написания «Истории литератур народов Северного Кавказа».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. История советской многонациональной литературы. М.: Наука, 1970–1971.

2. *Баков Х. И.* К проблеме исследования истории литератур народов Северного Кавказа // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 2: Филология и искусствоведение. 2013. № 2(121). С. 150–155.

3. *Джусойты Н. Г.* История осетинской литературы. Тбилиси: Мецниереба, 1980. Кн. I (XIX век). 332 с.; 1985. Кн. II (1902–1917 гг.). 272 с.

4. *Джыккайты Ш.* Ирон литературæйы истори. Владикаказ: Ир, 2003. 464 с.

5. *Тхагазитов Ю. М.* Кабардинская литературная классика в социокультурном измерении. Нальчик: Принт Центр, 2023. 160 с.

6. *Сарбашева А. М.* Трансформация фольклорных традиций в балкарской литературе (на материале прозы). Нальчик: Принт Центр, 2019. 172 с.

7. *Сарбашева А. М.* Алим Теппеев: проблема творческой индивидуальности. Нальчик: Принт Центр, 2024. 360 с.

8. *Хавжокова Л. Б.* Эволюция системы адыгского стихосложения. Нальчик: Принт Центр, 2022. 372 с.

9. *Керимова Р. А.* Карачаево-балкарская поэзия конца XX – начала XXI века: новое поколение авторов. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2020. 375 с.

10. *Джусойты Н. Г.* Послание друзьям в страну безмолвия // Дружба народов. 2000. № 12. С. 207–211.

11. *Фидарова Р. Я.* Осетинский литературный процесс. Проблемы истории и теории. Владикавказ, 2016. 312 с.

12. *Фидарова Р. Я.* Философские проблемы соцреализма в осетинской литературе. Владикавказ: СОИГСИ ВНЦ РАН. Т. 1. 2022. 370 с.; Т. 2. 2023. 293 с.

13. *Мамиева И. В.* Авторское «я» в ранних текстах северокавказского просветительства // Вестник Дагестанского научного центра. 2013. № 50. С. 103–109.

14. *Мамиева И. В.* Функция бытийного в пространстве обыденности (Роман «Плоть от плоти» Б. Гусалова) // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–3. С. 79.

15. *Mamieva I. V.* Ontological motivation of the myth-based novel in Ossetian literature // Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Proceedings of the International

Conference "Topical Problems of Philology and Didactics: Interdisciplinary Approach in Humanities and Social Sciences". 2019. С. 263–269. DOI: 10.2991/tphd-18.2019.51

16. *Мамиева И. В.* «Навстречу жизни» Е. Уруймаговой в свете типологической общности с классическими образцами семейно-родового романа // Научный диалог. 2019. № 6. С. 139–158. DOI: 10.24224/2227-1295-2019-6-139-158

17. *Мамиева И. В.* Жанровые признаки романной эпопеи в осетинской литературе: корреляция между идеологическим и национально-этническим // Научный диалог. 2020. № 10. С. 280–296. DOI: 10.24224/2227-1295-2020-10-280-296

18. *Мамиева И. В.* Межтекстовые связи как инструмент интерпретации авторской идеи («Фатима» К. Л. Хетагурова) // Филологические науки. Научные доклады высшей школы. 2023. № 4. С. 53–60. DOI: 10.20339/PhS.4-23.053

19. *Бритаева А. Б.* Жанрово-стилевые искания осетинской детской литературы конца XX – начала XXI века // Известия СОИГСИ. 2023. Вып. 50(89). С. 95–106. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.50.006

20. *Бритаева А. Б.* Нартовский эпос в осетинской детской драматургии: специфика межжанрового взаимодействия // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2023. Т. 16. № 12. С. 4371–4376. DOI: https://doi.org/10.30853/phil20230663

21. *Бритаева А. Б.* Литература и психология: детская литература как инструмент сказкотерапии // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 68-6. С. 19–22. DOI: 10.18411/lj-12-2020-226

22. *Дзапарова Е. Б.* Художественный перевод в осетинской литературе. Проблема адекватности переводных текстов. Владикавказ, 2014. 312 с.

23. *Дзапарова Е. Б.* Художественный перевод в осетинской литературе: вопросы теории и практики. Владикавказ, 2024. 107 с.

24. *Панеш У. М.* Типологические связи и формирование художественно-эстетического единства адыгских литератур. Майкоп, 1990. 276 с.

REFERENCES

1. *Istoriya sovetskoi mnogonatsional'noi literatury* [History of Soviet multinational literature]. In 6 vol. Moscow: Nauka, 1970–1971. (In Russian)

2. Bakov Kh.I. On the problem of studying the history of literatures of the peoples of the North Caucasus. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2: Filologiya i iskusstvovedenie* [Bulletin of Adyghe State University. Series 2: Philology and Art Criticism]. 2013. No. 2(121). Pp. 150–155. (In Russian)

3. Dzhusoity N.G. *Istoriya osetinskoi literatury* [History of Ossetian literature]. Tbilisi: Metsniereba, 1980. I (19th century). 332 p.; 1985. II (1902–1917). 272 p. (In Russian)

4. Dzhykkaity Sh. *Iron literaturæiy istori (1917–1956)* [History of Ossetian literature (1917–1956)]. Vladikavkaz: Ir. 2003. 464 p. (in Ossetian)

5. Tkhagazitov Yu.M. *Kabardinskaya literaturnaya klassika v sotsiokul'turnom izmerenii* [Kabardian literary classics in the socio-cultural dimension]. Nalchik: Print Tsentr, 2023. 160 p. (In Russian)

6. Sarbasheva A.M. *Transformatsiya fol'klornykh traditsii v balkarskoi literature (na materiale prozy)* [Transformation of folklore traditions in Balkarian literature (based on prose)]. Nalchik: Print Tsentr, 2019. 172 p. (In Russian)

7. Sarbasheva A.M. *Alim Teppeev: problema tvorcheskoi individual'nosti* [Alim Teppeev: the problem of creative individuality]. Nalchik: Print Tsentr, 2024. 360 p. (in Russian)

8. Khavzhokova L.B. *Evolyutsiya sistemy adygskogo stikhoslozheniya* [Evolution of the Adyghe versification system]. Nalchik: Print Tsentr, 2022. 372 p. (In Russian)

9. Kerimova R.A. *Karachaevo-balkarskaya poeziya kontsa XX – nachala XXI veka: novoe pokolenie avtorov* [Karachay-Balkar poetry of the late 20th – early 21st centuries: a new generation of authors]. Nalchik: Kabardino-Balkarskii nauchnyi tsentr RAN, 2020. 375 p. (In Russian)

10. Dzhusoity N.G. Message to friends in the land of silence. *Druzhba narodov* [Friendship of peoples]. 2000. No 12. Pp. 207–211. (In Russian)

11. Fidarova R.Ya. *Osetinskii literaturnyi protsess. Problemy istorii i teorii* [Ossetian literary process. Problems of history and theory]. Vladikavkaz, 2016. 312 p. (In Russian)

12. Fidarova R.Ya. *Filosofskie problemy sotsialisticheskogo realizma v osetinskoi literature* [Philosophical problems of socialist realism in Ossetian literature]. Vladikavkaz: SOIGSI VNTs RAN. Vol. 1. 2022. 370 p.; Vol. 2. 2023. 293 p. (In Russian)

13. Mamieva I.V. Authorial "I" in the Texts of the North Caucasian Enlightenment of the end of the XVIII – the First Half of the XIX Century. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo centra* [Herald of the Dagestan Scientific Center]. 2013. No. 50. Pp. 103–109. (In Russian)

14. Mamieva I.V. *Funktsiya bytiinogo v prostranstve obydennosti (roman «Plot' ot ploti» B. Gusalova)* [The Function of Existential in the Space of Commonness (the Novel "Flesh of a Flesh" by B. Gusalov)]. In: Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. No. 2–3. P. 79. (In Russian)

15. Mamieva I.V. Ontological motivation of the myth-based novel in Ossetian literature. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Proceedings of the International Conference "Topical Problems of Philology and Didactics*: Interdisciplinary Approach in Humanities and Social Sciences". 2019. Pp. 263–269. DOI: 10.2991/tphd-18.2019.51

16. Mamieva I.V. "Forth to Life" by E. Uruymagova in light of typological commonality with classical examples of family-generic novel. *Nauchny dialog*. 2019. No. 6. Pp. 139–158. DOI: 10.24224/2227-1295-2019-6-139-158. (In Russian)

17. Mamieva I.V. Genre features of the novel epic in ossetian literature: Correlation between ideological and national-ethnic. *Nauchnyi dialog*. 2020. No. 10. Pp. 280–296. DOI: 10.24224/2227-1295-2020-10-280-296. (In Russian)

18. Mamieva I.V. Intertextual cohesion as a tool for interpreting the author's idea (“Fatima” by K.L. Khetagurov). *Filologicheskie nauki. Nauchnye doklady vysshei shkoly* [Philological Sciences Scientific Reports of Higher]. 2023. No. 4. Pp. 53–60. DOI: 10.20339/PhS.4-23.053. (In Russian)

19. Britaeva A.B. Genre and style searches of Ossetian children's literature of the late XX – early XXI century. *Izvestiya SOIGSI* [Proceedings of the North Ossetian Institute for Humanitarian and Social Studies]. 2023. No. 50 (89). Pp. 95–106. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.50.006. (In Russian)

20. Britaeva A.B. Nart epic in Ossetian children's drama: specifics of intergenre interaction. *Filologicheskie nauki. Voprosy teorii i praktiki* [Philology. Theory & Practice]. 2023. Vol. 16. No. 12. Pp. 4371–4376. DOI: https://doi.org/10.30853/phil20230663. (In Russian)

21. Britaeva A.B. Literature and psychology: Ossetian children's literature as a tool of fairy tale therapy. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education]. 2020. No. 68-6. Pp. 19–22. DOI: 10.18411/lj-12-2020-226. (In Russian)

22. Dzaparova E.B. *Khudozhestvennyi perevod v osetinskoi literature. Problema adekvatnosti perevodnykh tekstov* [Literary Translation in Ossetian Literature. The Problem of Adequacy of Translated Texts]. Vladikavkaz, 2014. 312 p. (In Russian)

23. Dzaparova E.B. *Khudozhestvennyi perevod v osetinskoi literature: voprosy teorii i praktiki* [Literary Translation in Ossetian Literature: Theory and Practice]. Vladikavkaz, 2024. 107 p. (In Russian)

24. Panesh U.M. *Tipologicheskie svyazi i formirovanie khudozhestvenno-esteticheskogo edinstva adygskikh literatur* [Typological Connections and Formation of Artistic and Aesthetic Unity of Adyghe Literatures]. Maikop, 1990. 276 p. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Мамиева Изета Владимировна, канд. филол. наук, доцент, ст. науч. сотр., Северо-Осетинский институт гуманитарных и социальных исследований им. В. И. Абаева – филиал Федерального государственного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»;

362040, Россия, г. Владикавказ, пр-т Мира, 10;

dzirasga@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3083-1393, SPIN-код: 8715-6662

Information about the author

Izeta V. Mamieva, Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, North Ossetian Institute of Humanities and Social Research – Branch of the Federal State Institution of Science of the Federal Scientific Center Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

362040, Russia, Vladikavkaz, 10 Mira avenue;

dzirasga@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3083-1393, SPIN-code: 8715-6662

НОВОСТИ В НАУКЕ

УДК 902/904
DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-392-396
EDN: ZXEZSM

Сообщение

Петроглифы Хагондоково II: картина охоты на оленей

Ж. В. Кагазежев[1, 2]

[1]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2
[2]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Аннотация. Данная работа посвящена открытию и введению в научный оборот наскального изображения, найденного в июле 2024 г. среди комплекса петроглифов Хагондоково II. Рисунки представляют собой вырезанные на скальной породе антропоморфные и зооморфные фигуры. Уникальность открытых рисунков состоит в том, что они представляют цельную картину, изображения на которой показывают охоту людей на оленей. На наскальной картине охотники изображены с мечами, что является малоизвестным случаем подобных петроглифов. Указанные факты обусловливают актуальность настоящей темы исследования. Целью работы является внедрение в научный оборот недавно открытых наскальных изображений, найденных среди петроглифов Хагондоково II.

Ключевые слова: Хагондоково, петроглифы, вырезы, наскальная картина, сцена охоты, олени, охотники, неизвестное животное

Поступила 15.11.2024, одобрена после рецензирования 09.12.2024, принята к публикации 11.12.2024

Для цитирования. Кагазежев Ж. В. Петроглифы Хагондоково II: картина охоты на оленей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 392–396. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-392-396

Message

Petroglyphs of Khagondokovo II: a picture of deer hunting

Zh.V. Kagazezhev[1, 2]

[1]Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street
[2]Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov
360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street

Abstract. This work is dedicated to the discovery and introduction into scientific circulation of a rock image found in July 2024 among the complex of petroglyphs of Khagondokovo II. The drawings are carved into the rock, anthropomorphic and zoomorphic figures. The uniqueness of the open drawings lies in the fact that they represent a complete picture, the images of which show people hunting deer. In the rock painting hunters are depicted with swords, which is a little-known case of such petroglyphs. These facts determine the relevance of this research topic. The aim of the work is to introduce into scientific circulation the recently discovered rock carvings found among the petroglyphs of Khagondokovo II.

Keywords: Khagondokovo, petroglyphs, cutouts, rock painting, hunting scene, deer, hunters, unknown animal

© Кагазежев Ж. В., 2024

Submitted 15.11.2024, approved after reviewing 09.12.2024, accepted for publication 11.12.2024

For citation. Kagazezhev Zh.V. Petroglyphs of Khagondokovo II: a picture of deer hunting. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 392–396. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-392-396

В июле 2024 г. состоялась экспедиция Научно-инновационного центра «Естественно-научные методы в археологии, антропологии и археографии» (НИЦ ЕМААА) КБНЦ РАН в окраины с. Али-Бердуковский, проходившая при помощи местного жителя – краеведа О. Д. Жужуева (31.10.1988 г. р.). Руководство экспедицией осуществлял заведующий НИЦ ЕМААА КБНЦ РАН Ж. В. Кагазежев. Наскальная картина (рис. 1, 2) обнаружена на расстоянии 500 м западнее северно-западной окраины с. Али-Бердуковский, около балки Бэчби среди петроглифов Хагондоково II, зафиксированных в апреле 2023 г. [1, 2]. Петроглифы Хагондоково II имеют сходство с другими наскальными изображениями Северного Кавказа и не носят локальный характер. Аналоги наскальных изображений Хагондоково II встречаются в бассейне Северного Средиземноморья и в основном датируются эпохой неолита.

Рассматриваемые нами детали наскальной картины вырезаны на скале известняковой породы высотой около 1000 м над уровнем моря. Наскальная картина представляет собой сцену охоты людей на оленей и занимает площадь 100 х 90 см. В центре картины находятся две антропоморфные фигуры с мечом на уровне пояса (рис. 3, 4). Мечи, судя по изображению, скорее всего, являются металлическими. Подобные изображения людей с мечами малоизвестны. В основном встречаются петроглифы с изображением антропоморфных фигур с луками и стрелами либо копьями. Возможно, древний художник хотел изобразить не только охотников, но и воинов – как выделяющийся класс социальной иерархии.

Самый древний известный меч сделан из бронзы и найден археологом А. Д. Резепкиным в Республике Адыгея Российской Федерации, в каменной гробнице новосвободненской (майкопской) культуры. Он датируется второй третью IV тыс. д. н. э. [3]. В мегалитическом захоронении бронзовый протомеч был символически согнут. Древний меч, датируемый концом IV тыс. д. н. э., найден и в верховьях р. Тигр в древнем дворце Арслантепе (современ. Турция). Считается, что из Анатолии мечи постепенно распространились на Ближний Восток и в Европу [4–6].

Изначально металлический меч был доступен наиболее богатой социальной прослойке воинов. Он символизировал воинское сословие, мужественность, благородство, честь, лидерство, силу и т. д. В некоторых политеистических религиях меч являлся атрибутом бога войны, охранителя общественного порядка. Возможным подтверждением особого социального статуса изображенных на наскальной картине охотников-воинов является наличие третьего человека справа от них и оленей. Он изображен без оружия и с поднятыми руками (рис. 2), гонит оленей к воинам-охотникам. На скале отчетливо видны изображения двух рогатых оленей (рис. 5, 6), убегающих по бокам от воинов-охотников.

Примечательным является и изображение неизвестного животного, которое находится в верхней части наскальной картины. Создается впечатление, что неизвестное животное, отрываясь от всех, убегает вверх. Возможно, мы видим лишь остатки сохранившегося более объемного древнего наскального изображения.

Таким образом, наскальная картина сцены охоты на оленей, обнаруженная среди петроглифов Хагондоково II, является уникальной. Кроме выраженной сцены охоты, в ней, возможно, изображены признаки социальной дифференциации и выделения среди племени класса воинов. Наскальную картину среди петроглифов Хагондоково II предварительно можно отнести к раннему бронзовому веку IV–III тыс. д. н. э. Очередная находка

группы петроглифов в комплексе наскальных изображений Хагондоково II свидетельствует об особой значимости местности и возможных дальнейших, не менее интересных для науки открытий в регионе.

ПРИЛОЖЕНИЕ: НАСКАЛЬНАЯ КАРТИНА ОХОТЫ НА ОЛЕНЕЙ

Рис. 1. *Часть скалы с изображением охоты людей на оленей*

Fig. 1. *Part of a rock with an image of people hunting deer*

Рис. 2. *Человек, гонящий оленей на охотников*

Fig. 2. *A man driving deer towards hunters*

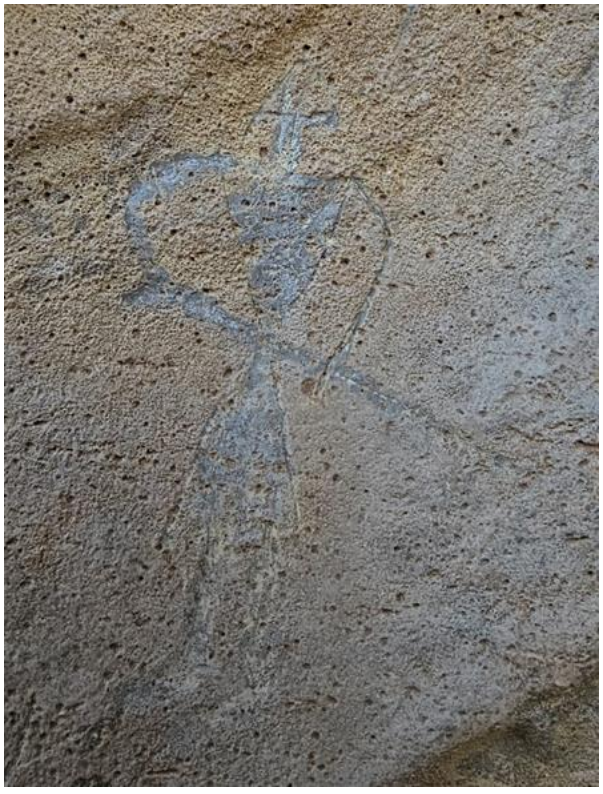


Рис. 3. *Охотник с мечом*

Fig. 3. *A hunter with a sword*

Рис. 4. *Охотник с мечом, сверху изображение оленя*

Fig. 4. *Hunter with a sword and a deer from above*

Рис. 5. *Олень в нижнем углу части скалы*

Fig. 5. *Deer in the lower corner of the rock*

Рис. 6. *В верхней части наскальной картины изображение бегущего животного*

Fig. 6. *Image of an animal running on top of a rock painting*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кагазежев Ж. В.* Петроглифы Хагондоково // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 4(114). С. 121–131.

2. *Кагазежев Ж. В.* Петроглифы Хагондоково: аналоги и их распространение // Вестник Владикавказского научного центра. 2024. Т. 24. № 1. С. 62–66.

3. Самый древний меч в мире. Архивная копия от 5 марта 2016 на Wayback Machine (протомеч Архивная копия от 5 марта 2016 на Wayback Machine). URL: https://web.archive.org/

4. *Резепкин А. Д.* Курган 31 могильника Клады. Проблемы генезиса и хронологии майкопской культуры // Древние культуры. Л., 1991. С. 167–197.

5. Древняя Россия: Не все инновации пришли из Европы и с Востока. Часть II. URL: https://web.archive.org/web/20130409230512/http://www.km.ru/nauka/2011/06/14/istoriya-rossiiskoi-imperii/drevnyaya-rossiya-ne-vse-innovatsii-prishli-iz-evropy-i

6. *Rezepkin A. D.* Das fruhbronzezeitlicht Graberfeld von Klady und die Majkop - Kultur in Nordwestkaukasien. Rahden / Wes N. 4/2002. Pp. 170–175.

REFERENCES

1. Kagazezhev Zh.V. Petroglyphs of Khagondokovo. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 4(114). Pp. 121–131. (In Russian)

2. Kagazezhev Zh.V. Petroglyphs of Khagondokovo: analogues and their distribution. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra* [Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center]. 2024. Vol. 24. No. 1. Pp. 62–66. (In Russian)

3. *Samyy drevniy mech v mire. Arkhivnaya kopiya ot 5 marta 2016 na Wayback Machine (protomech Arkhivnaya kopiya ot 5 marta 2016 na Wayback Machine)* [The oldest sword in the world. Archived copy dated March 5, 2016 on Wayback Machine (protomech Archived copy dated March 5, 2016 on Wayback Machine)]. URL: https://web.archive.org/ (In Russian)

4. Rezepkin A.D. Kurgan 31 burial grounds of the Treasure. Problems of genesis and chronology of the Maikop culture. *Drevniye kul'tury* [Ancient cultures]. L., 1991. Pp. 167–197.

5. *Drevnyaya Rossiya: Ne vse innovatsii prishli iz Evropy i s Vostoka* [Ancient Russia: Not all innovations have come from Europe and the East] Part II. URL: https://web.archive.org/web/20130409230512/http://www.km.ru/nauka/2011/06/14/istoriya-rossiiskoi-imperii/drevnyaya-rossiya-ne-vse-innovatsii-prishli-iz-evropy-i. (In Russian)

6. Rezepkin A.D. Das fruhbronzezeitlicht Graberfeld von Klady und die Majkop - Kultur in Nordwestkaukasien. Rahden / Wes N. 4/2002. Pp. 170–175.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Жираслан Валерьевич Кагазежев, канд. истор. наук, зав. научно-инновационным центром «Естественно-научные методы в археологии, антропологии и археографии», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360010, Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2;

доцент, кафедра всеобщей истории, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова;

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

jiraslan@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0508-3493, SPIN-код: 2606-0979

Information about the author

Zhiraslan V. Kagazezhev, Candidate of Historical Sciences, Head of the Scientific and Innovation Center Natural Scientific Methods in Archaeology, Anthropology and Archaeography of Kabardino-Balkarian Scientific Center;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

Associate Professor, Department of General History, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

jiraslan@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0508-3493, SPIN-code: 2606-0979

ЮБИЛЯРЫ

Хизри Амирхановичу Амирханову – 75 лет

29 декабря 2024 года исполняется 75 лет выдающемуся советскому и российскому археологу, специалисту в области палеолита Ближнего Востока, Кавказа и верхнего палеолита Восточной Европы, доктору исторических наук, профессору, академику Российской академии наук Хизри Амирхановичу Амирханову.

Х. А. Амирханов родился в 1949 году в с. Анди Ботлихского района Дагестанской АССР. В 1967 году окончил Андийскую среднюю школу, а в 1972-м – исторический факультет Дагестанского государственного университета.

После окончания университета Хизри Амирханович начал трудовую деятельность в качестве учителя истории и заместителя директора средней школы в с. Муни Ботлихского района Дагестанской АССР.

Обучался в аспирантуре Ленинградского отделения Института археологии Академии наук СССР. В 1977 году был принят на работу в Институт археологии АН СССР. В том же году Х. А. Амирханов защитил диссертацию «Верхний палеолит Северного Кавказа и его соотношение с верхним палеолитом смежных территорий» на соискание ученой степени кандидата исторических наук. Далее он последовательно прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего отделом Института археологии АН СССР.

В 1989 году защитил диссертацию «Палеолит Юга Аравии» на соискание ученой степени доктора исторических наук, продолжая работать в Институте археологии АН СССР. В 1992–1994 годах был заведующим сектором палеолита и мезолита Института археологии РАН, с 1994 года – заведующим созданного им отдела каменного века. С 1995 года по настоящее время руководит Зарайской археологической экспедицией.

В 1999 году Х. А. Амирханову было присвоено ученое звание профессора. В 2002 году Хизри Амирханович был избран членом-корреспондентом Германского археологического института. С 2003 года по настоящее время он руководит Северо-Кавказской археологической экспедицией. В 2003 году избран членом-корреспондентом Российской академии наук. В 2008–2022 гг. работал в качестве заместителя академика-секретаря Отделения историко-филологических наук РАН.

В 2009–2015 гг. Х. А. Амирханов был председателем Дагестанского научного центра РАН и директором Института истории, археологии и этнографии ДНЦ РАН. С 2015 г. он научный руководитель Института истории, археологии и этнографии ДФИЦ РАН.

15 ноября 2019 года был избран академиком Российской академии наук по отделению историко-филологических наук (российская история).

За достижения в области науки и общественную деятельность Х. А. Амирханов удостоен ряда высоких наград и званий: медаль в ознаменование 850-летия Москвы (1997); почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Дагестан» (1999); Почетный гражданин г. Зарайск Московской области (2000); лауреат Национальной премии «Достояние поколений» (2008); орден «За заслуги перед Республикой Дагестан» (2014); орден «Народный Герой Дагестана» (2014); лауреат Международной премии Шанхайского археологического форума (2017); медаль «За заслуги в археологии Кавказа» (2021).

В сферу научных интересов Х. А. Амирханова входят вопросы археологии и первобытной истории Кавказа, Восточной Европы и Ближнего Востока. Он успешно занимается проблемами установления общеевропейских черт и местных особенностей культуры на ранних этапах освоения человеком Русской равнины, проявления «неолитической революции» и начала производящего хозяйства на юге современной территории России. Им сделаны принципиально важные открытия, имеющие отношение к фундаментальным проблемам древнейшей истории и археологии, открыто и исследовано много десятков археологических памятников, среди которых имеются уникальные по своей научной значимости. Они охватывают территорию Северного и Южного Кавказа, Западной Сибири, Казахстана, Йемена.

Х. А. Амирханов автор более 280 научных трудов, в том числе более 15 индивидуальных и коллективных монографий (Верхний палеолит Прикубанья. М., 1986; Чохское поселение: человек и его культура в мезолите и неолите Горного Дагестана. М., 1987; Палеолит юга Аравии. М, 1991; История первобытного общества. М., 1992; Неолит и постнеолит хадрамаута и махры. М., 1997; Зарайская стоянка. М., 2000; Каменный век Южной Аравии. М., 2006; Палеолит юга Аравии. М., 2006; Исследование памятников Олдована на Северо-Восточном Кавказе, 2007; Проблемы палеолита Дагестана (в соавторстве). Новосибирск, 2012; Красноморский мир в древности (в соавторстве). М., 2012; Северный Кавказ: начало преистории. Махачкала, 2016; Первобытные древности Западной Евразии. М., 2020). Его труды опубликованы в научных изданиях России, Германии, Испании, Италии, Йемена, Дании, Франции, США и других стран.

Хизри Амирханович успешно сочетает исследовательскую деятельность с преподавательской работой. В 1992–1993 годах он заведовал кафедрой этнографии и истории первобытного общества Российского открытого университета (по совместительству), в 1993/1994 учебном году читал курс «Основы археологии» на кафедре антропологии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, и по настоящее время осуществляет научное руководство аспирантами.

Х. А. Амирханов – член комиссии по верхнему палеолиту Международного союза доисторических и протоисториков, член ученого и диссертационного советов Института археологии РАН. Был председателем экспертного совета отдела наук о человеке и обществе Российского фонда фундаментальных исследований (2001–2007) и членом экспертного совета по истории Высшей аттестационной комиссии РФ (2003–2007).

Х. А. Амирханов является членом редакционных коллегий и редакционных советов журналов «Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология», «История, археология и этнография Кавказа», «Нижневолжский археологический вестник», «Уфимский археологический вестник», «Поволжская Археология», «Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Общественные и гуманитарные науки», «Археология, этнография и антропология Евразии», «Oriental Studies», «Проблемы истории, филологии, культуры», «Вестник Дагестанского научного центра РАН», «Вестник Прикаспия: археология, история, этнология», «Вестник Калмыцкого университета», «Восток. Афро-азиатские общества: история и современность», «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН», «Camera Praehistorica», «Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: История, филология», «Российская археология».

Коллектив Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук от всей души поздравляет Х. А. Амирханова с 75-летним юбилеем и желает крепкого здоровья, кавказского долголетия, счастья и благополучия, дальнейших творческих успехов на благо российской науки!

ЮБИЛЯРЫ

Николаю Ивановичу Комкову – 85 лет

Николай Иванович родился в поселке Клязьма 9 декабря 1939 года. В 1962 году будущий ученый окончил Московский нефтяной институт им. И. М. Губкина. Сразу после получения диплома начал работать старшим инженером в Институте автоматики и телемеханики АН СССР. В 1969 году получил должность заведующего лабораторией Центрального экономико-математического института АН СССР. Там он проработал до 1986 года, после чего возглавил лабораторию Института народнохозяйственного прогнозирования РАН.

Член-корреспондент РАЕН, доктор экономических наук, профессор Н. И. Комков работает в Институте народнохозяйственного прогнозирования с момента его основания и по сей день, является одним из ведущих в России специалистов по исследованию проблем научно-технологического прогнозирования, инновационно-ориентированной модернизации экономики, научно-технической политики, инновационного развития, программно-целевого управления на федеральном и региональном уровнях.

Наиболее значительные результаты исследований Н. И. Комкова связаны с разработкой экономико-математических моделей управления технологиями, организационно-экономических механизмов реализации стратегии инновационно-технологического развития экономики. Под его руководством сложилось ведущее научное направление по прогнозированию и управлению технологическим развитием, инновационными предприятиями и проектами.

Результаты научных исследований Н. И. Комкова нашли практическое применение при разработке Комплексной программы научно-технического развития СССР, аналитических и прогнозных документов и проектов, выполненных ИНП РАН по заказу различных федеральных ведомств.

Н. И. Комков ведет активную научно-организационную и педагогическую работу. Является членом бюро Совета РАН по космосу, главным редактором журнала МИР (Модернизация. Инновации. Развитие) – одного из ведущих российских научных изданий в области научно-технического развития и инноваций. Под его научным руководством подготовлены и успешно защищены 42 кандидатские и 10 докторских диссертаций. За период научной деятельности Н. И. Комковым опубликовано более 260 работ, в том числе 19 индивидуальных и коллективных монографий, брошюр, учебных пособий, индекс Хирша по РИНЦ – 32.

Награды: Государственная премия СССР в области науки и техники (1986), медаль «Ветеран труда» (1988), медаль «В память 850-летия Москвы» (1997), Почетная грамота РАН в связи с 275-летием Академии (1999), Премия РАН им. Н. Д. Кондратьева (2010), медаль «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития» (2021), почетное звание «Почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации» (2024).

Уважаемый Николай Иванович, коллектив Кабардино-Балкарского научного центра РАН от всей души поздравляет Вас с 85-летним юбилеем! Желаем крепкого здоровья, кавказского долголетия, счастья и благополучия, дальнейших творческих успехов на благо российской науки!

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ АВТОРАМИ В ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН»

1. Журнал **«Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН»** публикует оригинальные научные, обзорные, аналитические статьи отечественных и зарубежных авторов, рецензии на книги и статьи, персоналии по следующим группам специальностей:

1.1. Математика и механика; 1.2. Компьютерные науки и информатика; 1.3. Физические науки; 1.6. Науки о Земле и окружающей среде; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации; 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство; 4.2. Зоотехния и ветеринария; 5.2. Экономика; 5.4. Социология; 5.5. Политические науки; 5.6. Исторические науки; 5.9. Филология.

Журнал предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов. Периодичность – шесть выпусков в год. Журнал публикует статьи на русском и английском языках объемом не менее 8 и не более 20 страниц макетного формата (не менее 18 000 символов). Работы, превышающие объем, принимаются к публикации по специальному решению главного редактора журнала.

Журнал 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 (по состоянию на 09.12.2024, п. 1318):

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-htm/, на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Научной электронной библиотеки «Киберленинка», в Российской государственной библиотеке, ВИНИТИ, Google Scholar. Статьи по сельскому хозяйству размещаются в AGRIS. Статьи по математике, физике, информатике, математическому моделированию в экономике и по наукам о земле размещаются на Общероссийском математическом портале Math-Net.Ru www.mathnet.ru (http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=izkab&optionlang=rus). Срок размещения редакцией очередного номера журнала – в течение 3 месяцев с даты выхода в свет номера.

6. Публикации в журнале для сотрудников КБНЦ РАН бесплатные, для сторонних авторов – 500 руб. за страницу. 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, новизна, методика и результаты научного исследования, 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.

В аннотации и заключении не допускается использование громоздких формул, ссылок на текст работы или список литературы.

Сведения об авторах (на русском и английском языках): фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, название подразделения, полное название места работы (может быть более одного), рабочий адрес, ORCID, SPIN-код, E–library.

Для связи с редакцией – контактный телефон одного из авторов.

8. Список литературы должен содержать только ссылки на научные статьи (периодические журналы, монографии, труды конференций и т.д.), которые упоминаются в тексте работы, расположенные в порядке цитирования, не менее 15. Ссылки на неопубликованные работы, результаты которых используются в доказательствах, не допускаются. Недопустимо использование ссылок на авторефераты, диссертации, газеты, интернет-сайты журналов, электронные газеты. Список литературы печатается в конце статьи, оформляется в соответствии с правилами, предусмотренными журналом. Все остальные источники, использованные при написании статьи, выносятся в сноски в конце каждой страницы (при необходимости). В списке литературы необходимо указывать не менее 50 % от общего количества источников за последние 5 лет (как самого автора, так и сторонних авторов, работающих в данном направлении; в том числе зарубежных источников), не более 20 % ссылок на собственные работы. Исключение составляют статьи, которые посвящены исследованиям конкретных документов.

В списке литературы должны быть указаны источники по образцу:

• статья – Фамилия И. О. Название статьи // Название журнала. Год. Том. Номер. С. …-… DOI…

• книга – Фамилия И. О. Название книги: монография. Город: Издательство, Год. … с.

• коллективная монография – Фамилия И. О. Название книги / под ред. Фамилия И. О. Город: Издательство, Год. … с.

• статья в сборнике конференций – Фамилия И. О. Название статьи // Название конференции: материалы конференции * / Название организации. Город, Год. С. …-… DOI…

• статья в электронном издании – Фамилия И. О. Название статьи [Электронный ресурс] // Название журнала, Год. Том. Номер. С. …-… URL:… (дата обращения: число, месяц, год).

9. Список литературы **полностью** дублируется на **английском языке** независимо от того, имеются в нем иностранные источники или нет.

Пояснения по формированию списка литературы и References.

Если статья, на которую указывает ссылка, была переведена на английский язык и опубликована в английской версии журнала, необходимо указывать ссылку из переводного источника! Указания (учебное пособие, монография, перевод, количество томов и т.д.) в References можно опускать. При цитировании оригинального источника на английском языке в названии с прописной буквы пишется первое слово. В названии журнала пишется каждое полнозначное слово с прописной буквы.

Библиографические описания публикаций в References составляют в следующей последовательности:

журнальная статья

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Zaglavie jurnala* [Title of Journal]. Year. Vol. ... No. ...iss. … Pp. ...-… DOI (In Russian);

в случае, если у журнала есть официальное название на английском языке, источник оформляется в таком виде:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Title of Journal*. Year. Vol. ... No. ...iss. … Pp. ...-… DOI (In Russian);

монография, книга, глава из книги, препринт

Author A.A., Author B.B., Author C.C. *Nazvanie* [Title of book]. Gorod: Izdanie. Year. Pages p. (In Russian);

статья в материалах конференции

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie konferensii.* Gorod, Organizacia. Year. Pages p. (In Russian);

статья в электронном издании

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie zhurnala,* Year, Pages p., available at: http…. (accessed Data Year).

Журнал «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» при оформлении руководствуется ГОСТ 7.0.7 – 2021, ГОСТ Р 7.0.12.

На сайте http://www.translit.ru/ можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста в латиницу. Для этого, выбрав вариант системы **Board of Geographic Names (BGN),** получаем изображение всех буквенных соответствий.

10. Требования к электронному носителю:

- к статье прилагается электронный вариант в формате Microsoft Office Word 2007, Windows XP, Windows 7, 10;
- статья должна быть набрана в формате А4 с полями: верхнее и нижнее – 2,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2 см, шрифтом Times New Roman, размер 14, полуторный интервал;
- таблицы, алгоритмы, рисунки, схемы и т.п. должны быть редактируемые и выполнены в формате А4 книжной ориентации;
- формулы должны быть набраны в программе MathType, нумеровать следует те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

11. Решение о публикации или отклонении авторских материалов принимается редколлегией в соответствии с правилами рецензирования статей. Для экспертной оценки статей привлекаются ведущие специалисты по основным научным направлениям (рубрикам) выпуска журнала.

12. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

13. В каждом выпуске публикуется, как правило, не более одной статьи одного и того же автора. Решение о публикации более одного материала принимается редакционной коллегией и главным редактором журнала.

14. Статьи, оформленные без соблюдения указанных правил, не рассматриваются.

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 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 (as of December 09, 2024, p. 1318):

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. 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 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 novelty, relevance and methodology and results of scientific research, conclusions, volume is no more than 150–250 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.

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).

The journal «News of the Kabardino-Balkarian scientific center of RAS» is formatted according to State Standard GOST 7.0.7 – 2021, GOST R 7.0.12.

On the site http://www.translit.ru/ you can use the program of transliteration of the Russian text into the Latin alphabet for free. For this, choosing the option of the **Board of Geographic Names (BGN)** system, one can get an image of all letter matches.

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.

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

Том 26 № 6 2024

Сквозной номер выпуска – 122

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 – ***Д. Г. Макоева***

ISSN 1991-6639

9 771991 663000 >

Подписано в печать 20.12.2024 г. Дата выхода в свет: 28.12.2024 г.
Формат бумаги 60x84 1/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 47.43. Тираж 300 экз.

Цена свободная

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-14936 от 20 марта 2003 г. выдано Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Учредитель: Кабардино-Балкарский научный центр РАН

Адрес редакции и издателя: 360010, КБР, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Отпечатано в редакционно-издательском отделе КБНЦ РАН по адресу:
360010, КБР, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

ISSN 1991-6639

DOI: 10.35330/1991-6639