Print ISSN 1991-6639
Online ISSN 2949-1940

№ 6(116) 2023

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИЗВЕСТИЯ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

1998 25 ЛЕТ 2023

DOI: 10.35330/1991-6639
Подписной индекс 20145

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

№ 6(116) 2023

Журнал основан в 1998 г. Выходит 6 раз в год

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ №77-14936 от 20 марта 2003 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

360010, Российская Федерация, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2
Тел., факс: 8(8662)72-04-87, e-mail: ired07@mail.ru

© КБНЦ РАН, 2023

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

№ 6(116) 2023

The journal was founded in 1998, 6 issues per year

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

The certificate of registration of mass media of PI No. 77-14936 dated March 20, 2003 was granted by Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE:

360010, Russian Federation, Kabardino-Balkarian, Nalchik, 2 Balkarov street
Tel., fax: 8(8662) 72-04-87, e-mail: ired07@mail.ru

© KBSC RAS, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН № 6(116) 2023

Редакционная коллегия……7

Информационные технологии и телекоммуникации

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Система учета баланса CO_2 в цикле «почва – растение – атмосфера»
Ю. К. АЛЬТУДОВ, З. И. ДУДАРОВ, А. Х. ЗАНИЛОВ……13

Подход к распределению работ в коллаборативной робототехнической системе с учетом модели рабочего пространства и динамического переназначения исполнителей
Р. Р. ГАЛИН, С. Б. ГАЛИНА, М. В. МАМЧЕНКО……21

Разработка экспериментальной лабораторной системы для исследования процессов автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением мягких полимерных мехатронных конструкций
А. У. ЗАММОЕВ, Р. Н. АБУТАЛИПОВ……33

Разработка проекта передвижного робота для замены аккумуляторных батарей
Р. А. НОТОВ……47

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

Метод компьютерного проектирования разветвленных трубопроводных гидравлических сетей с оптимальным количеством точек Штейнера
М. А. БАГОВ……55

Возможные режимы и оптимизация работы светофора на двухполосном перекрестке города
В. Ч. КУДАЕВ, А. К. БУЗДОВ……65

Тестирование программ и математическая модель поиска ошибок в программном комплексе
И. В. КУЧУМОВ……74

Восстановление порядка дробной производной в задаче математического моделирования накопления радона в избыточном объеме накопительной камеры по данным Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона
Д. А. ТВЁРДЫЙ……83

Информатика и информационные процессы

Обучение искусственной нейронной сети с использованием гибридного алгоритма оптимизации PSOJaya
Е. М. КАЗАКОВА……95

Информационное обеспечение реометрических исследований процессов структурирования эластомерных композитов
А. С. КУЗНЕЦОВ……103

Разработка алгоритма на основе логических операций для обнаружения закономерностей в неполных данных
Л. А. ЛЮТИКОВА……109

Системный анализ, управление и обработка информации

Моделирование и оптимизация модулей и информационных массивов в киберфизической системе
Т. В. АВЕТИСЯН, Я. Е. ЛЬВОВИЧ, А. П. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ, Ю. П. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ……116

Система виртуального моделирования робототехнических систем сельскохозяйственного назначения
М. И. АНЧЁКОВ, А. М. ЛЕШКЕНОВ……125

Кооперативное взаимодействие участников гетерогенного коллектива автономных агентов с использованием нейрокогнитивных моделей согласованного поведения
К. Ч. БЖИХАТЛОВ, И. А. ПШЕНОКОВА, О. В. НАГОЕВА……132

О нахождении оценки сложности дискретных k-значных функций
Д. П. ДИМИТРИЧЕНКО……142

Интеллектуальные методы кластеризации данных
Р. А. ЖИЛОВ……152

Комбинированный метод выравнивания гистограммы изображений с высоким динамическим диапазоном
М. А. КАЗАКОВ……160

Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде
В. Н. ЛЕ, А. Л. РОНЖИН……167

Алгоритм нейрокогнитивного обучения мультиагентной системы эволюционного моделирования экспрессии генов по данным ПЦР-анализа растений
З. В. НАГОЕВ, М. И. АНЧЁКОВ, Ж. Х. КУРАШЕВ, А. А. ХАМОВ……179

Мультиагентный нейрокогнитивный алгоритм управления референцией речевых событий коммуникации агента общего искусственного интеллекта в ситуации синхронных множественных диалогов
З. В. НАГОЕВ, О. В. НАГОЕВА, Д. Г. МАКОЕВА, И. А. ГУРТУЕВА……193

Классификация и условия применения алгоритмов автоматической онтологизации пространства состояний агента общего искусственного интеллекта под управлением нейрокогнитивной архитектуры
З. В. НАГОЕВ, И. А. ПШЕНОКОВА, М. И. АНЧЁКОВ, К. Ч. БЖИХАТЛОВ, Б. А. АТАЛИКОВ, С. А. КАНКУЛОВ, А. З. ЭНЕС……210

Имитационная модель нейрокогнитивной системы управления автономным программным агентом, выполняющим кооперативное поведение с целью автоматического пополнения онтологий
З. В. НАГОЕВ, И. А. ПШЕНОКОВА, О. В. НАГОЕВА, М. И. АНЧЁКОВ, А. З. ЭНЕС……226

Модель интеллектуального распределения трафика в кластерных сегментах теплотехнологических систем
Б. В. ОКУНЕВ, Е. К. ВЕРЕЙКИНА, А. И. ЛАЗАРЕВ……235

Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий
М. А. ШЕРЕУЖЕВ, Ф. В. ДЕВЯТКИН, Д. И. АРАБАДЖИЕВ, М. А. ШЕРЕУЖЕВ……247

Агрономия, лесное и водное хозяйство

Селекция, семеноводство и биотехнология растений

Комбинационная способность новых инбредных линий кукурузы селекции ВНИИК
Л. А. ГАЛГОВСКАЯ, О. В. ТЕРКИНА, А. Н. РОМАНОВА……264

Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

Влияние приемов биологизации на урожайность сельскохозяйственных культур и плодородие почвы
Р. В. БИЖОЕВ, М. В. БИЖОЕВ……270

Экономика

Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

Экономико-математическое моделирование загрязнения окружающей среды региональных территорий
С. И. ШАГИН, А. Г. ЕЗАОВА……282

Региональная и отраслевая экономика

Модели развития «умных деревень» и механизм их внедрения на территории КБР
О. З. ЗАГАЗЕЖЕВА, С. Х. ШАЛОВА, М. И. МИСОСТИШХОВА……290

Проблемы роботизации и социальная адаптация сельских территорий
М. И. МИСОСТИШХОВА, К. Ф. КРАЙ, М. И. ХАДЖИЕВА, Х. А. БАРОКОВ……307

Менеджмент

Алгоритм управления оборотными активами компаний машиностроительного комплекса и основной инструментарий
Н. В. ГРЫЗУНОВА, А. А. ХВОСТОВА, А. М. ТРАМОВА……319

Возможные последствия внедрения умных производственных систем «Умная фабрика» в период интеллектуализации среды обитания
О. З. ЗАГАЗЕЖЕВА, С. Х. ШАЛОВА……329

Социология

Современные демографические и миграционные процессы в КБР и их влияние на социально-экономическое развитие
И. А. ТАБАКСОЕВ……345

Исторические науки

«Бог дружбы да накажет злодея!»: заметки к семантическому напряжению («подданство» vs. «хьэщIагъэ») в пространстве российско-черкесского политического взаимодействия в XVIII в.
Т. А. АЛОЕВ……354

К вопросу о деятельности горских словесных судов Терской и Кубанской областей в 1870–1917 гг. в современной историографии
М. А. ХАГАЖЕЕВ……366

Филология

Литературоведение

Эволюция творчества адыгских писателей XX века
Ю. М. ТХАГАЗИТОВ……375

Асхат Биджиев: врач, поэт, просветитель
Ф. Т. УЗДЕНОВА……384

Компьютерная лингвистика

Теории воплощенного познания в задаче формальной репрезентации семантики на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур
Д. Г. МАКОЕВА, К. Ф. КРАЙ, А. З. ЭНЕС……391

Юбиляры

Ф. А. ТЕМБОТОВА……400

Правила для авторов журнала……401

CONTENTS

News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences No. 6(116) 2023

Editorial Board……7

Information Technologies and Telecommunications

Automation and control of technological processes and productions

System for accounting for CO_2 balance in the "soil – plant – atmosphere" cycle
Yu.K. ALTUDOV, Z.I. DUDAROV, A.Kh. ZANILOV……13

Approach to task allocation in a collaborative robotic system considering the working space model and dynamic reassignment of the performers
R.R. GALIN, S.B. GALINA, M.V. MAMCHENKO……21

Design of an experimental laboratory system to examine the processes of automatic design and prototyping of soft polymer mechatronic constructions with intelligent control
A.U. ZAMMOEV, R.N. ABUTALIPOV……33

Project development of a mobile robot to change accumulator batteries
R.A. NOTOV……47

Computer modeling and design automation

Computer design method of branched pipeline hydraulic networks with an optimal number of Steiner points
M.A. BAGOV……55

Possible modes and optimization of traffic light operation at a two-lane city intersection
V.Ch. KUDAEV, A.K. BUZDOV……65

Software testing and mathematical error finding model
I.V. KUCHUMOV……74

Restoration of the order of fractional derivative in the problem of mathematical modelling of radon accumulation in the excess volume of the storage chamber based on the data of Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon
D.A. TVERDYI……83

Informatics and information processes

Training an artificial neural network using the PSOJaya hybrid optimization algorithm
E.M. KAZAKOVA……95

Information support for rheometric studies of structuring processes of elastomer composites
A.S. KUZNETSOV……103

Development of an algorithm based on logical operations to detect patterns in data with missing values
L.A. LYUTIKOVA……109

System analysis, management and information processing

Modeling and optimization of modules and information arrays in a cyberphysical system
T.V. AVETISYAN, Ya.E. LVOVICH, A.P. PREOBRAZHENSKY, Yu.P. PREOBRAZHENSKY……116

System for virtual simulation of robotic systems for agricultural purposes
M.I. ANCHEKOV, A.M. LESHKENOV……125

Cooperative interaction of participants in a heterogeneous team of autonomous agents using neurocognitive models of coordinated behavior
K.Ch. BZHIKHATLOV, I.A. PSHENOKOVA, O.V. NAGOEVA……132

On finding an estimate of the complexity of discrete k-valued functions
D.P. DIMITRICHENKO……142

Intelligent data clustering methods
R.A. ZHILOV……152

A combined method for histogram equalization of high dynamic range images
M.A. KAZAKOV……160

Methods and technical means of positioning and navigation of robots in the aquatic environment
V.N. LE, A.L. RONZHIN……167

Neurocognitive learning algorithm for a multi-agent system for evolutionary modeling of gene expression according to PCR analysis of plants
Z.V. NAGOEV, M.I. ANCHEKOV, Zh.Kh. KURASHEV, A.A. KHAMOV……179

Multi-agent neurocognitive algorithm for controlling the reference of speech events of communication of a general artificial intelligence agent in a situation of synchronous multiple dialogues
Z.V. NAGOEV, O.V. NAGOEVA, D.G. MAKOEVA, I.A. GURTUEVA……193

Classification and conditions of application of algorithms for automatic ontologization of the state space of a general artificial intelligence agent under the control of neurocognitive architecture
Z.V. NAGOEV, I.A. PSHENOKOVA, M.I. ANCHEKOV, K.Ch. BZHIKHATLOV, B.A. ATALIKOV, S.A. KANKULOV, A.Z. ENES……210

Simulation model of a neurocognitive control system for an autonomous software agent performing cooperative behavior to automatically replenish ontologies
Z.V. NAGOEV, I.A. PSHENOKOVA, O.V. NAGOEVA, M.I. ANCHEKOV, A.Z. ENES……226

Intelligent traffic distribution model in cluster segments of heat technology systems
B.V. OKUNEV, E.K. VEREYKINA, A.I. LAZAREV……235

Simulation of group management of agricultural robots using finite state machines and ontologies
M.A. SHEREUZHEV, F.V. DEVYATKIN, D.I. ARABADJIEV, M.A. SHEREUZHEV……247

Agronomy, Forestry and Water management

Breeding, seed production and plant biotechnology

Combination ability of new inbred corn lines bred by VNIIK
L.A. GALGOVSKAYA, O.V. TERKINA, A.N. ROMANOVA……264

Agrochemistry, agrosoil science, plant protection and quarantine

The influence of biologization techniques on crop yields and soil fertility
R.V. BIZHOEV, M.V. BIZHOEV……270

Economy

Mathematical, statistical and instrumental methods in economics

Economic and mathematical modeling of environmental pollution of regional territories
S.I. SHAGIN, A.G. EZAOVA……282

Regional and sectoral economics

Models for the development of “Smart Villages” and the technique of their implementation on the territory of the KBR
O.Z. ZAGAZEZHEVA, S.Kh. SHALOVA, M.I. MISOSTISHKHOVA……290

Problems of robotization and social adaptation of rural areas
M.I. MISOSTISHKHOVA, K.F. KRAI, M.I. KHADZHIEVA, Kh.A. BAROKOV……307

Management

The algorithm for managing the current assets of machine-building companies and the main tools
N.V. GRYZUNOVA, A.A. KHVOSTOVA, A.M. TRAMOVA……319

Possible consequences of the development of smart production systems “Smart Factory” during the period of intellectualization of living environment
O.Z. ZAGAZEZHEVA, S.Kh. SHALOVA……329

Sociology

Modern demographic and migration processes in the KBR and their impact on the socio-economic development
I.A. TABAKSOEV……345

Historical sciences

“The god of friendship punish the villain!”: notes on semantic tension (“allegiance” vs. “kheshiagye”) in the space of Russian-Cherkassian political interaction in the 18th century
T.A. ALOEV……354

On the issue of the activities of the highland verbal courts of the Terek and Kuban regions in 1870-1917 in modern historiography
M.A. KHAGAZHEEV……366

Philology

Literary studies

The evolution of creativity of Adyghe writers of the 20th century
Yu.M. TKHAGAZITOV……375

Askhat Bidzhiev: doctor, poet, educator
F.T. UZDENOVA……384

Computational linguistics

Theories of embodied cognition in the task of formal representation of semantics based on the multiagent neurocognitive architectures
D.G. MAKOEVA, K.F. KRAI, A.Z. ENES……391

Anniversaries

F.A. TEMBOTOVA……400

Publishing regulations for the authors ……401

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, Всероссийский научно-исследовательский институт риса, Краснодар, Россия

Дохолян Сергей Владимирович, доктор экономических наук, профессор, Институт социально-экономических исследований – филиал Дагестанского научного центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, 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 – филиал Института ядерных исследований, Нейтрино, Приэльбрусье, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

Ivanov Petr Matsovich, 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:

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

Responsible secretary:

Eneeva Liana Magometovna, 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:

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

Adukov Rukhman Khasainovich, 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

Altukhov Anatoly Ivanovich, 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

Amirkhanov Khizri Amirkhanovich, 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

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

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

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

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

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

Dzyuba Vladimir Alekseevich, Doctor of Biological Sciences, Professor, All-Russian Research Institute of Rice, Krasnodar, Russia

Dokholyan Sergey Vladimirovich, Doctor of Economics, Professor, Institute for Socio-Economic Research of Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

Zavalin Aleksey Anatolievich, 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

Zakshevsky Vasily Georgievich, 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

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

Kibirov Alikhan Yakovlevich, 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

Kleiner Georgy Borisovich, 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

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

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

Kuzminov Valery Vasilyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Baksan Neutrino Observatory – branch of Institute for Nuclear Research, Neutrino, Elbrus region, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Kusraev Anatoly Georgievich, 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

Mazloev Vitaly Zelimkhanovich, 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

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

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

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

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

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

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

Nechaev Vasily Ivanovich, 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

Popkov Yuri Solomonovich, 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

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

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

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

Savin Igor Yurievich, 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

Semin Alexander Nikolaevich, 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

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

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

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

Stempkovsky Alexander Leonidovich, 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

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

Tembotova Fatimat Aslanbievna, 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

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

Filyushin Mikhail Alexandrovich, Candidate of Biological Sciences, Federal Research Center «Fundamental Foundations of Biotechnology» of RAS, Moscow, Russia

Chochaev Alim Khuseyevich, Doctor of Economics, Professor, Federal State Unitary Enterprise «Agronauchservis», Moscow, Russia

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

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

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

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 504.7 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20
EDN: AWSYFQ

Система учета баланса CO_2 в цикле «почва – растение – атмосфера»*

Ю. К. Альтудов, З. И. Дударов, А. Х. Занилов

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

Аннотация. Оценка направленности трансформации углерода в биоцикле «почва – растение – атмосфера» по причине высокой динамичности процессов в агроэкосистеме представляет собой сложную методологическую задачу. По этой причине создание соответствующего инструментария отвечает целям управления процессами поглощения CO_2 компонентами агроэкосистем и создания соответствующих технологий для агроклиматических проектов. Рассмотренная в работе система на основе модельного эксперимента, длившегося более 20 суток, позволила рассчитать баланс CO_2-эквивалента, образовавшийся в смоделированной агроэкосистеме, с точностью более 95 %. Это позволяет использовать данную систему для определения уровня биологической активности почвы, степени автотрофности питания растений и определения объема CO_2, извлекаемого почвой и растениями из атмосферы.

Ключевые слова: парниковые газы, диоксид углерода, баланс CO_2, почва, растение, атмосфера

Поступила 17.11.2023, одобрена после рецензирования 21.11.2023, принята к публикации 01.12.2023

Для цитирования. Альтудов Ю. К., Дударов З. И., Занилов А. Х. Система учета баланса CO_2 в цикле «почва – растение – атмосфера» // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 13–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20

MSC: 92Cxx; 92C80 Original article

System for accounting for CO_2 balance in the “soil – plant – atmosphere” cycle*

Yu.K. Altudov, Z.I. Dudarov, A.Kh. Zanilov

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

Abstract. Assessment of the direction of carbon transformation in the “soil – plant – atmosphere” biocycle is a complex methodological task due to the high dynamics of processes in the agroecosystem. For this reason the creation of appropriate tools meets the goals of managing the processes of CO_2 absorption by components of agroecosystems and creation of appropriate technologies for agroclimatic projects. The system considered in the work, based on a model

© Альтудов Ю. К., Дударов З. И., Занилов А. Х., 2023

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, мнемокод 0669-2020-0008

* The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, mnemonic code 0669-2020-0008

experiment that lasted more than 20 days, made it possible to calculate the balance of CO_2 equivalent formed in the simulated agroecosystem with an accuracy of more than 95 %. This makes it possible to use this system to determine the level of biological activity of the soil, the degree of autotrophy of plant nutrition and determine the volume of CO_2 extracted by soil and plants from the atmosphere.

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, CO_2 balance, soil, plant, atmosphere

Submitted 17.11.2023, approved after reviewing 21.11.2023, accepted for publication 01.12.2023

For citation. Altudov Yu.K., Dudarov Z.I., Zanilov A.Kh. System for accounting for CO_2 balance in the "soil – plant – atmosphere" cycle. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 13–20. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20

Введение

В современных условиях усиления роли климатической повестки как фактора влияния на мировую экономику ключевое значение приобретают достоверные методы учета баланса парниковых газов, в частности диоксида углерода.

Углекислый газ, являясь эталонным и самым распространенным парниковым газом, избыточность в атмосфере которого сопряжена с риском глобального потепления, выступает в свою очередь и в качестве важнейшего элемента любой живой системы, включая микроорганизмы, растения и почву. Следовательно, цели и задачи декарбонизации различных отраслей экономики должны отвечать интересам поддержания оптимального режима трансформации CO_2 между компонентами локальных экосистем.

В настоящее время предложено множество способов утилизации CO_2, среди которых традиционно значительное внимание уделяется лесоклиматическим проектам. Важно обозначить парадоксальность ситуации с использованием лесов в борьбе с выбросами парниковых газов. В периоды интенсивных пожаров леса из стоков диоксида углерода превращаются в его источник.

Из технологических способов связывания углекислого газа рассматриваются системы сбора и абсорбции парниковых газов [1, 2], переработки CO_2 с подачей в зону кавитации воды [3], геологического захоронения [4].

Менее всего в России распространены практики утилизации в сельском хозяйстве. Тем не менее все чаще звучат предложения по вовлечению сельскохозяйственных угодий в климатические проекты. В частности, интенсивный сценарий реализации Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. предусматривает использование поглощающей способности почв в качестве поглотителей углекислого газа [http://government.ru/docs/43708/]. На конференции ООН по изменению климата (Глазго, 2021) была представлена Декларация о продуктах питания и климата, в которой также было предложено использовать сельскохозяйственные земли в качестве поглотителей CO_2.

Из всех обозначенных способов развитие технологий карбонового земледелия является наименее затратным с финансовой точки зрения вектором борьбы с выбросами парниковых газов. Потенциальная высокая эффективность обусловливается содержанием в 3-метровом слое почвы 1500 Гт органического углерода [5], из которых более 35 % утрачено с момента масштабной интенсификации сельскохозяйственного производства [6]. Но возвращаясь к значению углекислого газа в качестве незаменимого источника питания растений, следует учесть, что депонирование, то есть долгосрочное связывание углеро-

да, не отвечает целям повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Соответственно, возникает вопрос: каким образом, развивая технологии поглощения углерода почвами, достичь снижения концентрации CO_2 в атмосфере и при этом обеспечить оптимальное его содержание для процесса фотосинтеза? Ответ заключается в умелом управлении не только высшими растениями, но и деятельностью микроорганизмов [7]. Стимулируя закрепление накопленного CO_2 в растительных остатках и микроорганизмов в почве в агрономически пассивный период и создавая условия для его высвобождения по мере роста и развития растений, можно достичь круговорота CO_2, когда только выделившись из почвы, он перехватывается активно фотосинтезирующими частями растений. В таком случае углерод по большей части остается закрепленным, что существенно сокращает период его нахождения в атмосфере.

Для оценки эффективности разрабатываемых технологий и отдельных приемов секвестрации углерода в агроэкосистеме требуется качественная система наблюдения за направленностью процессов трансформации диоксида углерода между основными компонентами агроэкосистемы – почвой, растением и атмосферой.

С этой целью нами разработано устройство [8] для учета и моделирования круговорота углекислого газа в биоцикле «почва – растение – атмосфера». Общий вид системы представлен на рис. 1. Устройство герметически изолировано, за счет чего исключается влияние внешних факторов на изучаемые параметры при проведении эмпирических лабораторных исследований.

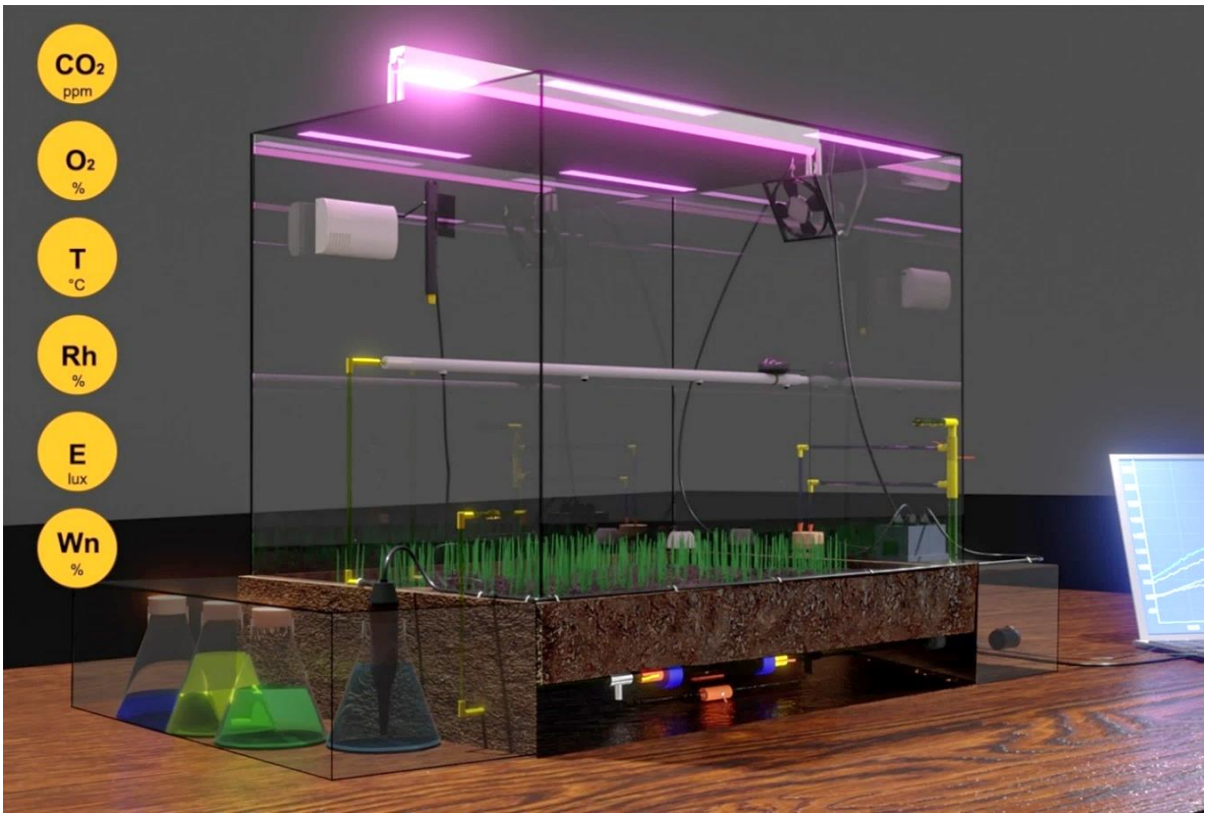


Рис. 1. *Общий вид системы учета баланса CO_2 в биоцикле «почва – растение – атмосфера»*

Fig. 1. *General view of the system for accounting for the CO_2 balance in the biocycle "soil – plant – atmosphere"*

Основные характеристики системы

Устройство путем контроля и регулирования основных абиотических параметров в закрытом биоцикле «почва – растение – атмосфера» позволяет учитывать направленность трансформационных процессов и моделировать круговорот диоксида углерода.

Система оснащена сенсорами, которые контролируют и регулируют общую концентрацию углекислого газа (CO_2), температуру (T) и влажность (Rh) воздуха внутри устройства, объемное содержание кислорода (O_2), объемную влажность почвы (Wn), освещенность системы для поддержания светового режима роста растений. На рисунке 2 и в таблице 1 представлены структурная схема устройства и технические характеристики используемых измерительных средств.

Таблица 1. Технические характеристики системы

Table 1. System specifications

Измеряемый параметр	Единица измерения	Диапазон измерений	Дополнительные параметры
Углекислый газ (CO_2)	ppm	400–5000	Погрешность определения ± 30 ppm + 3 % от измеряемой величины
Кислород (O_2)	%	0–30	Абсолютная погрешность измерения при температуре окружающей среды 20 °C составляет ± 0,4 %. USB/RS – 232 интерфейс для связи с ПК
Температура (T)	°C	от 0 до +50	Точность определения ± 0.5 °C
Влажность воздуха (Rh)	%	20–80	Погрешность измерения ± 5 %.
Освещенность (E)	Lux (Лк)	1–200000	Спектральный диапазон измерения 0,38 – 0,78 мкм Погрешность измерения не более 5 %. USB интерфейс для связи с ПК
Объемная влажность почвы (Wn)	%	0–100	Точность определения ± 1.5 %. USB интерфейс для связи с ПК

Контроль концентрации CO_2, влажности (Rh) и температуры (T) воздуха осуществляется через единый блок с соответствующими сенсорами, взаимодействующий по протоколу LoRaWAN с контроллером микроклимата, который подключен к интернету и облачному сервису. Параметры контролируются в режиме реального времени с возможностью получения уведомлений в случае отклонения от заданных опытных значений. В системе концентрация углекислого газа определяется по недисперсионной инфракрасной технологии (NDIR) с функцией Automatic Baseline Correction для автоматической калибровки без использования технических газов. С заранее заданной периодичностью через соответствующие контроллеры и блоки управления фиксируемые показатели передаются на узел сбора данных для хранения, обработки и визуализации (рис. 2). Вспомогательные сенсоры (O_2, Wn, E, T) используются для принятия решений с целью создания благоприятных условий для растений и моделирования циклов, близких к реальному.

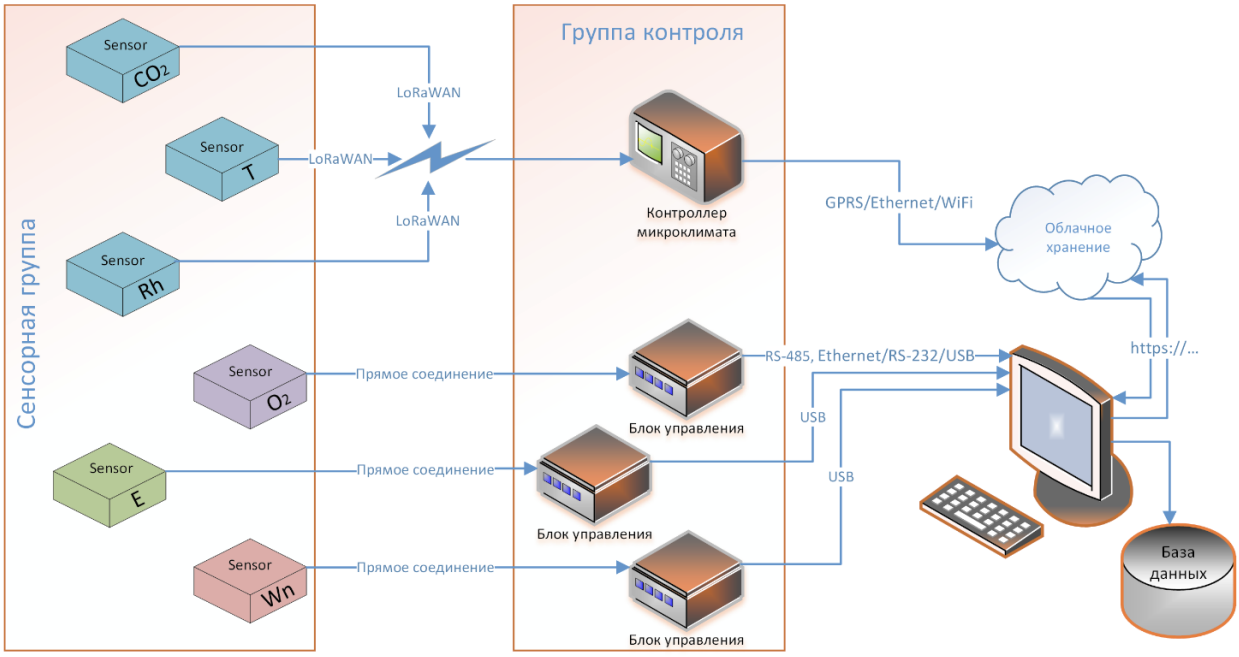


Рис. 2. *Структурная схема системы*

Fig. 2. *Block diagram of the system*

При имитации различных климатических условий внутри устройства может происходить рост концентрации CO_2 и влажности воздуха, превышающий критические значения для развития растений и регистрационные возможности сенсоров. Для этого в устройство адаптирована подсистема оптимизации, которая позволяет принудительно утилизировать, т.е. извлекать избыточную концентрацию углекислого газа и влаги, после чего запускается следующая итерация. Суммарная концентрация углекислого газа в системе за весь исследовательский цикл определяется путем сложения соответствующих каждой итерации значений CO_2, как показано на рис. 3.

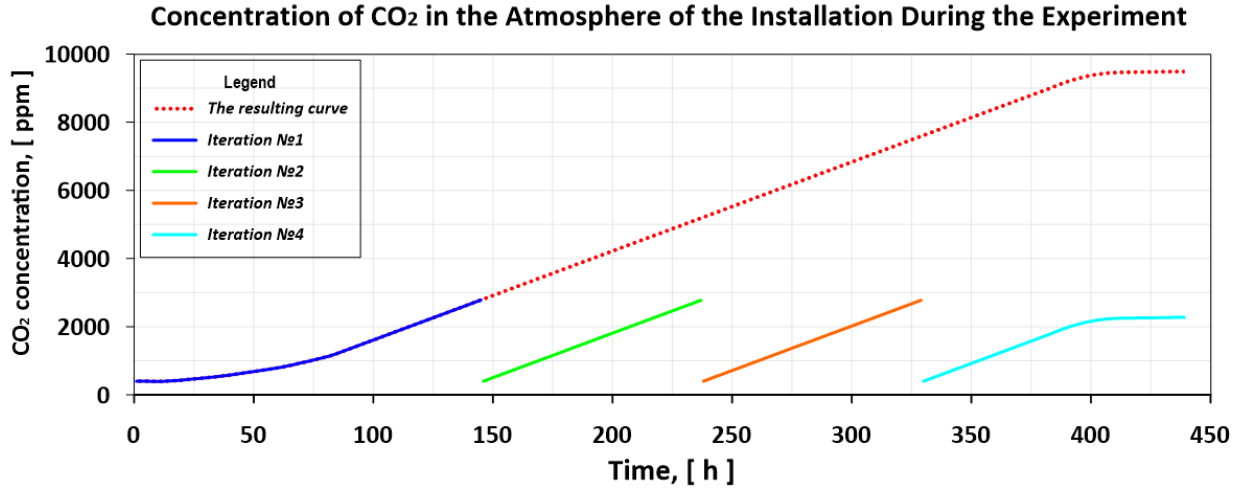


Рис. 3. *Определение суммарной концентрации диоксида углерода в атмосфере системы во время эксперимента*

Fig. 3. *Determination of the total concentration of carbon dioxide in the atmosphere of the system during the experiment*

Схема эксперимента и полученные результаты

В настоящей работе апробация устройства проводилась при выращивании ярового ячменя с использованием 800 грамм воздушно-сухой почвы, доведенной до влажности 60 % наименьшей влагоемкости, в которой до начала исследований содержание углерода определялось на элементарном анализаторе Multi-EA200CS. После высева семян лоток с почвой помещается в бокс и герметично закрывается. За счет почвенного дыхания, которое высвобождает углерод из почвы в виде CO_2, внутри бокса наблюдается увеличение его концентрации. Часть углекислого газа усваивается растениями из атмосферы устройства и преобразуется в органические соединения в процессе фотосинтеза. Общая концентрация CO_2 в устройстве зависит от активности почвенного дыхания, которое напрямую связано с микробиологической активностью почвы и с общим содержанием органического вещества в ней. Наблюдение проводится до тех пор, пока показатель CO_2 атмосферы в боксе не выйдет на плато, что соответствует максимальной концентрации и сохраняется без дальнейшего роста на протяжении 12 часов. Опытным путем установлено, что в зависимости от типа используемой почвы и растений данный эффект достигается через 18–21 день. Общий баланс (*Б*) углекислого газа в биоцикле «почва – растение – атмосфера» рассчитывается в абсолютных величинах по следующей формуле:

$$Б = (C_{почв.} + C_{семена}) - (C_{раст} + C_{атмосф}),$$

где $C_{почв.}$ – разница содержания углерода в почве до и после эксперимента; $C_{семена}$ – содержание углерода в семенах; $C_{раст}$ – содержание углерода в растениях (в сухой биомассе) и $C_{атмосф}$ – содержание CO_2-эквивалента в атмосфере устройства.

До начала эксперимента содержание элементарного углерода в органической форме в почве составляло 2 %, что соответствует 16 г почвенного углерода и эквивалентно 58,6 г CO_2. По завершении наблюдений в почве оставалось 1,88 %, равных 15,04 г углерода и соответствующих 55,04 г CO_2-эквивалента. Разница до и после эксперимента 0,12 % соответствовала 3,56 г CO_2-эквивалента. При массе 1000 семян ячменя, равной 39 г, и содержании в них углерода 40 % в почву поступило 2,85 г CO_2-эквивалента при посеве 50 семян. При этом была получена биомасса растений (корни и надземная часть) с содержанием углерода 76 %, что равно 1,9 г абсолютной сухой массы, равной 5,2 г CO_2-эквивалента. В результате сопоставления данных получено, что сумма разниц CO_2-эквивалента почвы (3,56 г) и семян (2,85 г), равная 6,41 г CO_2-эквивалента, сопоставима с суммой CO_2-эквивалента в растениях (5,2 г) и содержанием CO_2-эквивалента в атмосфере устройства (1,12 г), равной 6,32 г CO_2-эквивалента. Разница составила 0,09 г или 1,4 %, что можно рассматривать как статистическую погрешность. В ранее проведенных исследованиях, в зависимости от используемой почвы и растений, расхождения в балансе CO_2 варьировали в пределах 2–5,5 %.

Заключение

Устройство демонстрирует возможность проведения расчетов баланса CO_2 в системе «почва – растение – атмосфера» и может быть использовано для продолжительных наблюдений для широкого спектра сельскохозяйственных культур, в том числе для учета потенциальной и фактической углеродпоглотительной способности компонентов агроэкосистем. Также устройство дает возможность оценивать влияние различных средств, включая удобрения, пестициды и стимуляторы роста, используемых в сельском хозяйстве, на углеродсеквестрирующую способность растений и почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галассо Э. Д., Магнусон Дж. А.* Система и способ переработки парниковых газов. Патент РФ № 2640616, 10.01.2018.

2. *Хохлов А., Мельников Ю.* Угольная генерация: новые вызовы и возможности // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО: электронный журнал, 2019. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Coal_generation_2019.01.01_Rus.pdf.

3. *Архипов А. С.* Способ утилизации парникового газа. Патент РФ № 2774890, 24.06.2022.

4. *Переверзева С. А., Коносавский П. К., Тудвачев А. В. и др.* Захоронение промышленных выбросов углекислого газа в геологические структуры // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2014. Вып. 1(7). С. 5–21.

5. *Smith P.* Land use change and soil organic carbon dynamic // Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008. No. 81. Pp. 169–178. DOI: https://doi.org/10.1007/s10705-007-9138-y

6. *Dyson F. J.* Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? // Energy. 1977. Vol. 2. No. 3. Pp. 287–291. DOI: https://doi.org/10.1016/0360-5442(77)90033-0

7. *Abdullahi A.Ch., Siwar Ch., Shaharudin M.I., Anizan I.* Carbon Sequestration in Soil: The Opportunities and Challenges // InTech. 2018. P. 196. DOI: 10/5772/intechopen.79347

8. *Занилов А. Х., Дударов З. И., Адаев Н. Л. и др.* Устройство для учета CO_2 в системе почва-растение-атмосфера. Патент РФ 2804124, 26.09.2023.

REFERENSIS

1. Galasso E.D., Magnuson D.A. System and method of greenhouse gas processing. Patent of the Russian Federation RU 2640616. 2018 Jan 10. (In Russian)

2. Khokhlov A., Melnikov Yu. *Ugol'naya generaciya: novye vyzovy i vozmozhnosti. Centr energetiki Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO* [Internet]. 2019. Available from: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Coal_generation_2019.01.01_Rus.pdf. (In Russian)

3. Arkhipov A.S. Method for greenhouse gas utilization. Patent of the Russian Federation RU 2774890. 2022 Jun 24. (In Russian)

4. Pereverzeva S.A., Konosavsky P.K., Tudvachev A.V. et.al. Disposal of industrial carbon dioxide emissions into geological structures. *Bulletin of St. Petersburg University*. 2014. No. 1(7). Pp. 5–21. (In Russian)

5. Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamic. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2008. No. (81). Pp. 169–178. DOI: https://doi.org/10.1007/s10705-007-9138-y

6. Dyson F.J. Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? Energy. 1977. No. 2(3). Pp. 287–291. DOI: https://doi.org/10.1016/0360-5442(77)90033-0

7. Abdullahi A.C., Siwar C., Shaharudin M.I. et.al. Carbon Sequestration in Soils: The Opportunities and Challenges. InTech, 2018. P. 196. DOI: 10/5772/intechopen.79347

8. Zanilov A.Kh., Dudarov Z.I., Adaev N.L. et al. Device for accounting for CO2 in the soil-plant-atmosphere system. Patent of the Russian Federation RU 2804124. 2023 Sep 26. (In Russian)

Информация об авторах

Альтудов Юрий Камбулатович, д-р техн. наук, д-р экон. наук, профессор, и.о. ректора Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова;

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

ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2520-8267

Дударов Залим Исламович, инженер-исследователь Центра геофизики и чрезвычайных ситуаций, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова;

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

zalim-dudar@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5346-363X

Занилов Амиран Хабидович, канд. с/х наук, ст. науч. сотр. Центра декарбонизации АПК и региональной экономики, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова;

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

amiran78@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8635-6501

Information about the authors

Altudov Yuri Kambulatovich, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Economic Sciences, Professor, Acting Rector of Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2520-8267

Dudarov Zalim Islamovich, Research Engineer of the Center of Geophysics and Emergency Situations, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

zalim-dudar@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5346-363X

Zanilov Amiran Khabidovich, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher of the Center of Decarbonization of the Agro-Industrial Complex and Regional Economy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

amiran78@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8635-6501

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 004.5+004.021 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-21-32
EDN: CIGNEO

Подход к распределению работ в коллаборативной робототехнической системе с учетом модели рабочего пространства и динамического переназначения исполнителей*

Р. Р. Галин, С. Б. Галина, М. В. Мамченко

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук
117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65

Аннотация. В работе сформирован ряд предложений по совершенствованию разработанного алгоритма для распределения работ в коллаборативной робототехнической системе (КРТС) и назначения участников КРТС на выполнение операций технологического процесса. Реализован учет пространственной модели рабочего пространства (размещения рабочих мест), изменения объекта воздействия (изделия) и использования дополнительных ресурсов, случайного поведения и ошибок людей, накопления усталости и снижения эффективности их работы со временем, а также динамического переназначения участников КРТС на выполнение операции в случае внезапного выхода из строя кобота или потери трудоспособности человеком. Также предложен модифицированный алгоритм минимизации целевой функции (решения оптимизационной задачи) на этапе подбора состава и назначения исполнителей на выполнение операции, учитывающий значения эффективности доступных участников КРТС и минимизирующий их состав.

Ключевые слова: коллаборативная робототехническая система, человеко-машинное взаимодействие, распределение работ, операция, технологический процесс

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023, принята к публикации 04.12.2023

Для цитирования. Галин Р. Р., Галина С. Б., Мамченко М. В. Подход к распределению работ в коллаборативной робототехнической системе с учетом модели рабочего пространства и динамического переназначения исполнителей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 21–32. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-21-32

MSC: 93C85, 65K10 Original article

Approach to task allocation in a collaborative robotic system considering the working space model and dynamic reassignment of the performers*

R.R. Galin, S.B. Galina, M.V. Mamchenko

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street

© Галин Р. Р., Галина С. Б., Мамченко М. В., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00690, https://rscf.ru/project/23-29-00690/

* The reported study was funded by the Russian Science Foundation according to the research project No. 23-29-00690, https://rscf.ru/en/project/23-29-00690/

Abstract. The article gives a number of proposals on improving the developed algorithm for task allocation in collaborative robotic systems and assignment of participants to perform operations of technological process. The paper considers the spatial model of the working space (placement of workplaces), changes in the object of impact (product), the use of additional resources, random behavior and mistakes of people, fatigue accumulation and decrease in the efficiency of their work over time, as well as dynamic reassignment of the performers of CRS in case of sudden failure of cobots or inability to work – for the operators. The work also proposes a modified algorithm of minimization of the objective function (solution of the optimization problem) when selecting and assigning the performers for the operation, taking into account the efficiency of available participants of CRS, and minimizing their composition.

Keywords: collaborative robotic system, human-robot interaction, task allocation, operation, technological process

Submitted 27.11.2023, approved after reviewing 29.11.2023, accepted for publication 04.12.2023

For citation. Galin R.R., Galina S.B., Mamchenko M.V. Approach to task allocation in a collaborative robotic system considering the working space model and dynamic reassignment of the performers. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 21–32. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-21-32

Введение

Одним из основных направлений применения коллаборативных роботов (коботов) является промышленное производство. Внедрение коллаборативных робототехнических систем (КРТС) на производственных объектах позволяет повысить общий уровень безопасности промышленных процессов, роботизировать выполнение рутинных, физически тяжелых и опасных работ, а также сократить удельные затраты, связанные с производством единицы продукции. В свою очередь при решении задачи назначения исполнителей на работы (операции) сам технологический процесс удобно представлять одновременно как в виде графа, веса ребер которого соответствуют продолжительности операций, а вершины – моментам их начала, так и в виде временной последовательности, отражающей моменты начала и завершения выполнения операций [1–4].

В предыдущих работах авторским коллективом уже рассматривалась задача выбора и назначения участников КРТС на выполнение операций технологического процесса.

В частности, предложенные решения обеспечивают [5–7]:

– определение технологического процесса в виде ориентированного графа и временной последовательности из атомарных (неделимых) операций, их количества и продолжительности, максимального и минимального состава людей и коботов, требуемых для выполнения операций, а также стандартного времени выполнения – время выполнения операции минимальным составом людей и коботов с максимальной эффективностью;

– задание количества людей и коботов в КРТС, условных значений их эффективности выполнения для всех или отдельных операций, состояния их доступности;

– подбор исполнителей на выполнение конкретной операции, учитывая минимально и максимально возможный состав, эффективность и доступность незанятых людей и коботов, с целью минимизации времени выполнения отдельной операции и всего технологического процесса;

– перерасчет количества доступных участников КРТС и времени выполнения операции на каждой итерации применения предложенного алгоритма;

– учет невозможности назначения исполнителей операции в случае, когда количество свободных людей и/или коботов меньше минимально необходимого для назначения операции (в таком случае назначение исполнителей на эту операцию откладывается до наступления следующего события на временной последовательности и связанного с ним переопределения количества свободных людей и/или коботов).

Несмотря на это, текущая версия предложенного алгоритма не позволяет задавать пространственную модель рабочего пространства, в том числе количество рабочих мест, используемых для выполнения операций технологического процесса, изменение объекта воздействия (изделия) и использование дополнительных ресурсов (инструментов, оборудования и т.д.), случайного поведения (ошибок) людей, накопления усталости и снижения эффективности их работы со временем, а также динамически переназначать участников КРТС на выполнение операции/операций в случае непредвиденного сокращения состава исполнителей (условный выход из строя кобота или человека) и связанного с этим увеличения времени, необходимого для выполнения операции.

Кроме того, в текущей версии алгоритма при формировании субоптимального состава участников учитывается только состояние доступности людей и коботов и возможность назначения хотя бы минимального состава исполнителей для конкретной операции. При этом условные значения эффективности доступных участников КРТС и различия этих значений у свободных исполнителей при назначении на выполнение операции фактически не учитываются из-за постоянства и неизменности этих значений и типового задания одинаковых значений у людей и коботов.

Цель настоящей работы заключается в решении вышеуказанных проблем за счет совершенствования предложенного алгоритма и обеспечения возможности задавать и настраивать значения вышеуказанных параметров.

В главе 1 описаны предложенные решения по совершенствованию возможностей разработанного алгоритма. В главах 2 и 3 представлены результаты численного моделирования и анализ полученных результатов соответственно.

1. Совершенствование предложенного алгоритма

В настоящем разделе представлены теоретические положения для совершенствования предложенного алгоритма. Обозначения переменных (параметров), введенных в работах [5–7] и используемых далее в настоящей работе, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Принятые обозначения переменных [5–7]

Table 1. Variable designations adopted [5–7]

Обозначение переменной	Описание переменной
n	Количество людей в КРТС
m	Количество коботов в КРТС
$H = \{h_i\}_{i=1}^{n}$	Множество людей в КРТС
$B = \{b_j\}_{j=1}^{m}$	Множество коллаборативных роботов КРТС
$r_{h_i} \in (0..1]$	Показатель эффективности для i-го человека

$r_{b_j} \in (0..1]$	Показатель эффективности для *j*-го кобота
$n_{p_{\min}}$	Минимально необходимое количество людей для выполнения *p*-й операции
$n_{p_{\max}}$	Максимально возможное количество людей для выполнения *p*-й операции
$m_{p_{\min}}$	Минимально необходимое количество коботов для выполнения *p*-й операции
$m_{p_{\max}}$	Максимально возможное количество коботов для выполнения *p*-й операции
n_p	Количество людей, назначенных на выполнение *p*-й операции
m_p	Количество коботов, назначенных на выполнение *p*-й операции
$t_{op.st_p}$	Стандартное время выполнения *p*-й операции (время выполнения *p*-й операции минимальным составом людей и коботов с максимальной (единичной) эффективностью)
$n_{p_{av}}$	Количество людей, доступных к моменту начала *p*-й операции
$m_{p_{av}}$	Количество коботов, доступных к моменту начала *p*-й операции
$H^{n_{p_{av}}}$	Множество людей, доступных (не занятых выполнением какой-либо операции) в момент начала *p*-й операции
$B^{m_{p_{av}}}$	Множество коботов, доступных (не занятых выполнением какой-либо операции) в момент начала *p*-й операции
$t_{op.real_p}$	Реальное время выполнения *p*-й операции назначенным составом исполнителей n_p людей и m_p коботов

1.1. Учет пространственной модели рабочего пространства

Представим модель рабочего пространства в виде плоскости. Расположению рабочих мест и каждого человека в КРТС в любой момент будет соответствовать набор локальных координат двухмерного пространства (*x*, *y*), при этом полагается, что коботы смонтированы на рабочих местах и перемещаться не могут. Будем полагать, что если люди выполняют *p*-ю операцию, соответствующую рабочему месту с координатами (x_{WP_p}, y_{WP_p}), то местонахождение всех этих людей также будет описываться координатами (x_{WP_p}, y_{WP_p}).

Тогда при подборе состава исполнителей на выполнение операции требуется учитывать время, требуемое для перемещения к рабочему месту, соответствующему данной операции, всех назначаемых на нее людей. Приняв скорость перемещения всех людей одинаковой и равной некоторой константе V_{mov}, представим алгоритм вычисления времени перемещения всех людей, назначенных на выполнение *p*-й операции (блок-схема представлена на рис. 1).

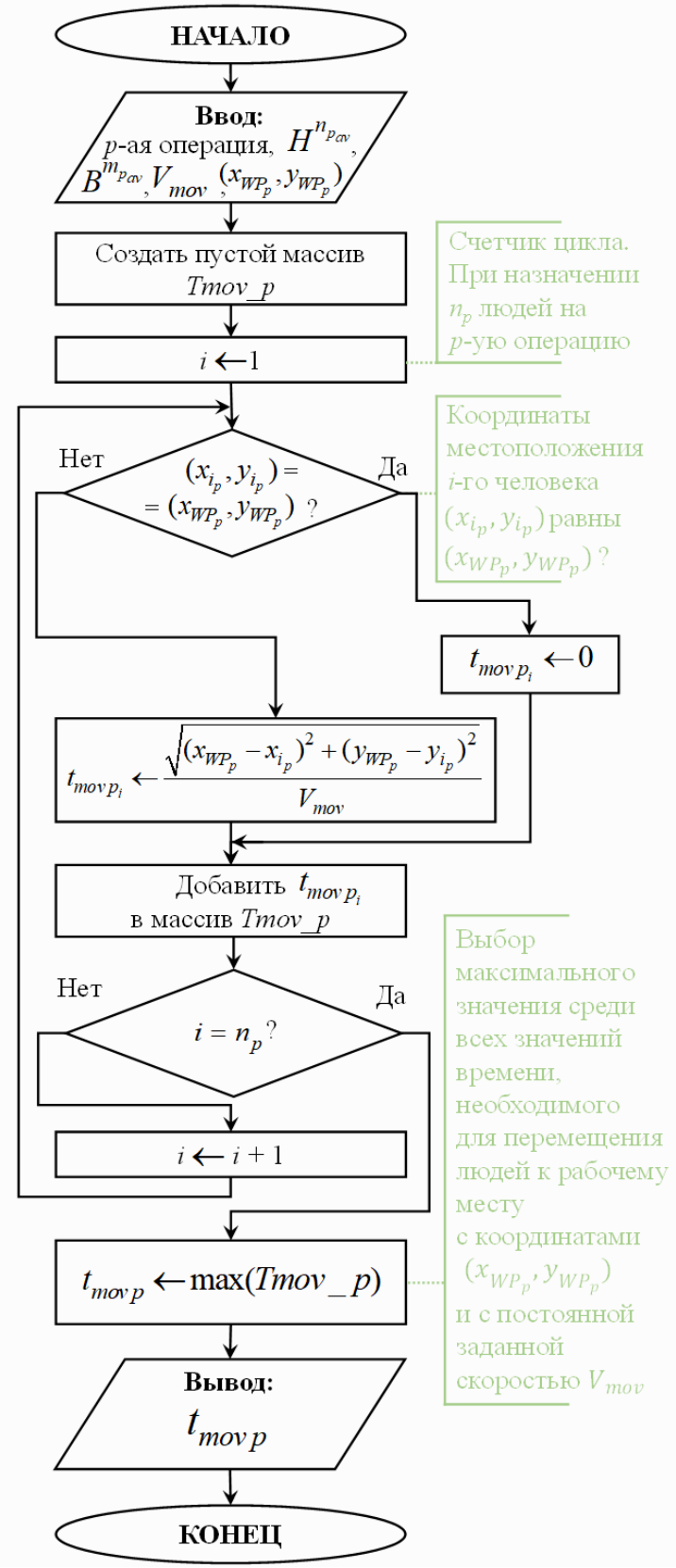


Рис. 1. *Алгоритм вычисления времени перемещения людей, назначенных на выполнение p-й операции*

Fig. 1. *Algorithm for calculating the movement time of people assigned to perform the p-th operation*

Таким образом, к времени выполнения операции при нахождении времени $t_{op.real_p}$ требуется добавлять вычисленное по алгоритму 1 значение $t_{mov\,p}$.

1.2. Учет изменения объекта воздействия и использования дополнительных ресурсов

Для учета изменения объекта воздействия и использования дополнительных ресурсов возможно введение дополнительной временной константы t_{prep}, связанной с подготовкой человеком и/или коботом инструментов и материалов для выполнения операции, их выбором и занятием требуемого положения для начала выполнения операции. Кроме того, возможно подобрать для каждой операции временные показатели, характеризующие естественные задержки при выполнении операции, связанные с поворотом/вращением/изменением положения изделия (объекта воздействия) $t_{p_{proc}}$.

1.3. Учет случайного поведения (ошибок) людей и накопления усталости

Очевидно, что эффективность работы людей падает при увеличении времени их непрерывной работы. Такое падение эффективности может выражаться в увеличении продолжительности выполнения отдельных операций, совершении ошибок при выполнении работ или даже во временной потере трудоспособности на определенный период [8–10].

Для учета случайного поведения (ошибок) людей и накопления усталости введем возможность задания падения эффективности людей во времени. Для этого в алгоритме реализована возможность задания изменения эффективности людей и ее зависимости от времени непрерывной работы в виде непрерывной функции или отдельных дискретных значений. При задании эффективности в виде отдельных дискретных значений во времени реализована возможность нахождения промежуточных значений эффективности путем построения аппроксимирующей функции первого порядка, использующей в качестве выходных данных две ближайшие известные пары значений «эффективность – время».

Таким образом, в момент назначения людей на выполнение *i*-й операции будет вычисляться значение эффективности каждого человека, соответствующее значению функции эффективности в момент, соответствующий общему времени, прошедшему с начала выполнения операций технологического процесса.

Пример задания зависимостей изменения эффективности людей во времени в виде линейной функции и дискретных значений «эффективность – время» представлен на рисунках 2 и 3 соответственно.

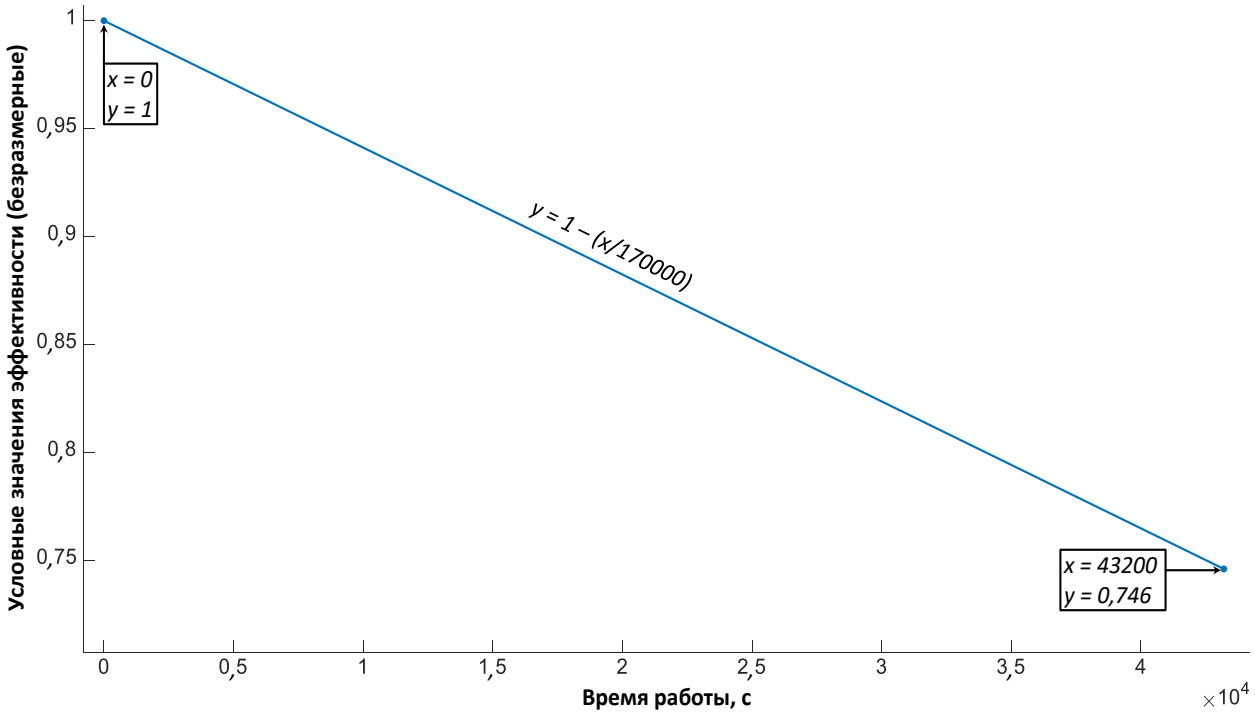


Рис. 2. *Пример задания зависимостей изменения эффективности людей во времени в виде линейной функции*

Fig. 2. *Example of specifying dependencies of changes in people's efficiency over time in the form of a linear function*

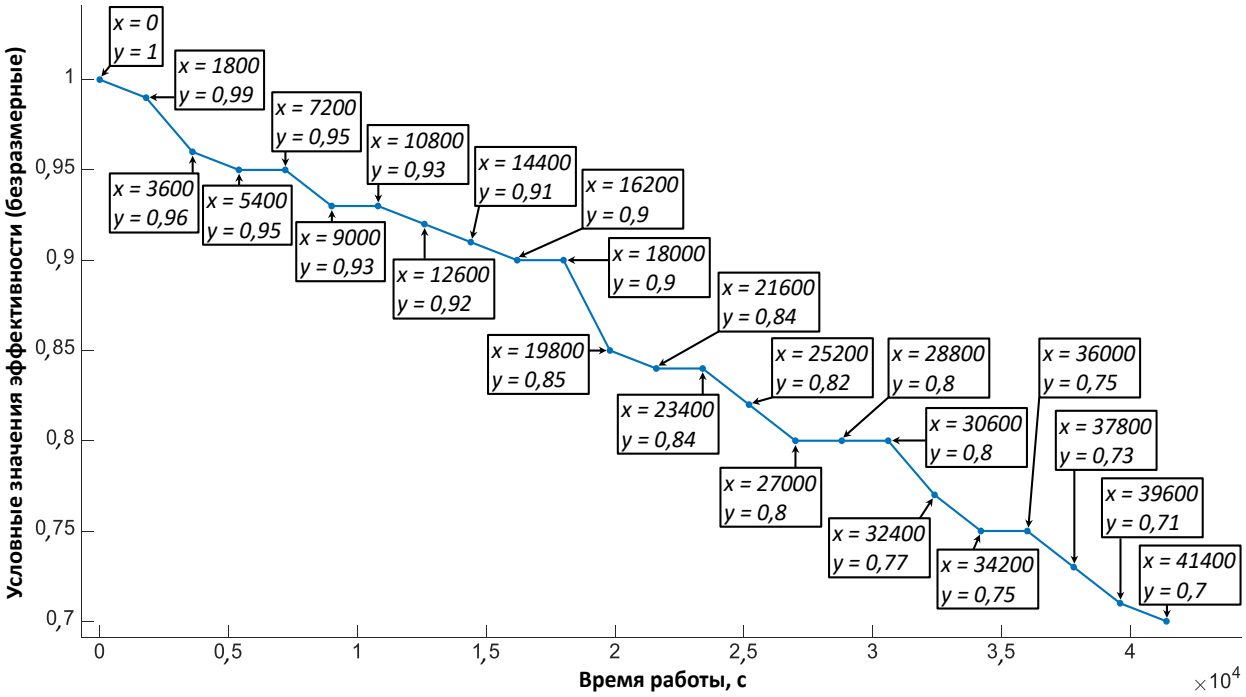


Рис. 3. *Пример задания зависимостей изменения эффективности людей во времени в виде дискретных значений «эффективность – время»*

Fig. 3. *An example of specifying dependencies of changes in people's efficiency over time in the form of discrete "efficiency – time" values*

1.4. Динамическое переназначение исполнителей

Для реализации данной возможности в алгоритме реализовано виртуальное прерывание выполнения операции в момент, соответствующий выходу из строя кобота (коботов) и/или потере работоспособности человека (людей). После прерывания операции вышеуказанным людям и коботам присваивается значение недоступности (свойству «выполняемая операция» присваивается значение «–1»). Затем осуществляется переназначение исполнителей на выполнение операции взамен вышедших из строя в соответствии с алгоритмом, представленным в [5–7], при этом если назначение невозможно, а текущее количество людей и/или коботов меньше минимально допустимого для данной операции, ее выполнение приостанавливается до наступления ближайшего события временной последовательности, когда произойдет изменение состава доступных (незанятых) людей и/или коботов.

1.5. Учет эффективности доступных участников КРТС при назначении на выполнение операции

Ранее при назначении исполнителей на *p*-ю операцию проверялась доступность хотя бы минимального количества людей и коботов. Итоговое (реальное) время выполнения операции назначенным составом определялось уже после назначения исполнителей по формуле

$$t_{op.real_p} = \frac{t_{op.st_p} \times (m_{p_{\min}} + n_{p_{\min}})}{\sum_{k=1}^{n_p} r_{h_k} + \sum_{s=1}^{m_p} r_{b_s}}. \quad (1)$$

В новой версии алгоритма реализован другой принцип. При подборе исполнителей на выполнение *p*-й операции решается задача многокритериальной оптимизации (минимизации целевой функции). В качестве целевой функции используется расчетное время выполнения операции, функция может быть как в виде (1), так и в следующем виде:

$$func = \frac{t_{op.st_p} \times (m_{p_{\min}} + n_{p_{\min}})}{\sum_{k=1}^{n_p} r_{h_k} + \sum_{s=1}^{m_p} r_{b_s}} + n_p + m_p, \quad (2)$$

где требуются целочисленные значения n_p и m_p при наличии следующих ограничений:

$$\begin{cases} n_p \le n_{p_{av}} \\ n_p \ge n_{p_{\min}} \\ n_p \le n_{p_{\max}} \\ m_p \le m_{p_{av}} \\ m_p \ge m_{p_{\min}} \\ m_p \le m_{p_{\max}} \\ t_{op.real_p} \ge 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Кроме того, возможно введение дополнительного ограничения на время реального выполнения операции, не превышающего стандартное время выполнения минимальным составом исполнителей с максимальной (единичной эффективностью):

$$t_{op.real_p} \le t_{op.st_p}. \quad (4)$$

2. Результаты моделирования

Численный эксперимент проводился в среде MATLAB R2023a. Минимизация целевой функции осуществлялась с помощью генетического алгоритма. Исходные данные и результаты численного моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные и результаты численного моделирования

Table 2. Input data and results of numerical modeling

Параметр (переменная)	Значения			
	Целевая функция (1), ограничения (3)	Целевая функция (1), ограничения (3) и (4)	Целевая функция (2), ограничения (3)	Целевая функция (2), ограничения (3) и (4)
$n_{p_{av}} = 10,\ m_{p_{av}} = 10,\ n_{p_{\min}} = 1,\ n_{p_{\max}} = 10,\ m_{p_{\min}} = 1,\ m_{p_{\max}} = 10,\ t_{op.st_p} = 14$ (с)				
$t_{op.real_p}$, с	1,1764	1,1764	4,1857	4,1857
n_p, ед.	10	10	5	5
m_p, ед.	10	10	1	1
$n_{p_{av}} = 5,\ m_{p_{av}} = 5,\ n_{p_{\min}} = 1,\ n_{p_{\max}} = 10,\ m_{p_{\min}} = 1,\ m_{p_{\max}} = 10,\ t_{op.st_p} = 14$ (с)				
$t_{op.real_p}$, с	2,6194	2,6194	4,1857	4,1857
n_p, ед.	5	5	5	5
m_p, ед.	5	5	1	1

3. Анализ полученных результатов

При использовании целевой функции (1) в результате решения задачи количество назначаемых людей и коботов равно количеству доступных для назначения, т.е. алгоритм не минимизирует само количество назначаемых исполнителей, хотя и учитывает их эффективность.

Напротив, использование целевой функции (2) в алгоритме ставит ограничение, заключающееся в максимальной минимизации состава исполнителей.

Наличие или отсутствие дополнительного ограничения (4) для обоих вариантов целевой функции не повиляло ни на реальное время выполнения операции, ни на состав назначаемых исполнителей.

Следует отметить, что существенное снижение времени выполнения операции (с 14 до 1,1764, 2,6194 и 4,1857 секунд соответственно) не может свидетельствовать о кратной эффективности применения предложенного алгоритма по сравнению с существующими аналогами (например, [2, 3, 11–18]) и обусловлено значениями исходных данных, а также допущением о наличии безразмерной априорной величины эффективности (от нуля до единицы) для каждого участника КРТС.

Заключение

В работе сформирован ряд предложений по совершенствованию разработанного алгоритма для распределения работ в коллаборативной робототехнической системе и назначения участников КРТС на выполнение операций технологического процесса. Реализован учет пространственной модели рабочего пространства (размещения рабочих мест), изменения объекта воздействия (изделия) и использования дополнительных ресурсов, случайного поведения и ошибок людей, накопления усталости и снижения эффективности их работы со временем, а также динамического переназначения участников КРТС на выполнение операции в случае внезапного выхода из строя кобота или потери трудоспособности человеком. Также предложен модифицированный алгоритм минимизации целевой функции (решения оптимизационной задачи) на этапе подбора состава и назначения исполнителей на выполнение операции, учитывающий значения эффективности доступных участников КРТС и минимизирующий их состав.

В целом отличительной особенностью предложенного алгоритма является переход от минимизации времени выполнения технологического процесса к минимизации времени выполнения каждой операции в его составе.

Представленные в работе результаты показаны для пункта 1.5. В дальнейшем планируются проведение численного моделирования и апробация для других предложенных решений, а также их интеграция в алгоритм.

REFERENCES

1. Chatzisavvas A., Chatzitoulousis P., Ziouzios D., Dasygenis M. A routing and task-allocation algorithm for robotic groups in warehouse environments. *Information*. 2022. Vol. 13. No. 6. Pp. 1–14. DOI: 10.3390/info13060288

2. *Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Павлов А. С., Гурчинский М. М.* Метод распределения и планирования выполнения задач агентами роевых робототехнических систем в условиях недетерминированной среды // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. 3(59). С. 25–43. DOI: 10.54398/20741707_2022_3_25

Petrenko V.I., Tebueva F.B., Pavlov A.S., Gurchinskiy M.M. Method of tasks distribution and planning for agents of swarm robotic systems in non-deterministic environment. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: management and high technology]. 2022. Vol. 3(59). Pp. 25–43. (In Russian)

3. Faccio M., Granata I., Minto R. Task allocation model for human-robot collaboration with variable cobot speed. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Pp. 1–14. DOI: 10.1007/s10845-023-02073-9

4. Aziz H., Pal A., Pourmiri A., Ramezani F., Sims B. Task Allocation Using a Team of Robots. *Current Robotics Reports*. 2022. 3. Pp. 227–238. DOI: 10.1007/s43154-022-00087-4

5. *Галина С. Б., Мамченко М. В., Галин Р. Р.* Результаты исследования распределения работ в коллаборативной робототехнической системе с минимизацией их времени выполнения // Труды 8-й международной научно-практической конференции «Научно-инновационные исследования и разработки». Саратов: Цифровая наука, 2022. С. 20–29.

Galina S.B., Mamchenko M.V., Galin R.R. Results of the research on the allocation of tasks in a collaborative robotic system with minimization of their execution time. *Trudy VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Nauchno-innovacionnye issledovaniya i razrabotki"*. Saratov: Cifrovaya nauka, 2022. Pp. 20–29. (In Russian)

6. Galin R., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System. Frontiers in Robotics and Electromechanics. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. 329. Pp. 433–447. DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8_28

7. Galin R.R., Galina S.B. Approach to Efficient Task Allocation in a Collaborative Robotic System Using Modified Cost Functions. *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) / South Ural IEEE Chapter*. Sochi, 2023. Pp. 568–573. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110787

8. Yaacoub A., Thomas V., Colas F., Maurice P. A Probabilistic Model for Cobot Decision Making to Mitigate Human Fatigue in Repetitive Co-Manipulation Tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023. 8. 11. Pp. 7352–7359. DOI: 10.1109/LRA.2023.3315583

9. Buerkle A., Al-Yacoub A., Eaton W., et al. An Incremental Learning Approach to Detect Muscular Fatigue in Human–Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2023. 53. 3. Pp. 520–528. DOI: 10.1109/THMS.2023.3259139

10. Gervasi R., Capponi M., Mastrogiacomo L., Franceschini F. Analyzing psychophysical state and cognitive performance in human-robot collaboration for repetitive assembly processes. *Production Engineering*. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1007/s11740-023-01230-6

11. Lippi M., Marino A. A mixed-integer linear programming formulation for human multi-robot task allocation. *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN)* / IEEE. Vancouver, 2021. Pp. 1017–1023. DOI: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515362

12. Mina T., Kannan S.S., Jo W., Min B.-C. Adaptive workload allocation for multi-human multi-robot teams for independent and homogeneous tasks. *IEEE Access*. 2020. 8. Pp. 152697–152712. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017659

13. Fusaro F., Lamon E., Momi E.D., Ajoudani A. An integrated dynamic method for allocating roles and planning tasks for mixed human-robot teams. *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN) /* IEEE. Vancouver, 2021. Pp. 534–539. DOI: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515500

14. Lee M.-L., Behdad S., Liang X., Zheng M. Task allocation and planning for product disassembly with human–robot collaboration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. 76(2). 102306. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102306

15. Noormohammadi-Asl A., Ayub A., Smith S.L., Dautenhahn K. Task Selection and Planning in Human-Robot Collaborative Processes: To be a Leader or a Follower? *2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) /* IEEE. Napoli, 2022. Pp. 1244–1251. DOI: 10.1109/RO-MAN53752.2022.9900770

16. Jung Y., Kim H., Suh K.D., Park J.M. Human-Centered Dynamic Service Scheduling Approach in Multi-Agent Environments. *Applied Sciences.* 2022. 12(21). 10850. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/app122110850

17. Zhang F., Zhang Y., Xu S. Collaboration effectiveness-based complex operations allocation strategy towards to human–robot interaction. *Autonomous Intelligent Systems*. 2022. 2:20. 1. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/s43684-022-00039-x

18. Rahman S.M.M., Wang Y. Mutual trust-based subtask allocation for human–robot collaboration in flexible lightweight assembly in manufacturing. *Mechatronics*. 2018. No. 54. Pp. 94–109. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.07.007

Информация об авторах

Галин Ринат Романович, канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;

grr@ipu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6429-7868

Галина Сания Болаткызы, мл. науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук;

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65;

ksb@ipu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5242-0996

Мамченко Марк Владиславович, науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук;

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65;

markmamcha@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6366-9786

Information about the authors

Galin Rinat Romanovich, Candidate of Technical Sciences, Researcher of Laboratory 80 "Cyber-Physical Systems", V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences;

117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street;

grr@ipu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6429-7868

Galina Saniya Bolatkyzy, Junior Researcher of Laboratory 80 "Cyber-Physical Systems", V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences;

117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street;

ksb@ipu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5242-0996

Mamchenko Mark Vladislavovich, Researcher of Laboratory 80 "Cyber-Physical Systems", V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences;

117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street;

markmamcha@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6366-9786

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 004.89; 004.94; 007.5 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-33-46
EDN: CKUFYO

Разработка экспериментальной лабораторной системы для исследования процессов автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением мягких полимерных мехатронных конструкций

А. У. Заммоев, Р. Н. Абуталипов

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

Аннотация. Разработка теоретических основ проектирования и прототипирования бионаноробототехнических систем и конструкций в киберфизических системах и средах требует решения актуальных проблем создания полноценных систем автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением (САППИУ). В статье представлены результаты разработки экспериментальной лабораторной САППИУ для создания мягких полимерных мехатронных конструкций, позволяющей проводить исследования процессов САППИУ и разрабатывать специализированный исследовательско-производственный комплекс для синтеза прикладных устройств и систем мягкой робототехники и биоробототехники. Полученные на практике технические и экспериментальные данные применяются при анализе процессов САППИУ и поиске возможностей развития теоретической базы САППИУ, применимой для разработки киберфизических систем и сред для создания прикладных устройств и систем бионаноробототехники.

Ключевые слова: мягкая робототехника, мягкая полимерная мехатронная конструкция, биоробототехника, бионаноробототехника, автоматическое проектирование, интеллектуальное управление, киберфизические системы и среды, виртуальное прототипирование, физическое прототипирование

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023, принята к публикации 04.12.2023

Для цитирования. Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н. Разработка экспериментальной лабораторной системы для исследования процессов автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением мягких полимерных мехатронных конструкций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 33–46. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-33-46

MSC: 68W50; 93B51 Original article

Design of an experimental laboratory system to examine the processes of automatic design and prototyping of soft polymer mechatronic constructions with intelligent control

A.U. Zammoev, R.N. Abutalipov

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 development of theoretical foundations for the design and prototyping of bionanorobotic devices and systems in cyber-physical systems and environments requires solving current problems of

© Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н., 2023

creating full-fledged systems for automatic design and prototyping with intelligent control (SADPIC). The article presents the results of the development of an experimental laboratory SADPIC for the creation of soft polymer mechatronic constructions, which makes it possible to conduct research on SADPIC processes and develop a specialized research and production complex for the synthesis of applied devices and systems of soft robotics and biorobotics. The technical and experimental data obtained in practice are used in the analysis processes of SADPIC and the search for opportunities for developing the theoretical basis of SADPIC, applicable for the development of cyber-physical systems and environments for the creation of applied bionanorobotic devices and systems.

Keywords: soft robotics, soft polymer mechatronic construction, biorobotics, bionanorobotics, automated design, intelligent control, cyber-physical systems and environments, virtual prototyping, physical prototyping

Submitted 27.11.2023, approved after reviewing 29.11.2023, accepted for publication 04.12.2023

For citation. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Design of an experimental laboratory system to examine the processes of automatic design and prototyping of soft polymer mechatronic constructions with intelligent control. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 33–46. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-33-46

Введение

Поиск методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции – одна из актуальных проблем бионаноробототехники (БНРТ) [1]. В процессе разработки биоинтегрированных технологий мягкой робототехники рассматривается возможность создания системы автоматического проектирования и прототипирования мягких полимерных мехатронных конструкций, которая в перспективе может быть применимой в БНРТ [2].

В связи с недостаточностью знаний о структуре и способах организации систем автоматического проектирования и прототипирования с интеллектуальным управлением (САППИУ) конструкций устройств и систем БНРТ на текущем этапе актуальность приобрел прикладной вектор исследований, основанный на применении методов и приемов материального воплощения симуляций – ***sim-to-real*** (**s2r**) [3], методов эволюционного моделирования в киберфизических системах и средах [4], принципов и методов управления и принятия решений в процессе работы конвейерной схемы материального воплощения симуляции [2]. Развитие данного прикладного вектора исследований необходимо для эффективного решения задач создания специализированного ***исследовательско-производственного комплекса*** (ИПК) БНРТ, интегрированного с реальной бионаносредой для осуществления познавательно-целевого моделирования, проектирования и прототипирования конструкций устройств и систем БНРТ.

Перечисленные методы и подходы в зарубежной практике уже успешно применяются для моделирования, проектирования и прототипирования мягких роботизированных систем и биоинженерных конструкций [5–8], что требует их практического освоения и использования в научных исследованиях и разработках, в т.ч. с применением аддитивных технологий 3D/4D печати синтетическими полимерными материалами (эластомеров, гелей и т.д.) и биоинженерных материалов [6], позволяющих создавать полностью 3D-биопечатные молекулярные биомашины с внешним управлением – **биоботов** [7] и синтетических вычислительно разрабатываемых организмов [8].

Методы s2r по своей идее сходны с развиваемым нами подходом к организации процессов создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса, которые предполагается выполнять по конвейерной схеме, реализующей специальный производственный унифицированный технологический цикл (СПУТЦ) [2] для решения задачи виртуального прототипирования и материализации прототипов.

Нами предполагается, что при помощи специфической для БНРТ интеллектуальной информационно-управляющей системы – когнитивной информационно-коммуникационной системы (КИКС) БНРТ возможно организовать процессы проектирования и исследования свойств различных классов объектов в средах физической материализации, в т.ч. с учетом масштабных факторов. В работах [1, 9–14] дана оценка возможности реализации виртуального прототипирования синтетических бионаноустройств и бионаносистем как процесса эволюционной оптимизации принципиальных и технологических схем для заданных условий проектирования с использованием структурированных знаний о свойствах бионаноструктур.

В соответствии с текущим пониманием методологии проектирования и виртуального прототипирования бионаноустройств и систем БНРТ с использованием интеллектуальных информационно-управляющих систем цель нового для нас прикладного этапа исследований – ***разработка технологической базы автоматического проектирования и прототипирования мягкой робототехники***, которая, помимо открытия возможностей решения одной из актуальных проблем БНРТ по поиску методов и техники реализации конвейера материального воплощения симуляции для перехода от моделирования к прототипированию объектов БНРТ, открывает перспективу для решения широкого круга прикладных задач мягкой робототехники и биоробототехники.

Воксельное представление проектов инженерных конструкций мягкой робототехники и их виртуальное прототипирование эволюционными методами может быть использовано в качестве простой экспериментальной модели реализации конвейерной схемы технологического цикла создания автоматически проектируемых объектов.

Указанные проекты конструкций для класса мягкой робототехники мы называем ***мягкими полимерными мехатронными конструкциями*** (МПМК) [2, 15, 16]. Они состоят преимущественно из мягких полимерных материалов в композиции со встраиваемыми элементами микромеханики и микроэлектроники (такими как сенсоры, актюаторы, контроллеры и преобразователи), а также гибкими накопителями энергии и средствами коммуникаций электрических сигналов, механических усилий, движения и давления воздуха или жидкости и т.п., и проектируются для решения прикладных задач мягкой робототехники как самостоятельные устройства, так и как входящие в состав робототехнических систем более высокого уровня, в т.ч. реализуемых в комплексе с механическими системами роботов с жесткими звеньями или конструкций гибридных роботов со звеньями различной жесткости (от мягких до жестких).

Исследование процессов САППИУ, использующей методы s2r и эволюционного моделирования в рамках предложенной в работе [16] рабочей гипотезы предполагает создание экспериментальной модельной САППИУ путем разработки технологии виртуального и физического прототипирования МПМК и рассмотрение на данном примере процессов проектирования архитектуры и создания прототипа исследовательско-производственного комплекса (ИПК) МПМК.

Ниже представлены результаты разработки основных компонентов лабораторной системы для проведения вычислительных и физических экспериментальных исследований и пробных запусков процессов САППИУ для создания МПМК относительно простой и известной тестовой задачи – проектирование конструкций самоходного движителя по горизонтальной ровной поверхности в поле гравитации, максимально удаляющихся от точки старта, и, соответственно, результаты создания таких МПМК можно сравнить с результатами других исследователей.

Основная часть

Разработка экспериментальной лабораторной системы как основы для создания ИПК МПМК велась с использованием принципов системного подхода исходя из ранее предложенной схемы организации процессов создания объектов БНРТ в эволюционном развитии технологического базиса [1], на основе которой строится и отрабатывается методика автоматического проектирования и прототипирования МПМК с интеллектуальным управлением.

Разработка архитектуры ИПК МПМК

Основные приоритеты, задающие принципы и уровень технических решений, при разработке архитектуры ИПК МПМК:

- соответствие системным принципам и подходам, заложенным в концепте КИКС БНРТ;
- масштабируемость как в пространстве, так и во времени (цикличность эволюций);
- разделение и распределение функций за счет унификации потоков информационных, материальных и энергетических ресурсов, централизации и распараллеливания процессов, стандартизации интерфейсов;
- сочетание минимума оригинальных единиц с доступными типовыми единицами, позволяющими сократить сроки и снизить стоимость разработки и реализации;
- простота и доступность реализации технических решений оригинальных единиц.

В первом приближении ИПК МПМК должен состоять из необходимых технических средств и систем (в т.ч. аппаратной части и коммуникаций КИКС) и обладать достаточными для выполнения технологических циклов материальными ресурсами (исходное сырье и технологические материалы). В ИПК МПМК используются программное обеспечение и информационные ресурсы, интерфейсы с интеллектуальными агентами, в т.ч. и с лицами, принимающими решения (ЛПР), к которым относятся: исследователь, конструктор, экспертное сообщество, интеллектуальные агенты систем искусственного интеллекта.

КИКС, описанный для БНРТ и применимый для МПМК в ИПК, устраивает технологические, информационные и когнитивные процессы, связанные с взаимодействием технических средств в рабочем пространстве с объектами физической среды, т.е. организует и управляет функционированием подсистем киберфизической технической системы.

ИПК МПМК, начиная со стартовой конфигурации, должен решать следующие основные задачи [17]:

- исследование свойств и форм поведения простых МПМК;
- накопление знаний о свойствах и формах поведения простых МПМК;
- поиск методов создания конструкций с заданными функциональными свойствами, создающих необходимые для целей решения прикладных задач структуры и поведение;
- организация производства МПМК;
- отбор прототипов МПМК для включения в технологическую базу (базу знаний) для использования при создании объектов более высокого технологического уровня;
- осуществление контроля и управления процессами в едином информационном пространстве CALS-системы.

Выполнение непрерывной информационной поддержки процессов жизненного цикла разработки прикладных технологий и продуктов МПМК в ИПК является обязательным требованием для обеспечения сбора, накопления, анализа и систематизации технических и экспериментальных данных [16, 18] и предполагается осуществлять с помощью интегрированной с КИКС специализированной для данной прикладной области CALS-подсистемы, реализуемой с использованием современных информационных технологий, в т.ч. в области искусственного интеллекта и обработки больших данных.

Проведенный анализ условий функционирования ИПК МПМК с учетом ранее выполненной начальной детализации техпроцессов прототипирования МПМК [2, 15, 17] установил, что в ИПК МПМК целесообразно организовать цикл автоматического (эволюционного) проектирования и прототипирования объектов МПМК с учетом следующих особенностей:

- на начальном этапе физическое прототипирование выполняется по жесткому технологическому регламенту, предполагающему выполнение минимального количества ручных операций, а в дальнейшем процесс физического прототипирования может являться частью процесса автоматического проектирования, предполагая поиск эффективной последовательности и параметров технологических процессов реализации изделий МПМК;

- стремление построить техпроцесс для выполнения единым комплексным автоматическим устройством – фабрикатором;

- виртуальное прототипирование выполняется специализированной ИИУС – прототипом КИКС, предложенной для БНРТ, развернутой на базе вычислительно-коммуникационного комплекса оборудования, строящегося с использованием реальных и виртуальных (hyper-V) ЭВМ и сетевого оборудования, интегрированного со всеми объектами ИПК МПМК;

- среда развертывания и испытания прототипов интегрируется в ИИУС посредством датчиков (видеопоток, датчики потребления энергии, состояния актуаторов) и исполнительных устройств (приводы актуаторов) испытательного полигона;

- подготовка (маркировка) и монтаж/демонтаж прототипов на испытательный полигон осуществляется пока вручную, а в перспективе с использованием автоматических средств идентификации образцов.

На нижнем уровне КИКС интеграция с датчиками и исполнительными устройствами может быть осуществлена посредством встраиваемых вычислительно-коммуникационных средств (микроконтроллеров и микросистем на кристалле, интегрированных с коммуникационными устройствами), позволяющими осуществлять сбор и предварительную обработку сенсорной информации с датчиков, контроль и управление исполнительными устройствами – актуаторами, а также видеосъемку процессов.

При разработке программного обеспечения и информационных ресурсов ИПК необходимо учитывать требования организации эффективного интерфейса с интеллектуальными агентами, в т.ч. систем искусственного интеллекта и экспертных систем поддержки принятия решений.

Таким образом, проведенные декомпозиция и анализ выполняемых процессов схемы организации процессов автоматического проектирования и прототипирования МПМК с интеллектуальным управлением позволили в первом приближении построить представленную на рис. 1 схему архитектуры ИПК МПМК, который должен включать:

- вычислительно-коммуникационный комплекс, который предназначен для выполнения задач управления, виртуального прототипирования и оперирования данными;

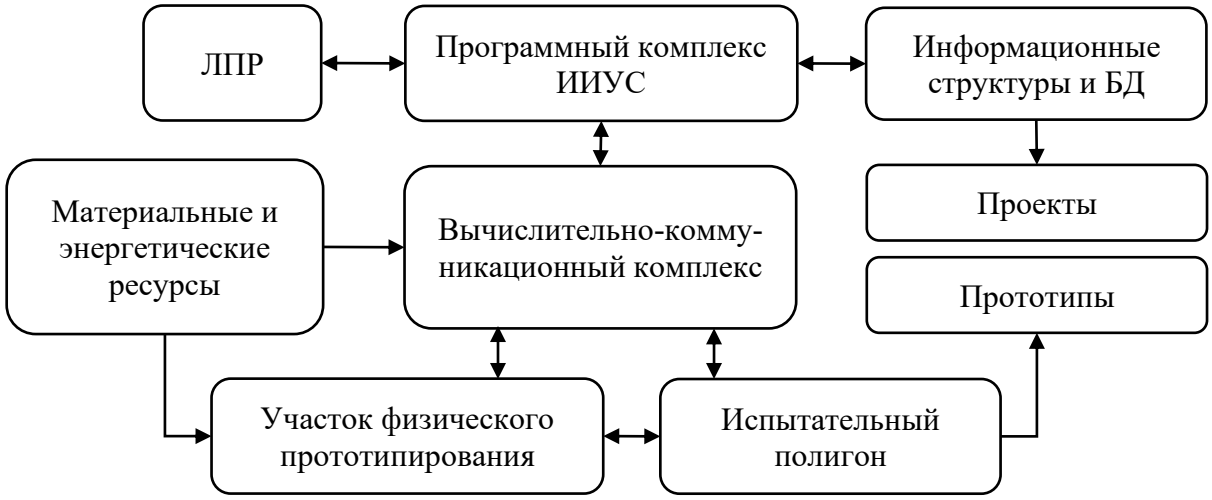


Рис. 1. *Архитектура ИПК МПМК*

Fig. 1. *Architecture of RPC SPMC*

- участок физического прототипирования, оснащенный необходимым технологическим оборудованием и оснасткой;

- испытательный полигон, представляющий реальную физическую среду функционирования разрабатываемых прототипов и оборудованный средствами приведения в действие прототипов и наблюдения за их поведением;

- программный комплекс интеллектуальной информационно-управляющей системы, оснащенный соответствующим программным обеспечением;

- БД и информационные структуры, содержащие исходную, оперативную и накапливаемую в процессе деятельности информацию.

Проектирование экспериментальной лабораторной системы МПМК

Основу вычислительно-коммуникационного комплекса составляет ЭВМ на базе ОС с гипервизором, в которой развернуты виртуальные машины управляющего сервера, сервера БД, сервера виртуального прототипирования и системы базового информационно-аналитического сервиса (БИАС) (рис. 2). Коммуникационная сеть организуется посредством сетевого оборудования (маршрутизатор локальной сети).

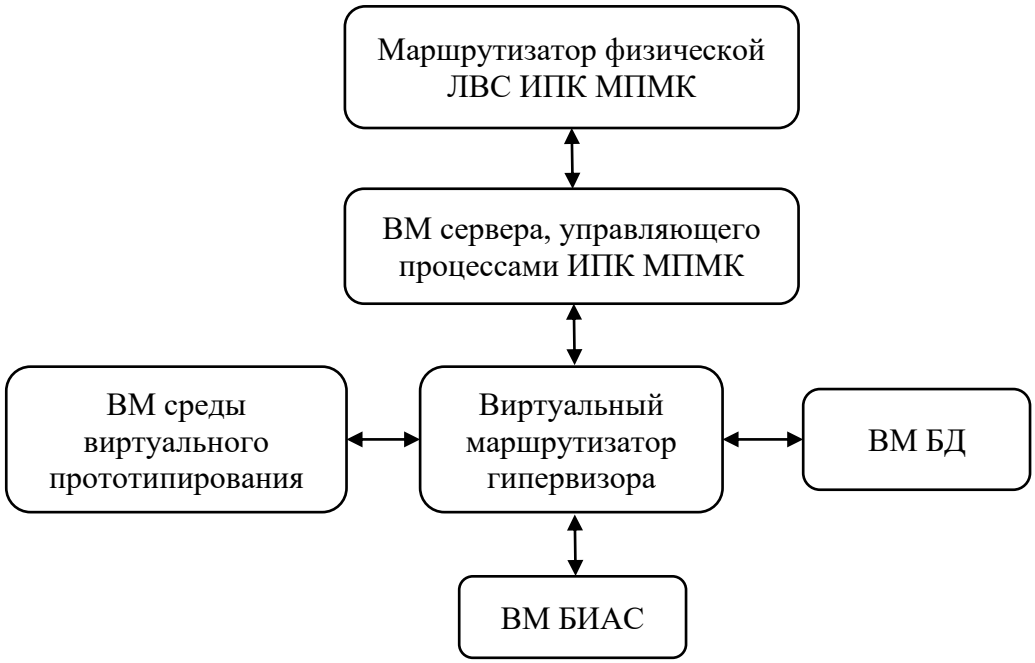


Рис. 2. *Схема организации вычислительно-коммуникационного комплекса с использованием технологий виртуализации*

Fig. 2. *Scheme of organization of the computing and communications complex using virtualization technologies*

Для выполнения описанных в работе процессов [2] на начальном этапе разработки экспериментальный участок физического прототипирования должен быть соответственно оборудован или иметь возможность доступа исполнителя к внешним услугам по следующим направлениям решаемых задач:

- 3D-печать деталей форм и технологической оснастки;

- лазерная резка деталей форм и технологической оснастки;

- ручная слесарно-механическая обработка и сборка МПМК на верстаке, оснащенном инструментами и оснасткой, а также ЭВМ автоматизированного рабочего места исполнителя (планшет/смартфон), интегрированного с КИКС (отображение заданий, ввод отчетов и состояний, событий);

- дегазация, сушка и промывка на специально спроектированной станции или с помощью набора соответствующих устройств.

Испытательный полигон содержит площадку, оснащенную системой освещения, IP-видеокамерами, принтером для печати самоклеек QR-кодов для автоматической идентификации прототипов и системой контроля и управления приводами актуаторов прототипов.

В соответствии с представленной архитектурой ИПК МПМК велась разработка экспериментальной лабораторной системы, схема которой представлена на рис. 3, согласно которой были запланированы, созданы и реализованы основные технические и программные решения, позволяющие запустить процессы САППИУ и пробные циклы СПУТЦ по материальному воплощению симуляций автоматически сгенерированных и отобранных виртуальных прототипов.



Рис. 3. *Схема экспериментальной лабораторной системы для исследования процессов САППИУ и разработки ИПК МПМ*

Fig. 3. *Scheme of the experimental laboratory system to examine SADPIC processes and development of RPC SPMC*

Разработка программного обеспечения ИПК МПМК

Программный комплекс ИПК МПМК строится в соответствии с предъявляемыми нами требованиями к действующему прототипу CALS-системы [16] и с учетом ее аппаратно-программной интеграции как подсистемы КИКС со средой физического прототипирования и испытательного полигона, реализуя рабочий прототип КИКС МПМК. При этом программный комплекс должен решать следующие основные задачи:

- информационное сопровождение процессов жизненного цикла разработки прикладных технологий и продуктов МПМК;
- развертывание и эксплуатация баз данных и баз знаний;

- журналирование, документирование и техдокументирование;
- оперативный контроль и управление процессами;
- выполнение вычислительных процессов виртуального прототипирования (численные расчеты, эволюционное моделирование, симуляция на физических движках, математический анализ и поддержка принятия решений);
- выполнение процессов базового информационно-аналитического сервиса (БИАС);
- интерфейс с интеллектуальными агентами и пользователями (ЛПР, персонал, сервисы ИИ и СППР).

При разработке программной среды виртуального прототипирования и организации эволюционных вычислительных процессов автоматического проектирования МПМК, подробно рассмотренной нами в работе [17], решались вопросы организации генетического кодирования информационных моделей проектов МПМК, их симуляции как физических объектов, комплексной оценки степени приближения к поставленным целям исследования/проектирования и отбора проектов прототипов по критериям допуска к их физической материализации.

Автоматическое проектирование воксельных конструкций организовано в виде линейного конвейера, который принимает в качестве входных данных описание используемых при построении поликуба типов вокселов и цель проектирования, отражающую желаемое поведение изготовленной конструкции МПМК (рис. 4).

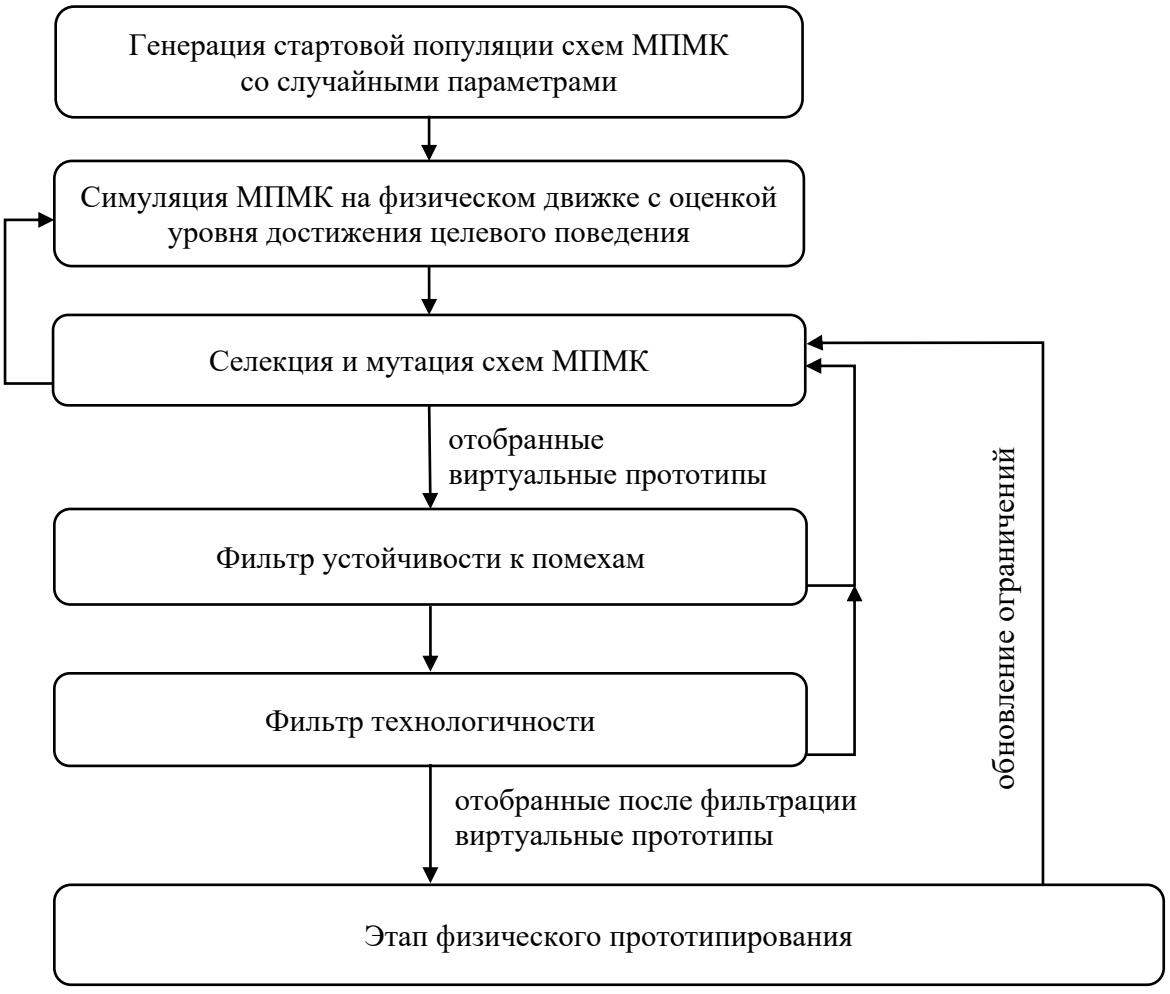


Рис. 4. *Схема конвейера виртуального прототипирования МПМК*

Fig. 4. *Scheme of the SPMC virtual prototyping pipeline*

Каждая воксельная конфигурация модели МПМК, представляемая в виде поликубов из мягких полимерных материалов с различной функциональностью, генетически кодируется с использованием ***искусственных нейронных сетей, генерирующих композиционные паттерны*** (*CPPN*), при этом выход нейронной сети отображает пространственные координаты трехмерной декартовой решетки на одно значение, указывающее, есть ли воксел в этом месте и какого он функционального типа (например, активный или пассивный), или на иные значения параметров и режимов управления воксела в данном месте.

Генерируемые таким образом модели МПМК используются в эволюционном отборе на основе генетического алгоритма, при котором развиваются структура и веса узлов нейронных сетей за счет мутационной модификации и отбора удачных конфигураций после оценки поведения воксельной МПМК в результате симуляции на физическом движке ***Voxelyze*** [19], за время, достаточное для проявления моделируемой конструкцией свойств, обеспечивающих решение поставленной прикладной задачи проектирования. Для визуализации симуляции виртуальных прототипов используется программная утилита ***VoxCAD***, разработанной автором физического движка *Voxelyze*.

В результате выполнения вычислительным конвейером генетического алгоритма, начинающегося с генератора стартовой популяции случайных схем проектов МПМК, образуется множество проектов с эффективными схемами МПМК.

Ввиду наличия погрешностей моделирования высока вероятность существенных различий поведения между виртуальными и физическими прототипами. Поэтому эффективные проекты схем МПМК пропускаются через фильтр устойчивости к помехам, который позволяет проходить только тем проектам, которые сохраняют желаемое поведение в условиях шума, как простое и эффективное условие того, будет ли проект сохранять свое поведение при физическом прототипировании.

Устойчивые к шуму проекты МПМК затем пропускаются через фильтр технологичности (сложности сборки), удаляющий конструкции, которые не подходят для текущего метода сборки или вряд ли смогут масштабироваться для решения будущих более сложных задач. Правила фильтрации по факторам технологичности изготовления МПМК разрабатываются в процессе детализации и практической отработки конкретной технологии физического прототипирования МПМК. Проекты, которые успешно проходят через фильтр технологичности, затем на этапе физического прототипирования изготавливаются и оцениваются на испытательном полигоне путем сравнения реального поведения с поведением, предсказанным в симуляции.

Количественная оценка успешности переноса поведения в реальность формирует новые ограничения, которые передаются обратно в эволюционный алгоритм, который после обновления в новых циклах эволюции развивает конструкции не только производительные, но и соответствующие полученным из физической среды ограничениям, что увеличивает вероятность успеха последующих циклов автоматического проектирования и прототипирования.

Пробные запуски представленного процесса виртуального прототипирования для конфигурационного пространства 4x4x4 с двумя функциональными типами вокселей показали работоспособность представленных алгоритмов, а получаемые в вычислительном процессе данные доступны для дальнейшей математической обработки и визуализации в среде симуляции и технического анализа.

Полученные в результате отбора лучшие из схем прототипов были реализованы в виде тестовых физических прототипов. При подготовке технической и технологической документации на физическое прототипирование конструктивные параметры схем прототипов были обработаны с использованием разработанной программы для автоматизированного построения 3D-моделей и спецификаций на сборку, передаваемых исполнителю участка физического прототипирования.

В процессе пусконаладки создаваемого участка физического прототипирования по полученным на этапе виртуального прототипирования схемам МПМК изготовлены пробные образцы, которые были протестированы на стендовой испытательной площадке, на которой проводилось наблюдение выполнения прототипом поставленной задачи с оценкой целевых показателей. Полученные данные показали для некоторых прототипов соответствие характера поведения в физической среде и возможность отбора их как результата автоматического проектирования конструкции. Измеренные значения показателей всех испытуемых прототипов возвращаются в генетический алгоритм и используются для обновления ограничений в эволюционном моделировании, исключая из процесса геномы неперспективных проектов и при необходимости усиливая доминирование удачных конструкций.

На следующем этапе разработки ИПК МПМК на основе разработанной экспериментальной лабораторной системы планируется создать автоматизированный испытательный полигон, оснащенный устройствами технического зрения и исполнительными устройствами для настройки систем управления прототипов, интегрированными с вычислительно-коммуникационным комплексом и его программным обеспечением КИКС, что в итоге превратит ИПК МПМК в полноценную киберфизическую среду автоматического проектирования и прототипирования МПМК.

Также актуальны и требуют реализации разработанных решений по задаче управления технологическим процессом и процессом накопления и обработки технических и экспериментальных данных:

- автоматизация технологических процессов средствами КИКС;
- использование экспертных систем и интеллектуальных систем поддержки принятия решений для управления вектором эволюционного поиска оптимальных МПМК для конкретных прикладных задач;
- формирование базы знаний о функциональных свойствах элементарных конструкций и устройств из блоков (агрегатов, модулей), построенных с их использованием;
- подготовка данных для принятия решений методами и средствами эконометрики;
- выполнение эконометрического построения моделей процесса и анализа данных по результатам эволюционного моделирования;
- работа базового информационно-аналитического сервиса (БИАС) КИКС.

Выводы

Актуальность исследования обусловлена недостаточностью теоретических и экспериментальных знаний, необходимых для создания САППИУ, необходимых для построения киберфизических систем и сред перспективных направлений робототехники: мягкой робототехники, биоробототехники, бионаноробототехники.

В процессе детализации архитектуры разрабатываемого ИПК для автоматического проектирования и прототипирования МПМК получены программные и технические решения, которые позволили спроектировать и реализовать основные компоненты лабораторной системы для проведения вычислительных и физических экспериментальных исследований процессов автоматического проектирования и прототипирования МПМК.

В процессе пусконаладки и отладки лабораторной системы выполнены тестовые запуски вычислительных и физических экспериментов и получены первые автоматически сгенерированные пробные образцы МПМК, подтверждающие работоспособность основных компонентов создаваемой экспериментальной технологической платформы.

Анализ полученных технических и экспериментальных данных позволяет строить модели процессов САППИУ, вести оптимизацию, а на базе созданной лабораторной системы вести разработку прототипа полноценного ИПК для автоматического проектирования и прототипирования МПМК, предназначенной для решения широкого спектра прикладных

задач мягкой робототехники и биоробототехники, а также использовать ее в качестве модельной системы для теоретического исследования возможностей создания аналогичной системы для БНРТ и комплексного представления знаний методов, средств и технологий, позволяющих за ограниченное время и ресурсы создавать эффективные системы автоматического проектирования и прототипирования конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. EDN: JNLSCR.

2. *Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н.* Мягкие полимерные мехатронные конструкции для применения биоинтегрированного подхода в мягкой робототехнике и биоробототехнике // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XVII всероссийской научно-практической конференции и XIII молодежной школы-семинара, п. Домбай, 4–8 апреля 2022 года. Таганрог: ИП Марук М.Р, 2022. С. 302–313. EDN: RULOPE.

3. *Matas J., James S., Davison A.J.* Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation // Conference on Robot Learning. PMLR, 2018. Pp. 734–743.

4. *Заммоев А. У.* Перспективы развития методов и средств эволюционного моделирования для виртуального прототипирования бионаноробототехнических устройств и систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2(86). С. 157–164. EDN: YZKELZ.

5. *Kamm R.D., Bashir R., Arora N. et al.* Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems. APL bioengineering. 2018. Vol. 2. No. 4. P. 040901.

6. *Noor N., Shapira A., Edri R. et al.* 3D printing of personalized thick and perfusable cardiac patches and hearts. Advanced Science. 2019. Vol. 6. No. 11. P. 1900344.

7. *Cvetkovic C., Raman R., Chan V. et al.* Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111. No. 28. Pp. 10125–10130.

8. *Kriegman S., Blackiston D., Levin M. et al.* A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. No. 4. Pp. 1853–1859.

9. *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.

10. *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.

11. *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.

12. *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. EDN: YOHKLJ.

13. *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.

14. *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.

15. *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. EDN: VHTUQQ.

16. *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. EDN: TTKAEL.

17. *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.

18. *Бабешко В. Н.* Информационная поддержка жизненного цикла изделий // Сборник научных трудов VIII международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». Курск, 28 июня 2019 года. Том 1. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 24–26. EDN: TBUYKB.

19. *Hiller J., Lipson H.* Dynamic simulation of soft multimaterial 3d-printed objects. Soft robotics. 2014. Vol. 1. No. 1. Pp. 88–101.

REFERENCES

1. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search for methods and research into the possibilities of using modern technologies for virtual prototyping and design of bioengineering systems in the design of bionanodevices and bionanorobotics systems. *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. EDN: JNLSCR. (In Russian)

2. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Soft polymer mechatronic structures for the application of a biointegrated approach in soft robotics and biorobotics. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Perspective systems and control problems]: Materialy XVII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIII molodezhnoy shkoly-seminara. Dombay, Taganrog: IP Maruk M.R., 2022. Pp. 302–313. EDN: RULOPE. (In Russian)

3. Matas J., James S., Davison A.J. Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation. *Conference on Robot Learning*. 2018. Pp. 734–743.

4. Zammoev A.U. Prospects for the development of methods and means of evolutionary modeling for virtual prototyping of bionanorobotic devices and systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2018. No. 6-2(86). Pp. 157–164. EDN: YZKELZ. (In Russian)

5. Kamm R.D., Bashir R., Arora N. et al. Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems. *APL bioengineering*. 2018. Vol. 2. No. 4. P. 040901.

6. Noor N., Shapira A., Edri R. et al. 3D printing of personalized thick and perfusable cardiac patches and hearts. *Advanced Science*. 2019. Vol. 6. No. 11. P. 1900344.

7. Cvetkovic C., Raman R., Chan V. et al. Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. No. 28. Pp. 10125–10130.

8. Kriegman S., Blackiston D., Levin M. et al. A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. No. 4. Pp. 1853–1859.

9. 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)

10. 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)

11. 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)

12. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Search, research and development of bio-nanorobotics 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. EDN: YOHKLJ. (In Russian)

13. 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)

14. 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)

15. 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. EDN: VHTUQQ. (In Russian)

16. 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. EDN: TTKAEL. (In Russian)

17. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. Development of technology for virtual prototyping of soft polymer mechatronic structures. *Materialy XVIII vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii i XIV molodezhnoj shkoly-seminara «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya*. Dombay, 3–7.04.2023. Taganrog: Lukomor'e, 2023. Pp. 302–313. (In Russian)

18. Babeshko V.N. Information support for the life cycle of products. *Cbornik nauchnyh trudov VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Tekhnika i tekhnologii: puti innovacionnogo razvitiya»*. Kursk, 28.06.2019. Southwestern State University. Vol. 1. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2019. Pp. 24–26. EDN: TBUYKB. (In Russian)

19. Hiller J., Lipson H. Dynamic simulation of soft multimaterial 3d-printed objects. *Soft robotics*. 2014. Vol. 1. No. 1. Pp. 88–101.

Информация об авторах

Заммоев Аслан Узеирович, канд. техн. наук, зав. совместной лабораторией «Андроидная техника» и «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

Абуталипов Ренат Надельшаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. совместной лаборатории «Андроидная техника» и «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

Information about the authors

Zammoev Aslan Uzeyrovich, Candidate of Technical 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

Abutalipov Renat Nadelshaevich, Candidate of Technical 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

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 631.171 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-47-54
EDN: EIPCDC

Разработка проекта передвижного робота для замены аккумуляторных батарей

Р. А. Нотов

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В условиях развития робототехники все большую актуальность приобретают вопросы, связанные с обслуживанием роботов. Массовость их применения требует наличия большого количества обслуживающего персонала при необходимости минимизации в целом участия человека. Известно, что многие роботизированные устройства получают питание от различных типов аккумуляторных батарей (АКБ). Несмотря на определенные достижения науки в направлении увеличения времени работы АКБ, удельная энергоемкость современных источников питания, которыми оснащено большое количество робототехнических устройств, недостаточно высокая. Данное обстоятельство приводит к снижению производительности сельскохозяйственных и в принципе других промышленных роботов из-за потерь времени на зарядку источников их питания, а также к увеличению числа работников организации, задействованных для замены и зарядки АКБ. Использование передвижного робота для замены АКБ стационарных и подвижных машин, задействованных в сельскохозяйственном производстве, на таких работах, как опрыскивание растений, сбор урожая, посев и т.д., дает возможность увеличить их производительность за счет снижения простоев и свести к минимуму участие человека в технологическом процессе. Целью исследований является определение основных конструктивных параметров передвижного робота для замены АКБ стационарной и подвижной роботизированной техники. Исследования проводили в 2023 году на базе ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук». При проектировании и разработке основных узлов передвижного робота для замены АКБ использовались существующие методы расчета и конструирования исполнительных, передаточных, уравновешивающих, направляющих и рабочих органов; методы расчета и конструирования модулей степеней подвижности, рабочих органов и исполнительных механизмов, а также программное обеспечение Compas 3D V19. С учетом габаритных размеров и веса применяемой АКБ Golden Motor определены размеры манипулятора и выполнен расчет его приводов.

Ключевые слова: сельскохозяйственная робототехника, посев, опрыскивание сельскохозяйственных культур, аккумуляторная батарея, робот-манипулятор, передвижной робот

Поступила 14.11.2023, одобрена после рецензирования 26.11.2023, принята к публикации 04.12.2023

Для цитирования. Нотов Р. А. Разработка проекта передвижного робота для замены аккумуляторных батарей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 47–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-47-54

© Нотов Р. А., 2023

MSC: 70B15; 70Q05 Original article

Project development of a mobile robot to change accumulator batteries

R.A. Notov

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. In the context of the development of robotics, issues related to the maintenance of these robots are becoming increasingly relevant. Since the mass nature of their use will require the presence of a large service staff, at the same time minimizing the participation of a person. It is known that various types of robotic devices are powered by accumulator batteries (AB). Despite certain scientific achievements in the direction of increasing the battery life, the specific energy intensity of modern power supplies, which a large number of robotic devices are equipped with, is not high enough. This circumstance leads, in particular for agricultural and, in principle, other industrial robots, to a decrease in the productivity of equipment due to the necessary loss of time to charge their power supplies, and leads to an increase in the number of employees of the organization involved in replacing and charging the battery of existing robots. The use of a mobile robot to replace the battery of stationary and mobile robots involved in agricultural production in such jobs as: spraying plants, harvesting, sowing, etc. makes it possible to increase the productivity of machines by reducing downtime and minimizing human participation in the technological process. The purpose of the research is to determine the main design parameters of a mobile robot to replace the battery of stationary and mobile robots. The research was carried out in 2023 on the basis of the Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Center "Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". When designing and developing the main components of a mobile robot to replace the battery, existing methods of calculation and design of executive, transmission, balancing, guiding and working bodies were used; methods of calculation and design of mobility degree modules, working bodies and executive mechanisms, as well as Compas 3D V19 software. Taking into account the overall dimensions and weight of the used Golden Motor battery, the dimensions of the manipulator were determined and its drives were calculated.

Keywords: agricultural robotics, sowing, spraying of crops, accumulator battery, robotic manipulator, mobile robot

Submitted 14.11.2023, approved after reviewing 26.11.2023, accepted for publication 04.12.2023

For citation. Notov R.A. Project development of a mobile robot to change accumulator batteries. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 47–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-47-54

Введение

Как известно, в настоящее время во всем мире во многих сферах человеческой жизнедеятельности широкое применение находят роботы, отличающиеся друг от друга управлением, позиционированием возможных перемещений, предназначением и способом передвижения. В частности, в сельском хозяйстве на сегодняшний день находят применение роботизированные устройства, предназначенные для опрыскивания растений, посева сельскохозяйственных культур, выпаса животных, сбора урожая, взятия почвенных образцов, мониторинга состояния растений и др.

Внедрение роботов в агропромышленный комплекс на базе массового использования различных роботизированных устройств является неоспоримым условием для совершенствования больших сельскохозяйственных компаний [1].

Переоснащение сельскохозяйственных компаний роботизированной техникой, несомненно, приведет к росту производительности труда, безвредности условий работы, улучшению качества производимой продукции [2].

Например, беспилотные летательные аппараты используются для контроля над многолетними плодовыми растениями, обработки пестицидами, наблюдения за посевами, составления карт сельхозугодий, обследования труднодоступных полей и т.д. [3]. Применение беспилотных летательных аппаратов имеет множество неоспоримых преимуществ, таких как: экономия времени и денег, точность обработки сельхозугодий, возможность применения в ночное время и др. [4]. Но у них есть и некоторые недостатки, характерные для всех роботизированных устройств, получающих питание от АКБ, – это невысокая удельная энергоемкость современных источников питания, которыми они оснащены. Существует значительное количество разных видов источников энергии, которые непрерывно дополняются вновь производимыми, и у каждого из них есть свои достоинства и недостатки [5–7]. Однако несмотря на существенные достижения науки в данном направлении, возникает необходимость в частой подзарядке АКБ, что требует определенного времени и участия человека, либо же их замены специально для этого предназначенным передвижным роботом. Необходимостью в разработке подобного унифицированного обслуживающего робота, минимизирующего наличие рабочего персонала, и обусловлена актуальность данной статьи.

Цель исследований – определение основных конструктивных параметров передвижного робота для замены АКБ стационарных и подвижных роботов различного назначения, в которых в качестве источника питания используются АКБ Golden Motor.

Задачей данного исследования является выбор приводов и кинематической схемы манипулятора передвижного робота для замены АКБ.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в 2023 г. на базе ФГБНУ «ФНЦ «КБНЦ РАН». При проектировании и разработке основных узлов и деталей передвижного робота для замены АКБ стационарных и подвижных роботов использовались существующие методы расчета и конструирования исполнительных, передаточных, уравновешивающих, направляющих и рабочих органов; методы расчета и конструирования модулей степеней подвижности, рабочих органов и исполнительных механизмов [8], а также программное обеспечение Compas 3D V19.

Результаты исследования

Предлагаемый передвижной робот предназначен для замены АКБ стационарных и подвижных сельскохозяйственных роботов без их отрыва от основных функций, что позволит увеличить выработку обслуживаемых машин и минимизировать количество рабочего персонала.

Передвижной робот (рис. 1) состоит из рамы (2), на которой установлены четыре мотор-колеса (1).

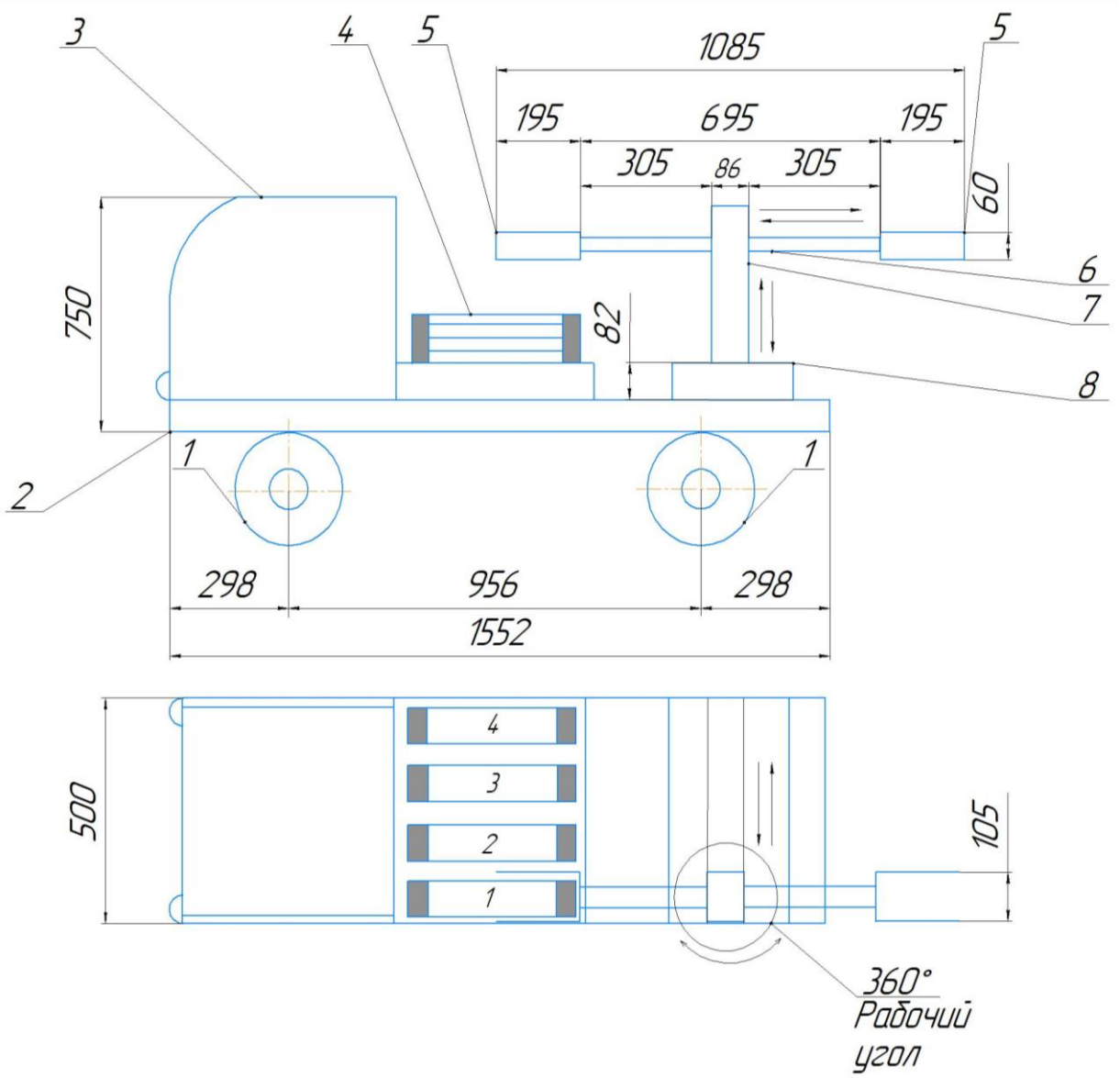


Рис. 1. *Общий вид передвижного робота*

Fig. 1. *General view of the mobile robot*

Примечание. *1 – мотор-колесо; 2 – рама; 3 – блок управления; 4 – аккумуляторная батарея; 5 – схват; 6 – плечо; 7 – стойка; 8 – основание.*

В передней части рамы находится блок управления (3), в котором размещены АКБ для питания всех узлов передвижного робота и необходимые электронные компоненты. В средней части рамы имеется площадка для АКБ (4), зарядка которых происходит постоянно от основного источника питания передвижного робота, находящегося в блоке управления (3). В задней части рамы монтируется манипулятор, имеющий пять степеней свободы и включающий основание (8), стойку (7), плечо (6) и два схвата (5), предназначенных для захвата АКБ. Кинематическая схема манипулятора показана на рисунке 2. 3D-модель и вид спереди схвата манипулятора показаны на рисунках 3 и 4.

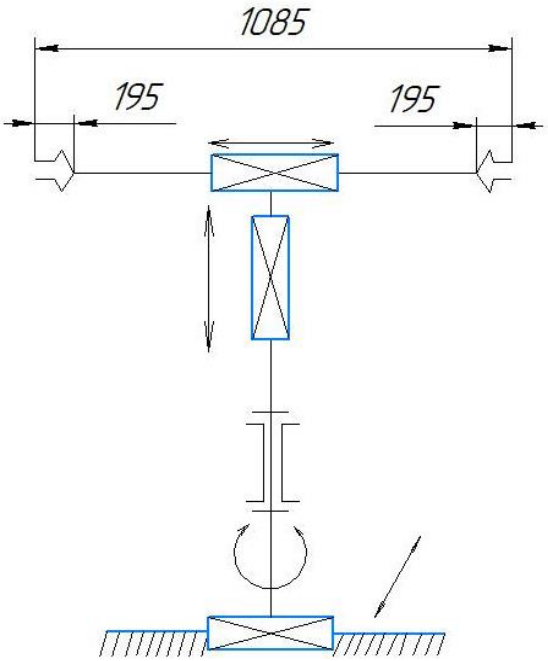


Рис. 2. *Схема кинематическая манипулятора передвижного робота*

Fig. 2. *Kinematic diagram of a mobile robot manipulator*

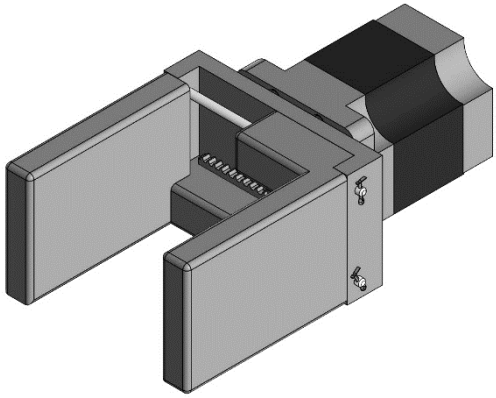


Рис. 3. *Схват манипулятора с приводом*

Fig. 3. *Powered manipulator grip*

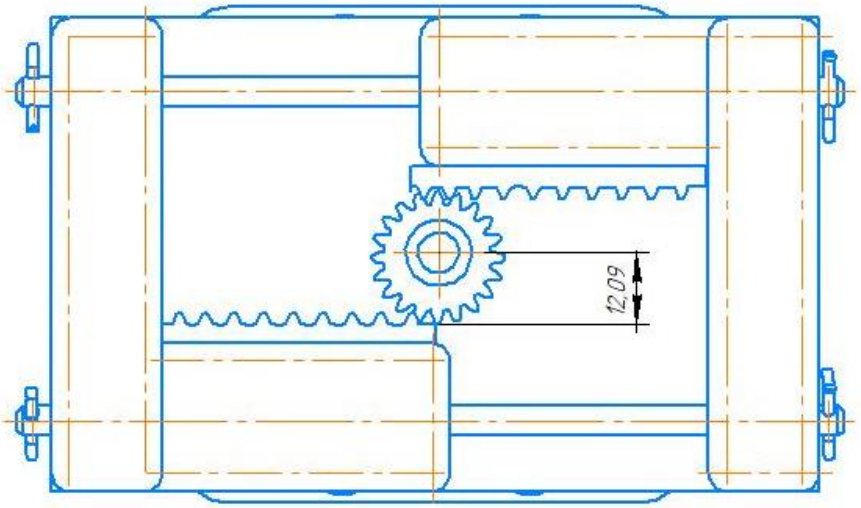


Рис. 4. *Вид спереди схвата манипулятора*

Fig. 4. *Front view of the manipulator gripper*

Основными критериями, по которым были определены габаритные размеры передвижного робота для замены АКБ, являются: размеры и масса объекта манипулирования – АКБ Golden Motor, используемая в качестве источника питания роботизированной техники различного назначения, система координат и необходимое число степеней подвижности исходя из требуемой траектории перемещения манипулятора.

Принцип работы передвижного робота следующий. Во время выполнения сельскохозяйственным роботом своих функций при снижении уровня заряда его АКБ ниже установленной отметки сообщение об этом поступает на передвижной робот, после этого он

выезжает к источнику сигнала с целью замены его АКБ. С помощью датчиков происходит сближение двух машин на расстояние, позволяющее выполнить задачу. Изначально манипулятор находится в верхнем положении над АКБ под номером 1. Из этого положения манипулятор перемещается вниз, затем вправо в сторону сельскохозяйственного робота. Далее смыкается схват, захватывающий разряженную АКБ сельскохозяйственного робота. После чего манипулятор перемещается в левую сторону, и смыкается второй схват, захватывающий заряженную АКБ. Затем манипулятор поднимается вверх, поворачивается на 180^0 и опускается вниз. Схват, удерживающий разряженную АКБ, размыкается, манипулятор перемещается в сторону сельскохозяйственного робота и, установив заряженную АКБ, второй схват размыкается, после чего манипулятор возвращается в исходное положение. Сельскохозяйственный робот продолжает выполнение своих основных функций, передвижной робот приступает к отработке следующего сигнала либо находится в режиме ожидания.

Критериями выбора шаговых двигателей являются крутящий момент на выходном валу, мощность и геометрические параметры.

Для расчета крутящего момента на валу шагового двигателя, необходимого для перемещения манипулятора по горизонтали, в поперечном направлении относительно рамы передвижного робота нужно определить вес, который будет перемещаться данным двигателем. Учитывая массу 1-й АКБ Golden Motor, равную 6 кг, материал изготовления деталей манипулятора (полимерные материалы) и его размеры, принимаем вес, равный 15 кг:

$$M = F \cdot I \cdot k, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1)$$

где F – нагрузка, Н; F = 15 * 9,8 = 147 Н; I – расстояние от оси вала до зубчатой рейки, м; *к* – коэффициент трения, 0,4.

$$M = 147 \cdot 0.05 \cdot 0.4 = 2{,}9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Выбираем шаговый двигатель серии NEMA 23 3.0Nm с крутящим моментом 3,0 Н·м.

Определяем мощность на выходном валу привода для вращения стойки 7 манипулятора на 360^0:

$$\text{Р}_{\text{вых}} = \text{Т}_{\text{вых}} \cdot \omega_{\text{вых}}, \text{ кВт},$$

где $\text{Р}_{\text{вых}}$ – мощность на выходном валу привода; $\text{Т}_{\text{вых}}$ – момент на выходном валу привода; $\omega_{\text{вых}}$ – угловая скорость на выходном валу привода, с^{-1}.

Момент на выходном валу привода стойки 7 манипулятора рассчитываем по формуле

$$\text{Т}_{\text{вых}} = F_t \cdot R,$$

где F_t – тяговое усилие, Н; R – радиус стойки манипулятора, м.

$$F_t = t \cdot F_\text{п},$$

где *t* – коэффициент трения, t = 0,4; $\text{F}_\text{п}$ – нагрузка, кг.

$$F_\text{п} = m \cdot g,$$

где *m* = 14,3 кг,

$$F_\text{п} = 14{,}3 \cdot 9{,}8 = 140{,}1 \text{ Н},$$

$$F_t = 0{,}4 \cdot 140{,}1 = 56 \text{ Н}.$$

Угловую скорость на выходном валу привода можно рассчитать по формуле

$$\omega_{\text{вых}} = \pi \cdot \frac{n}{30},$$

где *n* – частота вращения; *n* = 15,9 об/мин.

Подставляя данные, получим угловую скорость на выходном валу привода:

$$\omega_{\text{вых}} = 3{,}14 \cdot \frac{15{,}9}{30} = 1{,}7\text{с}^{-1}.$$

Подставляя данные, получаем значение момента на выходном валу привода:

$$\text{Т}_{\text{вых}} = 56 \cdot 0{,}05 = 2{,}8\ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Определяем выходную мощность на валу привода:

$$\text{Р}_{\text{вых}} = 2{,}8 \cdot 1{,}7 = 4{,}8\ \text{Вт}.$$

По полученным значениям крутящего момента и мощности выбираем шаговый двигатель серии NEMA 34.

Расчет привода для перемещения плеча 6 манипулятора по горизонтали выполняем по формуле (1):

$$\text{М} = 98 \cdot 0{,}025 \cdot 0{,}4 = 0{,}98\ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Выбираем шаговый двигатель с крутящим моментом 1,1 Н·м Nema 23 57HS56-3004A-8x2x1000.

Определение необходимого усилия схватов манипулятора выполняем по формуле

$$F = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot m \cdot g, \text{Н},$$

где m – масса удерживаемого объекта, кг; m = 6 кг; K_1 – коэффициент запаса, зависящий от условия применения робота, обычно K_1 = 1,2…2,0; K_2 – коэффициент, зависящий от максимального ускорения, с которым робот перемещает деталь; K_3 – коэффициент передачи, 0,5.

$$K_2 = 1 + \left(\frac{a}{g}\right),$$

где a – ускорение, a = 5 м/с^2.

$$K_2 = 1 + \left(\frac{5}{9{,}8}\right) = 1{,}5,$$

$$F = 1{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 6 \cdot 9{,}8 = 66{,}2\ \text{Н}.$$

Полученное значение умножаем на расстояние от оси вала до зубчатой рейки схвата – 0,012 м:

$$\text{М} = 66{,}2 \cdot 0{,}012 = 0{,}79\ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

По полученному значению крутящего момента подбираем шаговый двигатель Stepline SL86STH65-5904A для привода схвата.

Выводы

Предложена конструкция передвижного робота с манипулятором для замены АКБ стационарных и подвижных роботизированных устройств. Определены его габаритные размеры с учетом размеров и массы АКБ Golden Motor, используемой в качестве источника энергии в роботизированных машинах. Выбрана кинематическая схема манипулятора. Выполнен расчет его приводов. Определены значения крутящего момента на валу шагового двигателя, необходимого для перемещения манипулятора по горизонтали, на выходном валу привода для вращения стойки манипулятора на 360^0, для перемещения плеча манипулятора по горизонтали и необходимого усилия схватов манипулятора. По полученным расчетным значениям подобраны необходимые шаговые двигатели.

REFERENCES

1. *Шевченко А. В., Мещеряков Р. В., Мигачев А. Н.* Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // Проблемы управления. 2019. № 5. С. 3–18.

Shevchenko A.V., Meshcheryakov R.V., Migachev A.N. Review of the state of the world market of robotics for agriculture. Part 1. Unmanned agricultural machinery. *Problemy upravleniya* [Problems of management]. 2019. No. 5. Pp. 3–18. (In Russian)

2. *Скворцов Е. А., Скворцова Е. Г., Санду И. С., Иовлев Г. А.* Переход сельского хозяйства к цифровым, интеллектуальным и роботизированным технологиям // Экономика региона. 2018. Т. 14. Вып. 3. С. 1014–1028.

Skvortsov E.A., Skvortsova E.G., Sandu I.S., Iovlev G.A. Transition of agriculture to digital, intelligent and robotic technologies. *Ekonomika regiona* [The economy of the region]. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 1014–1028. (In Russian)

3. Shevchenko A.V., Meshcheryakov R.V., Migachev A.N. Overview of the state of the world market of robotics for agriculture. Part 2. Unmanned aerial vehicles and robotic farms. *Problems of management.* 2019. No. 6. Pp. 3–10.

4. Priporov I.E., Bogdanov R.P., Alenin P.V., Aushev M.H. Prospects for the introduction of unmanned aerial vehicles in agriculture for chemical processing of plants. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University*. 2023. No. 3(101). Pp. 191–195.

5. Townsend A., Jiya I.N., Martinson C. et al. A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements. *Heliyon.* 2020. Vol. 6. e05285. https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440 (20)32128-9.pdf

6. Bresser D., Hosoi K., Howell D. et al. Perspectives of automotive battery R&D in China, Germany, Japan, and the USA. *Journal of Power Sources.* 2018. V. 382. Pp. 176–178.

7. Franco A.A. Rechargeable Lithium Batteries. From Fundamentals to Applications. 2015. P. 412.

8. *Егоров О. Д.* Механика и конструирование роботов: учебное пособие. Москва: Станкин, 1997. 510 с.

Egorov O.D. *Mekhanika i konstruirovaniye robotov* [Mechanics and design of robots]: a textbook. Moscow: MGTU "Stankin", 1997. 510 p. (In Russian)

Информация об авторе

Нотов Руслан Адальбиевич, канд. техн. наук, науч. сотр. отдела «Модели и методы развития и внедрения инновационных проектов» Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

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

notovr@inbox.ru

Information about the author

Notov Ruslan Adalbievich, Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Models and Methods of Development and implementation of Innovative projects, Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

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

notovr@inbox.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 519.17; 519.85 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-55-64
EDN: ENFHEP

Метод компьютерного проектирования разветвленных трубопроводных гидравлических сетей с оптимальным количеством точек 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. Разработаны метод и алгоритм построения потоковых гидравлических сетей с оптимальным количеством точек Штейнера. Метод состоит в последовательном удалении точек Штейнера и последующей оптимизации координат эффективных точек Штейнера. Компьютерная система предназначена для проектирования больших распределительных трубопроводных сетей регионального и межрегионального водоснабжения.

Ключевые слова: потоковая сеть, точки Штейнера, оптимизация количества и координат

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 04.12.2023, принята к публикации 08.12.2023

Для цитирования. 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

MSC: 90C26 Original article

Computer design method of branched pipeline hydraulic networks with an optimal number of Steiner points

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 method and algorithm for constructing flow hydraulic networks with an optimal number of Steiner points have been developed. The method consists of sequential removal of Steiner points and subsequent optimization of the coordinates of effective Steiner points. The computer system was created for the design of large distribution pipeline networks for regional and interregional water supply.

Keywords: stream network, Steiner points, quantity and coordinate optimization

Submitted 27.11.2023, approved after reviewing 04.12.2023, accepted for publication 08.12.2023

For citation. Bagov M.A. Computer design method of branched pipeline hydraulic 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

© Багов М. А., 2023

Введение

Потоковая сеть Штейнера снижает затраты на создание и эксплуатацию сети в сравнении с сетью без точек Штейнера. Однако потоковая гидравлическая сеть Штейнера требует дополнительных затрат на создание большого количества устройств соединения входящих в каждую точку Штейнера и исходящих из нее трубопроводов.

Метод оптимизации количества точек Штейнера в потоковой сети состоит из следующих фаз: преобразование исходного потокового дерева сети в сеть Штейнера; оптимизация потоковой сети Штейнера путем оптимизации структуры и координат точек Штейнера каждого узла; последовательное удаление из каждой текущей модели сети точек Штейнера, расположенных достаточно близко к точкам потребления потоков и слияния близких точек Штейнера, связанных потоком; оптимизация координат оставшихся точек Штейнера.

Для проектных организаций при компьютерном проектировании систем важно представлять не один, а несколько проектов. Поэтому в разработанной программной системе производится загрузка нескольких начальных моделей гидравлических сетей различной структуры высокого ранга оптимальности и их последующая трансформация в потоковые сети Штейнера с оптимальным количеством точек Штейнера.

1. Потоковая сеть Штейнера 2-го ранга оптимальности

Сложность решения задач оптимизации потоковых распределительных сетей, и в том числе трубопроводных гидравлических сетей, связана с тем, что эта задача относится к классу задач минимизации вогнутой функции на выпуклом множестве. Именно поэтому в работах [1–3] было введено понятие ранга экстремума для задач оптимизации потоковых сетей.

Основные определения

Назовем потоковую сеть Штейнера $\left\{\Gamma^*(B^*, D^*), \{\upsilon_{ij}^*\}_{ij\in D}, \{x_i^*, y_i^*\}_{B_{\text{ш}}{}^*}\right\}$ *P оптимальной*, если она оптимальна на любой подсети $\mathrm{P}_{\mathrm{k}}^*$, образованной *P* – достижимыми из точки k вершинами сети, т.е. если $\forall \mathrm{k} \in \mathrm{B}^*$, выполнено условие минимума:

$$min \sum_{ij\in\mathcal{D}} f_{ij}(\upsilon_{ij})\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} =$$

$$\sum_{ij\in\mathcal{D}^*} f_i(\upsilon_{ij}{}^*)\sqrt{(x_i{}^* - x_j{}^*)^2 + (y_i{}^* - y_j{}^*)^2},$$

где $\Gamma^*(B^*, D^*)$ – граф сети, υ_{ij}^* – потоки по ветвям сети, $\{x_i^*, y_i^*\}_{B_{\text{ш}}{}^*}$ – координаты точек Штейнера сети, $\upsilon_{ij} = \upsilon_{ij}^*, \forall ij \notin P_i{}^*;\ \ x_i = x_i^*, y_i = y_i^*\ \forall i \notin P_i{}^*$.

Исходное остовное дерево потоковой сети – остовный граф *Г(B,D)*, потоки по дугам и потребление потоков в вершинах которого удовлетворяют условию непрерывности:

$$q\begin{cases} q_j - \sum_{jk\in\Gamma_j^-} q_{ik} = q_j, \forall_{i\neq 1}\in B \\ \sum_{j\in\Gamma_1^+} q_{1j} = \sum_{j\in B} q_j = Q \\ q_j > 0, \forall_{i=1}\in B, q_{ij} > 0, \forall_{ij}\in D, \end{cases}$$

где B – множество вершин графа сети, $|B| = n$ – количество вершин сети, D – множество дуг сети, $|B| = (n-1)$ – количество дуг сети, Γ_j^- – множество ветвей графа сети, исходящих из точки j, Γ_1^+ – ветви графа сети, исходящие из источника сети, Q – поток из источника в сеть, q_{ij} – поток из точки i в j, $q_j > 0 \; \forall \, j \in B$ – потребление потока в точке j.

Значение целевой функции заданного потокового остовного дерева сети

$$З = \sum_{ij \in \mathcal{D}} f_{ij}(q_{ij}) l_{ij}, \; ij \in D,$$

где l_{ij} – длина ij-й ветви сети, для трубопроводных потоковых гидравлических сетей, как известно [4], имеет вид

$$f_{ij}(\upsilon_{ij}) = \left[(k\beta)^{\frac{1}{1-\beta}} \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)\right] \upsilon_{ij}^{\frac{\beta-\alpha}{\beta-1}},$$

где υ_{ij} – поток по ij-й ветви.

Величина в квадратных скобках зависит только от материала трубопроводов, а соответствующее им значение коэффициентов α, β, k – известно [5, с. 52–54]. Ниже представлена соответствующая таблица.

Таблица 1. Значение коэффициентов целевой функции для различных материалов труб

Table 1. Value of objective function coefficients for various pipe 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	1,774	0,001052

Таким образом, целевая функция для гидравлической потоковой сети такова:

$$\sum_{ij \in D} \upsilon_{ij}^{\frac{\beta-\alpha}{\beta-1}} l_{ij},$$

а затраты на создание и эксплуатацию исходной сети оцениваются величиной

$$(k\beta)^{\frac{1}{1-\beta}} \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right) \sum_{ij \in D} q_{ij}^{\frac{\beta-\alpha}{\beta-1}} l_{ij}.$$

Например, для полиэтиленовых труб $\left(\frac{\beta-\alpha}{\beta-1}\right) = 0{,}8045$.

2. Преобразование распределительной потоковой сети в сеть Штейнера 2-го ранга оптимальности

Преобразование остовного дерева распределительной сети в сеть Штейнера осуществляется путем развертывания его узлов в структуры Штейнера.

Например, узловая структура, содержащая 5 вершин, развертывается в 8 остовных деревьев, различных по структуре.

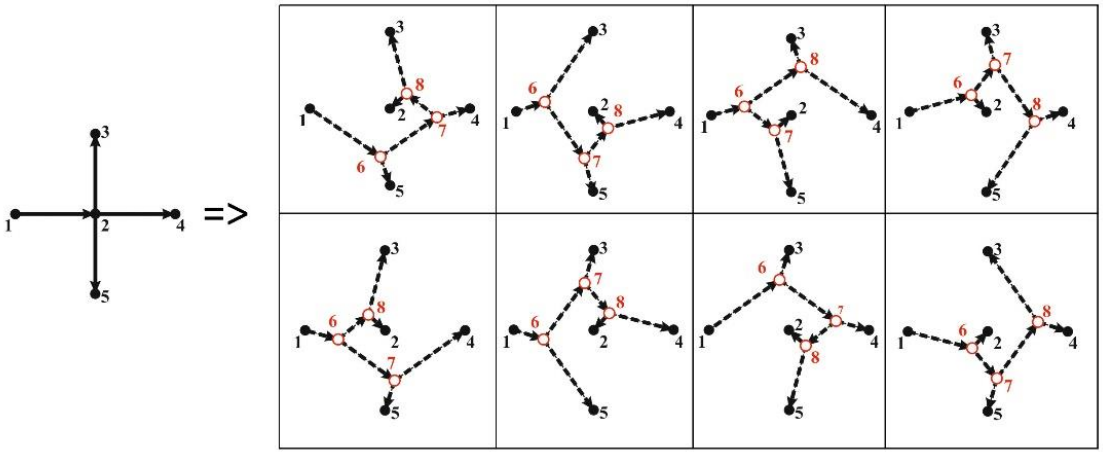


Рис. 1. *Узловые структуры Штейнера для узловой структуры*

Fig. 1. *Steiner nodal structures for nodal structure*

Впервые трехточечная задача Штейнера с различными весами ребер решена в работе [6–7].

Оптимизация 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:

$$\begin{cases} x^{j+1} = x^j - \frac{\partial 3}{\partial x}\left(x^j, y^j\right)\alpha^j = x^j + \sum_{i=1}^{3} f(q_i)\frac{x_i - x^j}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}\alpha^j \\ y^{j+1} = y^j - \frac{\partial 3}{\partial x}\left(x^j, y^j\right)\alpha^j = y^j + \sum_{i=1}^{3} f(q_i)\frac{y_i - y^j}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}\alpha^j. \end{cases}$$

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. 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.

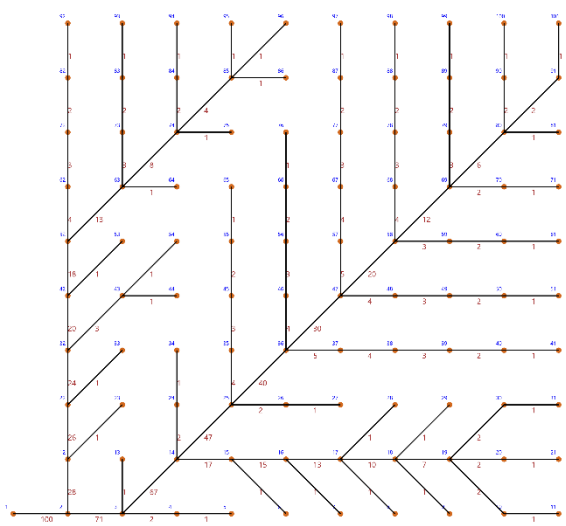
11. Если $\Delta_{\overline{k}}^{k} \ge 0$, $r := r_0 + \tau$, $\tau = \frac{1}{10} r_0$, где r_0 – значение r на начальном цикле оптимизации количества точек Штейнера, то переходим на 6.

В противном случае завершается процедура оптимизации количества точек Штейнера в сети. В результатах вычислительного эксперимента приведена таблица, из которой видно, как складывается стоимость сети Штейнера.

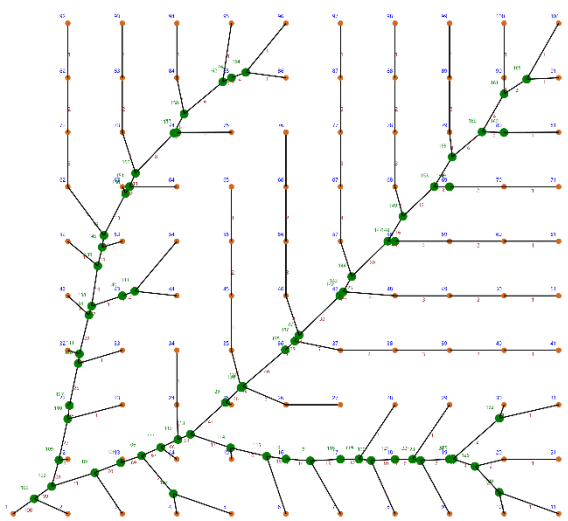
4. Результаты вычислительного эксперимента

Для наглядности вычислительный эксперимент (ВЭ) проводился для симметричной потоковой сети. На рисунках 2 и 3 представлены структуры 2 наилучших сетей 2-го ранга оптимальности с оптимальным количеством точек Штейнера.

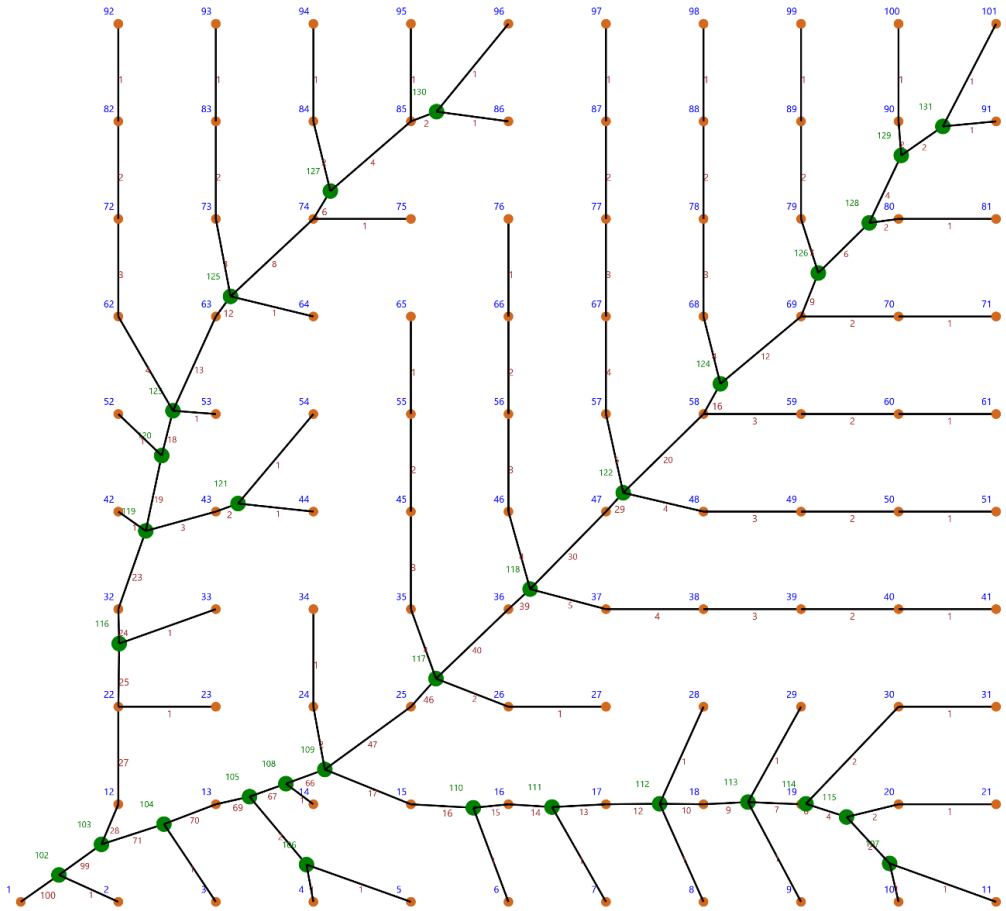
Следует обратить внимание на то, что наилучшая из потоковых распределительных сетей не обязательно переходит в наилучшую сеть Штейнера. Это является основанием для того, чтобы проектировать не одну, а несколько сетей из различных распределительных сетей высокого ранга оптимальности.



Распределительная сеть.
Стоимость – 48,50 млн руб.



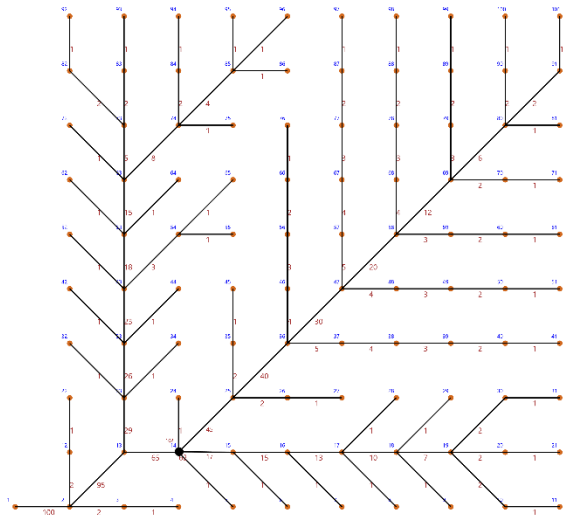
Сеть Штейнера. Стоимость сети Штейнера с учетом стоимости устройств соединения трубопроводов – 47,3 млн руб.
Кол-во точек Штейнера – 64



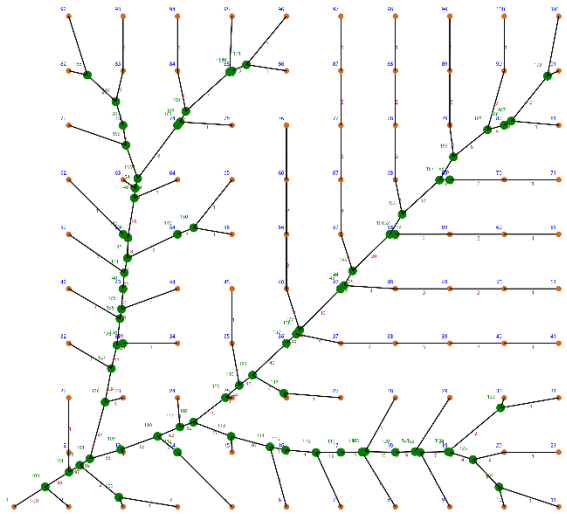
Сеть Штейнера. Стоимость – 47,12 млн руб. Кол-во точек Штейнера – 30

Рис. 2. *Наилучшая сеть Штейнера второго ранга оптимальности с оптимальным количеством точек Штейнера. На рисунке жирно обозначены точки Штейнера*

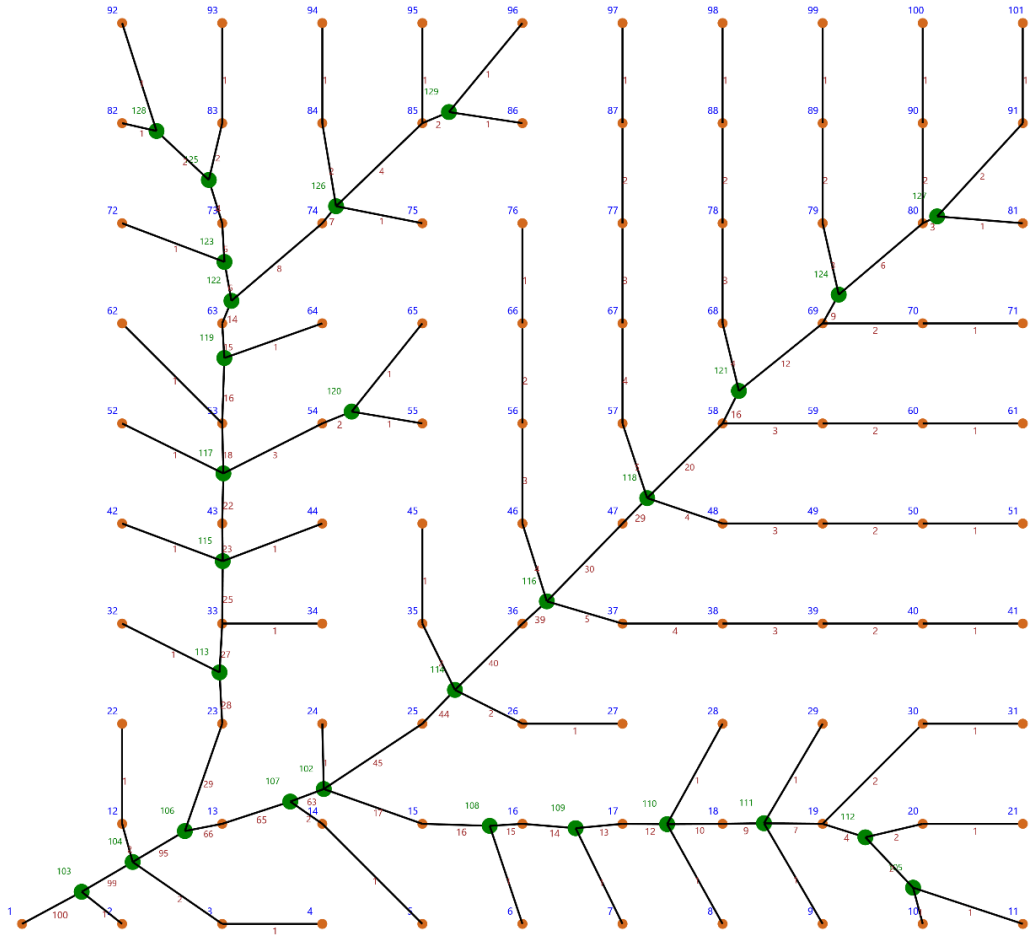
Fig. 2. *The best Steiner network of the second rank of optimality with an optimal number of Steiner points. Steiner points are shown in bold in the figure*



Распределительная сеть.
Стоимость – 48,04 млн руб.



Сеть Штейнера. Стоимость сети Штейнера с учетом стоимости устройств соединения трубопроводов – 47,36 млн руб.
Кол-во точек Штейнера – 71



Сеть Штейнера. Стоимость – 47,13 млн руб. Кол-во точек Штейнера – 28

Рис. 3. *Сеть Штейнера второго ранга оптимальности с оптимальным количеством точек Штейнера. На рисунке жирно обозначены точки Штейнера*

Fig. 3. *Steiner network of the second rank of optimality with an optimal number of points Steiner. Steiner points are shown in bold in the figure*

Таблица 2. *Результаты расчетов*

Table 2. *Calculation results*

	Стоимость дерева (млн руб.)	**Процент оптимизации стоимости (%)**	**Длина дерева Штейнера (км)**	**Общий процент оптимизации стоимости (%)**
Исходное дерево				
	48,0433			
Результаты 1-го круга (развертка исходного дерева в сеть Штейнера и локальная оптимизация координат точек Штейнера)				
	46,69459	2,807	106,6199	
Результаты 2-го круга (построение сетей Штейнера 2-го ранга оптимальности, т.е. оптимизация Структуры всех фрагментов сети, состоящих из 2-достижимых из каждой вершины сети, и оптимизация координат точек Штейнера в них)				
Итерация №1	46,67786	0,035	106,872	2,843
Итерация №2	46,67126	0,049	106,8064	2,857
Итерация №3	46,66493	0,063	106,8514	2,87
Итерация №4	46,66281	0,068	106,9991	2,875
Итерация №5	46,65607	0,082	107,2535	2,889
Итерация №6	46,65409	0,086	106,9198	2,894
Итерация №7	46,65352	0,087	106,9731	2,895
Итерация №8	46,65347	0,088	106,9853	2,895
Результаты 3-го круга (последовательное удаление точек Штейнера и оптимизация координат оставшихся точек Штейнера)				
Удаление точек Штейнера, стоящих рядом с вершинами				
Расстояние между вершинами сети и точками Штейнера (м)				
5	46,66142	-0,017	106,722	2,876
10	46,66957	-0,034	106,5667	2,859
12,5	46,69772	-0,094	106,3796	2,8
15	46,69772	-0,094	106,3796	2,8
17,5	46,7025	-0,105	106,3002	2,79
20	46,73982	-0,185	105,8862	2,713
25	46,74183	-0,189	105,7392	2,708
30	46,84923	-0,419	105,0578	2,485
Удаление одной из двух рядом стоящих точек Штейнера				
5	46,84923	-0,419	105,0578	2,485
10	46,85267	-0,426	105,0181	2,478
12,5	46,85267	-0,426	105,0181	2,478
15	46,85267	-0,426	105,0181	2,478
17,5	46,8544	-0,43	104,8922	2,474
20	46,85631	-0,434	104,8872	2,47
25	46,85458	-0,431	104,9657	2,474
30	46,85458	-0,431	104,9657	2,474
Конечный результат				
	46,85458	-0,431	104,9657	2,474

Таблица 3. *Итоговые результаты*

Table 3. *Final results*

Стоимость распределительной сети (млн руб.)	Стоимость исходной сети Штейнера (млн руб.)	Кол-во точек Штейнера (шт.)	Стоимость сети Штейнера после удаления неэффективных точек Штейнера (млн руб.)	Кол-во точек Штейнера после удаления неэффективных точек Штейнера (шт.)	Процент оптимизации (%)
48,04	47,36	71	47,13	28	1,89
48,5	47,3	64	47,12	30	2,85
49,3	47,7	51	47,5	22	3,65

Заключение

Разработан метод построения потоковых сетей Штейнера 2-го ранга оптимальности с оптимальным количеством точек Штейнера. Метод состоит в последовательном удалении из полученной потоковой сети точек Штейнера, достаточно близко расположенных к узлам сети и друг к другу, и последующей оптимизации координат эффективных точек Штейнера.

Разработана компьютерная система проектирования указанных потоковых сетей, предназначенная для проектирования больших трубопроводных распределительных сетей регионального и межрегионального водоснабжения. Метод и компьютерная система рассчитаны на проектирование нескольких сетей равного ранга оптимальности и различной структуры, что важно для проектных организаций, т.к. обеспечивает возможность выбора из них наилучшей с точки зрения проектировщиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудаев В. Ч.* Ранги экстремумов и структурная оптимизация больших сетевых систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 4(72). С. 15–24.

2. *Кудаев В. Ч., Багов М. А.* Построение потоковой сети Штейнера 2-го ранга оптимальности // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. Т. 154. 2018. С. 32–42.

3. *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: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2022-22-4-39-56

4. *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.

5. *Абрамов Н. Н., Поспелова М. М., Сомов М. А., Варапаев В. Н., Керимова Д. Х.* Расчет водопроводных сетей. Москва: Стройиздат, 1983. 278 с.

6. *Гилберт Э. Н., Поллак Г. О.* Минимальные деревья Штейнера // Кибернетический сборник. Новая серия. Вып. 8. 1971. С. 19–49.

7. *Gilbert E.N.* Minimal Cost Communication Networks. Bell System technological Journal. 1967. No. 9. Pp. 48–50.

REFERENCES

1. Kudaev V.Ch. Ranks of extrema and structural optimization of large network systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. No. 4(72). Pp. 15–24. (In Russian)

2. Kudaev V.Ch., Bagov M.A. Construction of a Steiner stream network of the 2nd rank of optimality. *Itogi Nauki i Tekhniki. Ser. Sovrem. Mat. Pril. Temat. Obz.* Vol. 253. 2021. Pp. 488–499. (In Russian)

3. Abazokov M.B., Bagov M.A., Kudaev V.Ch. Computer design of large pipeline networks of high optimality rank. *Doklady AMAN* [Reports of AMAN]. 2022. Vol. 22. No. 4. Pp. 39–56. DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2022-22-4-39-56. (In Russian)

4. 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)

5. Abramov N.N., Pospelova M.M., Somov M.A., Varapaev V.N., Kerimova D.Kh. *Raschet vodoprovodnykh setey* [Calculation of water supply networks]. Moscow: Stroyizdat, 1983. 278 p. (In Russian)

6. Gilbert E.N., Pollak G.O. Minimal Steiner trees. *Kiberneticheskiy sbornik* [Cybernetic collection]. New series. 1971. Vol. 8. Pp. 19–49. (In Russian)

8. Gilbert E.N. Minimal Cost Communication Networks. *Bell System technological Journal*. 1967. No. 9. Pp. 48–50.

Информация об авторе

Багов Марат Алиевич, науч. сотр. отдела 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

Information about the author

Bagov Marat Alievich, Researcher of the 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;

maratniipma@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0899-898X

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 519.85 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-65-73
EDN: EXHJKD

Возможные режимы и оптимизация работы светофора на двухполосном 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, работающем в двухфазном режиме, когда по одной из трасс горит зеленый цвет, по другой – красный. 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, задача может быть решена после измерения основных параметров движения автотранспортных средств через перекресток в период наибольшей нагрузки.

Ключевые слова: двухполосный перекресток, оптимизация работы светофора, двухфазный режим

Поступила 30.10.2023, одобрена после рецензирования 07.11.2023, принята к публикации 13.11.2023

Для цитирования. 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

MSC: 93-10 Original article

Possible modes and optimization of traffic light operation at a two-lane city intersection

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 urgent problems of optimizing the city's transport system is the problem of the operating mode of traffic lights at city intersections. The paper presents a solution to the problem of a traffic light operating in a two-phase mode – when one of the lanes is green and the other is red. The presented method is based on the well-known Lighthill–Whitham condition. The consideration of two-lane intersections along each of the two lanes is due to the fact that such intersections make up a significant part of the city's intersection system; the problem can be solved after measuring the main parameters of vehicle movement through the intersection during the period of greatest load.

Keywords: two-lane intersection, optimization of traffic light operation, two-phase mode

Submitted 30.10.2023, approved after reviewing 07.11.2023, accepted for publication 13.11.2023

For citation. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. Possible modes and optimization of traffic light operation at a two-lane city intersection. *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

© Кудаев В. Ч., Буздов А. К., 2023

Введение

В известной монографии [1] отмечено, что задача о светофорном управлении движением автотранспортных средств (АТС) через перекресток является одной из главных задач математического моделирования движения транспортных потоков в городе:

- эволюция затора,
- задача о светофоре,
- задача о выборе оптимальной топологии транспортной сети,
- расчет матрицы корреспонденций и распределения потоков,
- задача о надежности графа транспортной сети.

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.

Целью представляемого исследования является получение основных параметров и характеристик перекрестка с двухфазным светофорным управлением и оптимального режима его работы.

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. При этом для оценки работы светофора используются индивидуальный подход, имитационное и компьютерное моделирование потоков на перекрестке [6–13].

1. Условие Лайтхилла–Уизема и его интерпретация ненакопления автотранспортных средств (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 (работающим 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 $\bar{\rho} < \rho_m$, где $\bar{\rho}$ – плотность потока $\bar{q}$, ρ_m – плотность, при которой значение потока максимально, – q_m.

Решение М. Лайтхилла и Дж. Уизема таково: перед светофором не будет скапливаться очередь, если

$$(q_m - \bar{q})T_{\text{зел}} \geq \bar{q}T_{\text{кр}}, \text{ т.е. } \frac{T_{\text{зел}}}{T_{\text{кр}}} \geq \frac{\bar{q}}{q_m - \bar{q}}.$$

На рис. 1 представлена схема двухполосного перекрестка.

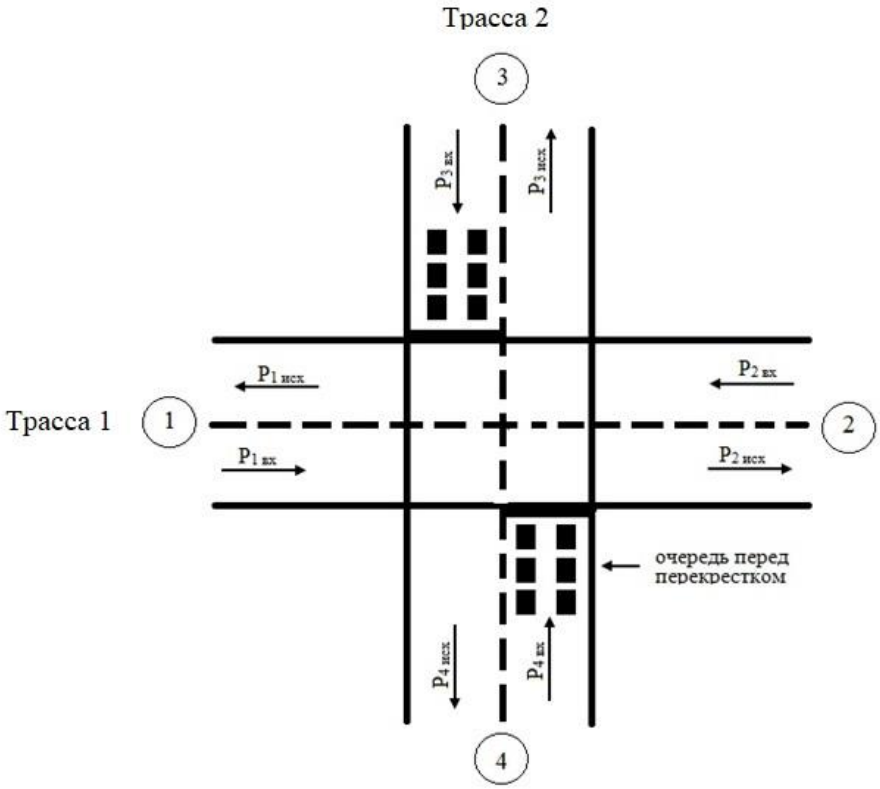


Рис. 1. *По трассам 1 (1–2) и 2 (3–4) горят соответственно зеленый и красный цвета светофора*

Fig. 1. *On lanes 1 (1–2) and 2 (3–4), the traffic lights are green and red, respectively*

2. Возможный интервал отношения времени горения зеленого цвета по каждой из трасс и условие неблокировки перекрестка

Оценка Лайтхилла–Уизема $\frac{T_{зел}}{T_{кр}} \geq \frac{\bar{q}}{q_m - \bar{q}}$ при рассмотрении обеих трасс, т.е. перекрестка в целом (рис. 1), приводит к следующим неравенствам:

$$\frac{T^1_{зел}}{T^1_{кр}} = \frac{T^1_{зел}}{T^2_{зел}} \geq \frac{q^1}{q^1_m - q^1}, \tag{1}$$

$$\frac{T^2_{зел}}{T^2_{кр}} = \frac{T^2_{зел}}{T^1_{зел}} \geq \frac{q^2}{q^2_m - q^2}, \tag{2}$$

где верхними индексами обозначены номера трасс.

Утверждение 1. *На перекрестке в целом не будет происходить накопления АТС от цикла к циклу работы светофора только если*

$$\frac{q^1}{q^1_m} + \frac{q^2}{q^2_m} \leq 1.$$

При этом возможные режимы работы светофора определяются следующим образом

$$\begin{aligned} &\frac{T^1_{зел}}{T^2_{зел}} \in \left[\frac{q^1}{q^1_m - q^1}, \frac{q^2_m - q^2}{q^2}\right], \text{если } \frac{q^1}{q^1_m - q^1} \geq \frac{q^2}{q^2_m - q^2}, \\ &\frac{T^2_{зел}}{T^1_{зел}} \in \left[\frac{q^2}{q^2_m - q^2}, \frac{q^1_m - q^1}{q^1}\right], \text{если } \frac{q^2}{q^2_m - q^2} \geq \frac{q^1}{q^1_m - q^1}. \end{aligned} \tag{3}$$

Доказательство. Пусть $\frac{q^1}{q_m^1-q^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2-q^2}$. Из (1) и (2) следует

$$\frac{q^1}{q_m^1-q^1} \leq \frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} \leq \frac{q_m^2-q^2}{q^2}.$$

Неравенство имеет решение, только если $\frac{q^1}{q_m^1-q^1} \leq \frac{q_m^2-q^2}{q^2}$. Получим

$$q^1q^2 \leq q_m^1q_m^2 - q_m^1q^2 - q^1q_m^2 + q^1q^2 \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1.$$

Причем из условия $\frac{q^1}{q_m^1-q^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2-q^2} \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$. Утверждение доказано.

Отметим также, что условие

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1$$

есть условие нахождения перекрестка в зоне блокировки АТС.

3. Оптимальный 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*

$$\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} = \frac{q^1/q_m^1}{q^2/q_m^2} = \frac{q^1q_m^2}{q_m^1q^2} \quad \text{при} \quad \frac{q^1}{q_m^1-q^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2-q^2}$$

$$\text{и} \quad \frac{T_{\text{зел}}^2}{T_{\text{зел}}^1} = \frac{q^2/q_m^2}{q^1/q_m^1} = \frac{q^2q_m^1}{q_m^2q^1} \quad \text{при} \quad \frac{q^2}{q_m^2-q^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1-q^1}$$

Доказательство.

Целью светофорного управления перекрестком является построение такого периодического режима работы светофора (времени горения красного и зеленого цветов), который 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 $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1$.

Вследствие этого оптимальным является режим, соотносящий величины $\frac{q^1}{q_m^1}$ и $\frac{q^2}{q_m^2}$ при выполнении условий (3). Покажем, что

$$\frac{q^1q_m^2}{q_m^1q^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1-q^1}, \frac{q_m^2-q^2}{q^2}\right].$$

Предположим

$$\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} > \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} \Longrightarrow q^1 q_m^1 q^2 > q_m^1 q^1 q_m^2 - (q^1)^2 q_m^2 \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1.$$

Но рассматривается случай неблокировки перекрестка $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1$, т.е. получено противоречие. Аналогично, если

$$\frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} > \frac{q_m^2 - q^2}{q^2} \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} > \frac{q_m^2 - q^2}{q_m^2} \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} > 1 - \frac{q^2}{q_m^2} \Longrightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1,$$

т.е. противоречие с условием утверждения. Утверждение доказано.

Запас устойчивости оптимального режима работы светофора

Пусть $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} < 1$, т.е. перекресток находится в зоне неблокировки. Определим такое $p > 1$, что $\left(\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}\right) p = 1$. Величина $p = 1/\left(\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}\right)$ показывает предельное значение потоков – $\widehat{q^1}, \widehat{q^2}$, не приводящее к блокировке перекрестка, где $\widehat{q^1} = q^1 p, \widehat{q^2} = q^2 p$. При этом допустимый прирост потоков по трассам перекрестка определяется равенствами

$$\Delta q^1 = \widehat{q^1} - q^1, \qquad \Delta q^2 = \widehat{q^2} - q^2.$$

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;

– $\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}\right]$, если $\frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$ и перекресток не блокирован – возможный интервал работы светофора;

– $\frac{T_{\text{зел}}^2}{T_{\text{зел}}^1} \in \left[\frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \frac{q_m^1 - q^1}{q^1}\right]$, если $\frac{q^2}{q_m^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1}$ и перекресток не блокирован – возможный интервал работы светофора.

4. Алгоритм определения основных характеристик перекрестка

1. Задать значения потоков по полутрассам трасс 1 и 2: q_1^1, q_2^1; q_1^2, q_2^2 и пропускных способностей по полутрассам каждой трассы: $q_{m,1}^1, q_{m,2}^1$; $q_{m,1}^2$, $q_{m,2}^2$.

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 переходим на 7).

6. Выдается значение B и фраза «Перекресток находится в зоне блокировки». Переходим на 9).

7. Определяется интервал возможных рабочих режимов работы светофора $\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1-q^1},\ \frac{q_m^2-q^2}{q^2}\right]$.

8. Определяется оптимальный режим работы светофора на перекрестке $\left(\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2}\right)_{opt} = \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2}$, если $\frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$ и $\left(\frac{T_{\text{зел}}^2}{T_{\text{зел}}^1}\right)_{opt} = \frac{q^2 q_m^1}{q_m^2 q^1}$, если $\frac{q^2}{q_m^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1}$.

9. Конец.

Рассмотрим поясняющий пример.

Пусть $q^1 = 20$, $q_m^1 = 40$; $q^2 = 18$, $q_m^2 = 45$

Проверим выполнение условия неблокировки перекрестка

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1 :$$

$$\frac{20}{40} + \frac{18}{45} = 0{,}5 + 0{,}4 = 0{,}9 < 1.$$

Определим возможный интервал рабочих режимов светофора.

Поскольку $\frac{q^1}{q_m^1} > \frac{q^2}{q_m^2}$ (т.к. 0,5 > 0,4), то интервал $\left[\frac{q^1}{q_m^1-q^1},\ \frac{q_m^2-q^2}{q^2}\right]$ таков:

$\left[\frac{20}{40-20},\ \frac{45-18}{18}\right] = [1;\ 1{,}5]$.

Итак, $\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} \in [1;\ 1{,}5]$. Любое из $\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2}$ горения зеленого цвета по трассам, входящее в этот интервал, не будет приводить к накоплению АТС у перекрестка.

Определим теперь оптимальный режим работы светофора:

$$\left(\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2}\right)_{opt} = \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} = \frac{0{,}5}{0{,}4} = 1{,}25.$$

Отметим, что оптимальный режим всегда находится в средней точке интервала возможных режимов работы светофора.

Таблица 1. *Таблица оптимальных режимов работы светофора при* $q_m^1 = 50\frac{\text{атс}}{\text{мин}}, q_m^2 = 40\frac{\text{атс}}{\text{мин}}$.

Table 1. *Table of optimal operating modes of traffic lights at* $q_m^1 = 50\frac{\text{атс}}{\text{мін}}, q_m^2 = 40\frac{\text{атс}}{\text{мін}}$.

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

В ячейках таблицы 1 даны доли времени горения зеленого цвета светофора по трассе 1 и трассе 2 перекрестка (в процентах) относительно общего времени горения зеленого цвета на перекрестке в целом.

В работе [5] приведена методика определения величины q_m перекрестка.

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.

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. *Гасникова А. В.* Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: МФТИ, 2010. С. 417.

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. *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

6. *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.

7. *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. Том 16. №. 6(70). С. 680–691.

8. *Новиков И. А., Шевцова А. Г., Кравченко А. А., Бурлуцкая А. Г.* Разработка методики адаптации модели регулируемого пересечения // Вестник СибАДИ. 2020. Том 17. № 6(76). С. 726–735.

9. *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.

10. *Долгушин Д. Ю., Мызников Т. А.* Имитационное моделирование автотранспортных потоков для оценки альтернативных схем организации дорожного движения в городских условиях // Вестник СибАДИ. 2011. № 2(20). С. 47–52.

11. *Гаряев Н. А., Шаталина В. А.* Оптимизация пропускной способности перекрестка на базе многовариантного имитационного моделирования // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 12. С. 26–29.

12. *Лихачев Д. В., Дорохин С. В., Артемов А. Ю.* Анализ основных методов, применяемых в зарубежных методиках расчета светофорного цикла // Материалы Национальной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки». Воронеж, 2022. С. 53–58.

13. *Минина Д. Н.* Моделирование в MATLAB движения автомашин на регулируемом перекрестке // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 2(67).

REFERENCES

1. Gasnikova A.V. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov* [Introduction to mathematical modeling of transport flows]. Moscow: MFTI, 2010. 417 p. (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. 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. *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)

6. Shets S.P., Spravtseva E.V., Kalmykov A.A. Application of simulation modeling in improving the organization of road traffic at the intersection of the city of Bryansk. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2017. No. 3(56). Pp. 67–72. (In Russian)

7. Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G. Basic principles for calculating a traffic light control program based on controlled networks and saturation flow. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2019. Vol. 16. No. 6(70). Pp. 680–691. (In Russian)

8. Novikov I.A., Shevtsova A.G., Kravchenko A.A., Burlutskaya A.G. Development of a methodology for adapting a model of controlled intersection. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2020. Vol. 17. No. 6(76). Pp. 726–735. (In Russian)

9. Kalinin I.N., Glukharev K.K. Study of the 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)

10. Dolgushin D.Yu., Myznikov T.A. Simulation modeling of vehicle flows for assessing alternative schemes for organizing road traffic in urban conditions. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2011. No. 2(20). Pp. 47–52. (In Russian)

11. Garyaev 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. (In Russian)

12. Likhachev D.V., Dorokhin S.V., Artemov A.Yu. Analysis of the main methods used in foreign methods for calculating the traffic light cycle. *Materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nyye voprosy i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki"* [Materials of the National Scientific and Practical Conference "Topical Issues and Prospects for the Development of Modern Science"]. Voronezh, 2022. Pp. 53–58. (In Russian)

13. Minina D.N. Modeling in MATLAB the movement of vehicles at a controlled intersection. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Polytechnic youth magazine]. 2022. No. 2(67). DOI: 10.18698/2541-8009-2022-2-774. (In Russian)

Информация об авторах

Кудаев Валерий Черимович, канд. ф.-м. 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;

vchkudaev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4199

Буздов Аслан Каральбиевич, канд. ф.-м. наук, ст. науч. сотр., Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

abuzdov@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9097-3348

Information about the authors

Kudaev Valery Cherimovich, Candidate of Physical and Mathematical 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;

vchkudaev@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4199

Buzdov Aslan Karalbievich, 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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.413.4 Научно-исследовательская статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-74-82
EDN: EYLUNJ

Тестирование программ и математическая модель поиска ошибок в программном комплексе

И. В. Кучумов

Компания «Яндекс», отдел разработок
119021, Россия, Москва, ул. Льва Толстого, 16

Аннотация. Тестирование программ актуально для аудита качества программы и его соответствия исходным спецификациям, требованиям надежности, функциональности, полноты комплекса и др. В последнее время актуален и учет соответствия программного продукта потребительским и рыночным условиям. Это требует новых подходов и методов, инструментов и технологий верификации и тестирования программ в реальном коде и реальном режиме эксплуатации. Цель работы – системный анализ тестирующих сред и моделирование процесса отладки, тестирования. С помощью общих системных методов (анализ-синтез, композиция-декомпозиция, моделирование и др.), математического моделирования получены следующие результаты: 1) проведен анализ целей, типов, методов тестирования; 2) проведена классификация методов; 3) при определенных исходных гипотезах относительно распределения ошибок в программном комплексе построена и исследована математическая модель оценивания количества ошибок (уязвимостей) в программной системе, их динамики с использованием аппарата класса обыкновенных дифференциальных уравнений «с насыщением». Предложены варианты развития постановок задач (гипотез), моделей, алгоритмов идентификации моделей для улучшения доказательности и охвата более широкого класса тестовых ситуаций. Результаты исследований можно использовать для практического аудита, управления процессом тестирования.

Ключевые слова: тестирование, надежность, анализ, программа, ошибки, математическая модель

Поступила 30.11.2023, одобрена после рецензирования 07.12.2023, принята к публикации 09.12.2023

Для цитирования. Кучумов И. В. Тестирование программ и математическая модель поиска ошибок в программном комплексе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 74–82. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-74-82

MSC: 68N30 Research article

Software testing and mathematical error finding model

I.V. Kuchumov

Yandex company, development department
119021, Russia, Moscow, 16 Lev Tolstoy street

Abstract. Program testing is important to audit the quality of the program and its compliance with the initial specifications, reliability requirements, functionality, fullness of the complex, etc. Recently taking into account the compliance of the software product with consumer and market conditions is also relevant. This requires new approaches and methods, tools and technologies for verifying and testing programs in real code and real operation mode. This work is devoted to system analysis of testing environments and modeling of the debugging and testing process. Using general system methods

© Кучумов И. В., 2023

(analysis-synthesis, composition-decomposition, modeling, etc.), mathematical modeling the following results were obtained: 1) an analysis of goals, types, testing methods was carried out; 2) classification of methods was carried out; 3) with certain initial hypotheses regarding the distribution of errors in the software system, a mathematical model for estimating the number of errors (vulnerabilities) in the software system, their dynamics using the apparatus of the class of ordinary differential equations "with saturation" was built and investigated. There are presented variants for development of problem statements (hypotheses), models, algorithms for identification of models for improvement of evidence and coverage of a wider class of test situations. Research results can be used for practical audit, control of the testing process.

***Keywords**:* testing, reliability, analysis, program, errors, mathematical model

Submitted 30.11.2023, approved after reviewing 07.12.2023, accepted for publication 09.12.2023

For citation. Kuchumov I.V. Software testing and mathematical error finding model. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 74–82. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-74-82

Введение

Процессы валидации программных комплексов необходимы для выяснения соответствия комплекса и отдельных его модулей спецификациям технического задания**.** Аппарат, подход и методология верификации или тестирования программ используются разнообразные.

Верификация – процесс проверки программы на соответствие заданным спецификациям, проверки кода до запуска, на первых этапах разработки кода [1]. Тестирование – процедура проверки работоспособности уже написанного кода в реальной среде, ее надежности [2] и функциональной полноты.

Конечная цель верификации и валидации – установление степени соответствия программы (ПО) своему назначению. Тестировщик не делает акцент на исходном коде, его заботит надежность программ [3], особенно предназначенных для применения в системах автоматизации.

Цели и задачи исследования

Цели исследования – системный анализ процесса верификации, тестирования программных комплексов и классификация используемых при этом подходов, а также решение проблемы оценки динамики изменений количества ошибок в программном комплексе. Для полной верификации, проверки соответствия программы проектным требованиям (функциональным, интерфейсным, инфологическим, вычислительным и экономическим) необходимы формализация и алгебраические подходы. Поэтому проблема сводима к «приземленной» задаче тестирования или проверке функциональности, результативности и устойчивости программ по разработанным заранее тестировщиком тестов или контрольным задачам с известными решениями. Активно применяются и эвристики.

Методы исследования

Применяются методы системного анализа и синтеза, математического моделирования и статистики, методы таксономии, классификации. Для исследования надежности и тестирования программ выделены ключевые признаки (характеристики):

1) безотказность в течение времени «наработки на отказ»;

2) восстанавливаемость, способность комплекса восстанавливать работоспособность после сбоев;

3) развиваемость ПО (модулей, структур, интерфейса, управления);

4) параметризуемость, возможность реализации различных сценариев и режимов использования ПО лишь с помощью параметров.

Универсальных критериев оценки надежности программ нет, хотя такие оценки необходимы чаще априори и для прогноза. Пользуются часто эмпирическими (полуэмпирическими) моделями, эвристиками, экспертными процедурами идентификации важности и приоритетности различных факторов надежности. Например, для антивирусных пакетов применяют такие факторы (критерии), как «обновляемость», «срок лицензии» и др.

Результаты исследований

1. Системный анализ и классификация методов тестирования ПО

При тестировании используются:

1) модульный подход, тестирование отдельных модулей или классов функциональных объектов;

2) компонентный подход с тестированием модулей, объединенных для создания компонентов, подсистем ПО единым интерфейсом;

3) тестирование полностью интегрированного варианта, тестирование взаимодействий (инфологических связей) компонентов.

Тестирование проводится в ручном или автоматизированном режиме.

Есть и комбинаторные методы тестирования для охвата всевозможных взаимодействий, связей входных параметров, в частности, попарное или двухстороннее тестирование [4]. Используется часто и регрессионное тестирование с повторным запуском тестов.

Автоматизация тестирования позволяет:

1) минимизировать дублирование ситуаций тестового набора;

2) минимизировать время тестирования;

3) применять тестовые сценарии для различных ситуаций и программ;

4) оперативно модифицировать и расширить функций ПО;

5) реализовать «самотестирование» (тестирование программистом) и др.

Устойчивое решение с помощью программ целевых задач должно быть для пользователя достаточно интерактивным и комфортным, а его уязвимость для перехвата управления и иных рисков должна быть мала. Используют два принципиальных метода: теоретический, верифицирующий, доказательный и практический, на тестах.

Часто проводят «слабо» формальный подход к верификации – с использованием специфики верифицируемого объекта [5] или динамических статистических рядов [6].

Тестирование бывает функционально ориентированное и нефункциональное. Ключевая цель функционального тестирования – проверка соответствия ПО заявленным в ТЗ функциональным спецификациям, т.е. проверка выполнимости всех функций ПО, прямо или даже косвенно акцентированных в ТЗ. Функциональное тестирование базируется на методике, документе испытаний функционала (подробных сценариях реальных действий пользователя) ПО [7]. Программа и методика испытаний имитирует эксплуатацию продукта в реальном времени.

Нефункциональное тестирование ориентировано на оценку качества ПО, например, оценку времени, памяти или эргономики. Проверяется соответствие ПО нефункциональным сценариям и требованиям**,** например, совместимости, кросс-платформенности, единству интерфейса и др.

Экстремальное программирование, Scrum и другие методологии позволяют активно и полно вести аудит и анализ качества программы с помощью тестирования. С помощью сопряженного и массового программирования распространяются компетенции.

Тестирование интерфейсного и навигационного комфорта является также важным критерием надежности. Чем шире аудитория, тем внимательнее к пожеланиям пользователей программный продукт.

Конфигурационное тестирование приложения (для веб-приложения – тестирование кросс-платформенности) обеспечивает его работоспособность на различных платформах. Для конфигурационного тестирования нужно больше вычислительных ресурсов. При сложной архитектуре ПО используют интеграционное («сквозное») тестирование, но лишь после компонентного тестирования с использованием его результатов.

Тестирование безопасности выявляет уязвимости, риск-ситуации и возможный ущерб от действий злоумышленников при получении управления, доступа к данным. Объемное тестирование позволяет экспериментировать с предельными объемами обрабатываемой информации или с усилением контроля использования памяти [8].

Для каждого параметра (фактора) качества ПО применяют нагрузочное тестирование или проверку реагирования на внешние реакции, воздействия среды. Часто проверяется работа в экстремальных ситуациях – с ограничением аппаратных и архитектурных ресурсов или при максимальной нагрузке (стрессовое тестирование в диапазоне предельных возможностей) функционирования ПО. Здесь важно проверять устойчивость, надежность, способность ПО к самовосстановлению.

2. Моделирование поиска и оценки количества ошибок в программном комплексе

Для тестировщика, как и для программиста, важно знать динамические оценки количества ошибок в программе (потенциальных или оставшихся, текущих). Важно уметь сокращать время поиска латентных ошибок [9].

Многие модели надежности базируются на вероятностных гипотезах и законах распределения. Например, классическая модель Джелински – Моранда строится на гипотезах, согласно которым количество ошибок между последовательными моментами их обнаружения не меняется, они распределены в программе равновероятно и независимо.

Рассмотрим формализацию задачи поиска ошибок в программе (программном комплексе).

Пусть $u(x,t)$ – количество ошибок, выявленных в программном продукте к моменту времени t с участием x тестировщиков. Тогда можно записать следующую модель тестирования (класса систем «с насыщением»):

$$u_t(x,t) + u_x(x,t) = k\big(u_{max} - u(x,t)\big),$$

где k – коэффициент интенсивности поиска ошибок, u_{max} – максимальное количество ошибок в программном комплексе, которое заранее обычно неизвестно и подлежит идентификации или экспертной оценке, u_t, u_x – составляющие темпа поиска ошибок, количества ошибок, обнаруживаемых в единицу времени одним тестировщиком по времени и по количеству участвующих тестировщиков.

Задаются начальное и граничное условия:

$$u(x,0) = u_0(x), \qquad u(0,t) = u_1(t),$$
$$u(0,t) = u_1(t), \qquad u_0(0) = u_1(0),$$
$$0 \le x \le X, \qquad 0 \le t \le T.$$

В силу непрерывности $u(x,t)$ получаем $u_{max} = u(x_0, t_0)$, $(x_0; t_0) \in [0; X] \times [0; T]$.

Аналогично модели Джелински – Моранда функцию риска наличия ошибок можно задать в форме:

$$R(x,t) = k\big(u_{max} - u(x,t)\big),$$

$$R_{ij} = R(x_i, t_j) = k(u_{max} - u_{ij}), \qquad u_{ij} = u(x_i, t_j),$$

где k – экспертным или экспериментальным способом задаваемый параметр (масштабирующий параметр).

Рассмотрим для простоты логики рассуждений случай с одним тестировщиком: $m = 1$, $p = p(t)$, $u = u(t)$. Можно считать, что плотность вероятности отказа программного комплекса из-за наличия ошибок определяется по экспоненциальному закону:

$$p(x,t) = k(u_{max} - u(x,t))e^{-k(u_{max}-u(x,t))t}.$$

Учитывая плотность вероятности отказа ПО, функцию правдоподобия метода максимального правдоподобия или наименьших модулей (см., например, [10]) можно записать в следующем виде:

$$L = \prod_{i=1}^{n} p(t_i).$$

Или, логарифмируя с учетом $u_{max} \neq u_i$, $i = 1,2,\dots,n$, запишем функцию:

$$L = \sum_{i=1}^{n} ln(k(u_{max} - u_i)e^{-k(u_{max}-u_i)t_i} =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} (ln(k(u_{max} - u_i)) - k(u_{max} - u_i)t_i).$$

Максимум этой функции ищем из системы уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial u_{max}} = 0, \\ \dfrac{\partial L}{\partial k} = 0. \end{cases}$$

Вычисляя соответствующие выражения для производных, запишем систему соотношений вида:

$$\begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u_{max} - u_i} - k\sum_{i=1}^{n} t_i = 0, \\ \dfrac{n}{k} - u_{max}\displaystyle\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{n} u_i t_i = 0. \end{cases}$$

Если ввести обозначение

$$\sum_{i=1}^{n} t_i = L,$$

то систему можно представить в виде:

$$\begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u_{max} - u_i} - kC = 0, \\ u_{max}C - \dfrac{n}{k} = \displaystyle\sum_{i=1}^{n} u_i t_i. \end{cases}$$

Из первого уравнения находим параметр

$$k = \frac{1}{C}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{u_{max} - u_i}.$$

Из второго уравнения после подстановки найденного выражения k получаем выражение:

$$u_{max}C - \frac{nC}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{u_{max} - u_i}} = \sum_{i=1}^{n} u_i t_i$$

или

$$u_{max}C\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{u_{max} - u_i} - \sum_{i=1}^{n} u_i t_i \cdot \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{u_{max} - u_i} = nC.$$

Если обозначить

$$\varphi(u_{max}) = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{u_{max} - u_i},$$

то можно записать:

$$Cu_{max}\varphi(u_{max}) - \varphi(u_{max})\sum_{i=1}^{n} u_i t_i = nC.$$

Для этого трансцендентного уравнения можно применить метод итераций согласно нижеприведенной схеме:

$$u_{max}^{(n)} = \psi\left(u_{max}^{(n-1)}\right),\ \ n = 0,1,\dots;\ \ u_{max}^{(0)} = \alpha,\ \ 0 < \alpha < 1,$$

где

$$\psi(u_{max}) = \frac{1}{C}\left(\frac{nC}{\varphi(u_{max})} - \sum_{i=1}^{n} u_i t_i\right) =$$

$$= \frac{n}{\varphi(u_{max})} - \frac{1}{C}\sum_{i=1}^{n} u_i t_i\,.$$

Отметим, что решение u_{max} ищется целочисленное, поэтому при итерировании следует брать целочисленные значения $[u_{max}^{(n)}]$, т.е. значения функции антье от $u_{max}^{(n)}$.

Обсуждение

Предложенная модель и проведенный анализ позволяют реализовать ситуационное моделирование процесса тестирования, в частности, эксперимент нижеследующего типа.

По значениям $u_i(x_i)$ или величинам текущих ошибок в программе нужно идентифицировать максимальный объем оставшихся ошибок x_{imax}, $i = 1, 2, \dots, n$. Эта величина позволит настроить процесс тестирования по привлекаемым ресурсам, например, количеству тестировщиков. Например, для простоты возьмем случай одного тестировщика $u(x,t) = u(t)$. Благодаря непрерывности $u(t)$ найдем $u_{max} = u(t_{max}),\ t_{max} \in [t_0; T]$. Модель тестирования примет вид:

$$u'(t) = k\big(u_{max} - u(t)\big),$$

и его решение имеет вид:

$$u(t) = u_0 e^{-kt} + u_{max}(1 - e^{-kt}).$$

Подставляя $t = t_{max}$ получим:

$$u_{max} = u_0 e^{-kt_{max}} + u_{max}(1 - e^{-kt_{max}}).$$

Очевидное единственное решение – стационарное: $u_{max} = u_0$.

Отметим, что проведенное исследование можно развивать. В частности, интересно рассмотреть случай, когда в промежутке последовательных ошибок $[t_{i-1}; t_i], i = 2, \dots, n$ изменяется еще и параметр k, т.е. исследовать уравнение вида:

$$u_t(x,t) + u_x(x,t) = k(t)\big(u_{max} - u(x,t)\big).$$

Модель можно улучшать (математически, формально), усложняя гипотезы и совершенствуя идентификационный алгоритм.

Заключение

Тестирование, используя минимально достаточный тестовый набор, позволяет охватывать всевозможные ветви логики алгоритма, различные классы входных параметров, которые выделяются эмпирически или эвристически. Все значения, комбинации, естественно, невозможно охватить. Искусство тестировщика заключается в минимизации риска оставить какой-то класс и даже подкласс без внимания. Современные методы тестирования (попарное, экстремальное и др.) позволяют это реализовать. Тестирование проводится непрерывно, динамически может усложняться, поэтому моделирование и прогнозирование позволит облегчить этот сложный, но творческий процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мерзлякова Е. Ю., Янченко Е. В.* Обзор методов верификации и оценки качества программного обеспечения // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17. № 1. С. 92–106. DOI: 10.55648/1998-6920-2023-17-1-92-106

2. *Поначугин А. В.* Определение надежности программного обеспечения в структуре современной информационной системы // Кибернетика и программирование. 2019. № 2. С. 65–72. DOI:10.25136/2306-4196.2019.2.20341

3. *Лаврищева Е. М., Зеленов С. В., Пакулин Н. В.* Методы оценки надежности программных и технических систем // Труды ИСП РАН. 2019. Т. 31. № 5. С. 95–108. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(5)-7

4. *Шевчук В. И.* Попарное тестирование программного обеспечения // Universum: технические науки. 2023. № 7(112). DOI: 10.32743/UniTech.2023.112.7.15767

5. *Кашкевич А. М., Баданина Ю. В., Филимонов А. С., Долгих А. И.* Верификация программных комплексов на примере статически определимой призматической балки // Известия ВУЗов (сер. «Машиностроение»). 2023. № 5. С. 29–36. DOI:10.18698/0536-1044-2023-5-29-36

6. *Радионова Ю. А., Савкин А. Л.* Построение модели прогноза пиковых нагрузок рабочего процесса на основе анализа временного ряда // Автоматизация процессов управления. 2020. № 2(60). С. 53–60. DOI: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-53-61

7. *Максимов М. И., Горина Е. А.* Agile-методология как драйвер эффективной корпоративной культуры // Региональная и отраслевая экономика. 2023. № 1. С. 102–111. DOI:10.47576/2949-1916_2023_1_102

8. *Самарин Н. Н.* Модель безопасного функционирования программного обеспечения, формализующая контроль использования памяти и обращений к ней процессора // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 68–79. DOI:10.36724/2409-5419-2021-13-1-68-79

9. *Шакирова А. И., Хасьянов А. Ф., Даутов Э. Ф.* Сокращение времени тестирования программного обеспечения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 7. С. 104–109.

10. *Горяинов В. Б., Горяинова Е. Р.* Сравнение оценок максимального правдоподобия и наименьших модулей параметров процесса авторегрессии со случайными коэффициентами // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана (сер. «Естественные науки»). 2015. № 3. С. 20–30.

REFERENCES

1. Merzlyakova E.Yu., Yanchenko E.V. Review of verification methods and software quality assessment. *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI]. 2023. Vol. 17. No. 1. Pp. 92–106. DOI:10.55648/1998-6920-2023-17-1-92-106. (In Russian)

2. Ponachugin A.V. Software update in the structure of the modern information system. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming]. 2019. № 2. Pp. 65–72. DOI:10.25136/2306-4196.2019.2.203413. (In Russian)

3. Lavrishcheva E.M., Zelenov S.V., Pakulin N.V. Methods for assessing the reliability of software and technical systems. *Trudy ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS]. 2019. Vol. 31. No. 5. Pp. 95–108. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(5)-7. (In Russian)

4. Shevchuk V.I. Pairwise testing of software. *Universum: tekhnicheskiye nauki* [Universum: Technical sciences]. 2023. No. 7(112). DOI: 10.32743/UniTech.2023.112.7.15767. (In Russian)

5. Kashkevich A.M., Badanina Yu.V., Filimonov A.S., Dolgikh A.I. Verification of software systems using the example of a statically determinate prismatic beam. *Izvestiya VUZov (ser. "Mashinostroyeniye")* [Higher education institutions news ("Mechanical Engineering")]. 2023. No. 5. Pp. 29–36. DOI:10.18698/0536-1044-2023-5-29-36. (In Russian)

6. Radionova Yu.A., Savkin A.L. Construction of a model for forecasting peak loads of a working process based on time series analysis. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of control processes]. 2020. No. 2(60). Pp. 53–60. DOI: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-53-61. (In Russian)

7. Maksimov M.I., Gorina E.A. Agile methodology as a driver of effective corporate culture. *Regional'naya i otraslevaya ekonomika* [Regional and industrial economics]. 2023. No. 1. Pp. 102–111. DOI:10.47576/2949-1916_2023_1_102. (In Russian)

8. Samarin N.N. A model for the safe functioning of software that formalizes control of memory use and processor access to it. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [Science-intensive technologies in space research of the Earth]. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 68–79. DOI:10.36724/2409-5419-2021-13-1-68-79. (In Russian)

9. Shakirova A.I., Khasyanov A.F., Dautov E.F. Reducing the time of software testing. *Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii* [Modern science-intensive technologies]. 2019. No. 7. Pp. 104–109. (In Russian)

10. Goryainov V.B., Goryainova E.R. Comparison of maximum likelihood estimates and least modules of autoregression process parameters with random coefficients. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana (ser. "Yestestvennyye nauki")* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University (ser. "Natural Sciences")]. 2015. No. 3. Pp. 20–30. (In Russian)

Информация об авторе

Кучумов Илья Вадимович, руководитель отдела разработки, компания «Яндекс»;
119021, Россия, Москва, ул. Льва Толстого, 16;
kuchumov.ilya@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6470-5587

Information about the author

Kuchumov Ilya Vadimovich, Head of the Development Department, Yandex company;
119021, Russia, Moscow, 16 Lev Tolstoy street;
kuchumov.ilya@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6470-5587

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 519.642.2 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-83-94
EDN: FGNFBC

Восстановление порядка дробной производной в задаче математического моделирования накопления радона в избыточном объеме накопительной камеры по данным Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона*

Д. А. Твёрдый

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн
Дальневосточного отделения Российской академии наук
684034, Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

Аннотация. Исследуются вопросы, связанные с нелинейным переносом радиоактивного газа радона через геосреду, в частности, при описании вариаций объемной активности (RVA) в накопительной камере с датчиками регистрации. RVA считается информативным и оперативным предвестником землетрясений. Исходя из предположения о том, что процесс переноса радона происходит в проницаемой геосреде, для моделирования используется эредитарная модель RVA на основе уравнения Риккати с дробной производной Герасимова–Капуто. Модель ранее прошла апробацию на геодинамическом полигоне в Петропавловске-Камчатском. В исследовании наибольший интерес представляет идентификация значения порядка дробной производной, которое связывается с такими характеристиками геосреды, как пористость и проницаемость. Однако у нас нет информации о некоторых параметрах рассматриваемого процесса, чтобы достаточно точно определить это значение. Но мы знаем дополнительную информацию, полученную в результате эксперимента. Эту информацию можно использовать для восстановления интересующих нас значений, что приводит нас к обратным задачам. Для восстановления порядка дробной производной решается задача одномерной оптимизации с помощью итерационного метода Левенберга–Марквардта ньютоновского типа. Показано, что с помощью данного метода можно восстанавливать некоторые параметры такой динамической системы, как перенос радона через геосреду. Показано, что решение обратной задачи методом Левенберга–Марквардта дает более точный результат за более короткое время, чем подбор значений параметров и видов функций для модельных уравнений вручную.

Ключевые слова: математическое моделирование, дробная производная Герасимова–Капуто, обратные задачи, метод Левенберга–Марквардта, напряженно-деформированное состояние, геосреда, объемная активность радона, RVA, предвестники землетрясений

Поступила 23.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023, принята к публикации 01.12.2023

Для цитирования. Твёрдый Д. А. Восстановление порядка дробной производной в задаче математического моделирования накопления радона в избыточном объеме накопительной камеры по данным Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 83–94. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-83-94

© Твёрдый Д. А., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-71-01050, https://rscf.ru/ project/23-71-01050/

MSC: 26A33 Original article

Restoration of the order of fractional derivative in the problem of mathematical modelling of radon accumulation in the excess volume of the storage chamber based on the data of Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon*

D.A. Tverdyi

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
684034, Russia, Kamchatka, Elizovsky district, Paratunka village, 7 Mirnaya street

Abstract. The paper researches the issues related to the nonlinear transport of radon gas through the geosphere, in particular, when describing the variation of volumetric activity (RVA) in an accumulation chamber with recording sensors. RVA is considered to be an informative and operational precursor to earthquakes. Based on the assumption that the radon transport process takes place in a permeable geosphere, an ereditary RVA model based on the Riccati equation with fractional Gerasimov–Kaputo derivative is used for modelling. The model has been previously validated at the geodynamic test site in Petropavlovsk-Kamchatsky. In the study the identification of the order value of the fractional derivative, which is associated with such geo-environmental characteristics as porosity and permeability is of most interest. However, we do not have information about some parameters of the process under consideration to determine this value accurately enough. But we know additional information obtained from the experiment. This information can be used to reconstruct the values of interest. Which leads us to the inverse problems. To reconstruct the order of the fractional derivative, we solve the one-dimensional optimisation problem using the iterative Levenberg–Marquardt method of Newtonian type. It is shown that this method can be used to reconstruct some parameters of such a dynamic system as radon transport through geo-environment. It is shown that the solution of the inverse problem by the Levenberg–Marquardt method gives a more accurate result in a shorter time than the manual selection of parameter values and types of functions for the model equations.

Keywords: mathematical modelling, Gerasimov–Kaputo fractional derivative, inverse problems, Levenberg–Marquardt method, stress-strain state, geo-environment, volumetric radon activity, RVA, earthquake precursors

Submitted 23.11.2023, approved after reviewing 29.11.2023, accepted for publication 01.12.2023

For citation. Tverdyi D.A. Restoration of the order of fractional derivative in the problem of mathematical modelling of radon accumulation in the excess volume of the storage chamber based on the data of Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 83–94. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-83-94

Введение

Решение обратных задач – важный и хорошо изученный класс математических задач, находящих свое прикладное применение в самых разных областях науки и техники [1]. Это связано с тем, что мы можем не знать о некоторых параметрах рассматриваемого процесса. Однако мы знаем дополнительную информацию, полученную в результате эксперимента. Эту информацию можно использовать для восстановления значений интересующих нас параметров процесса с помощью математического моделирования.

Радон – радиоактивный газ с периодом полураспада $T = 3{,}85$, продукт радиоактивного металла радия ^{226}Ra, который постоянно содержится в земной коре. Как следствие возникло целое направление, называемое радоновым мониторингом, в рамках эманационного

* The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-71-01050, https://rscf.ru/project/ 23-71-01050/

мониторинга геосред и процессов [2]. В ходе этих наблюдений ведется непрерывная регистрация ^{222}Rn в накопительных камерах с помощью газоразрядных счетчиков. Данные, полученные таким образом, описывают объемную активность радона (RVA) в виде временных рядов. В свою очередь RVA считается информативным, хорошо себя зарекомендовавшим и оперативным предвестником сейсмических событий (землетрясений) [3, 4].

Непрерывный мониторинг вариаций RVA – одна из методик исследования напряженно-деформированного состояния геосреды [5] Однако при поиске предвестников землетрясений, связанных с RVA, возникает проблема. В области установки датчиков регистрации ^{222}Rn одновременно наблюдается множество факторов, влияющих на RVA. Основная сложность – определить фактор, связанный именно с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды.

В статье рассмотрены некоторые вопросы, связанные с нелинейным процессом миграции ^{222}Rn в геосреду. В частности, при помощи методов математического моделирования приводятся описания вариаций RVA накопительного характера. Для чего с помощью итерационного метода Левенберга–Марквардта [6] формулируется и решается обратная задача на основе эредитарной α-модели RVA [7], ранее предложенной автором. Цель решения обратной задачи в том, чтобы методом одномерной оптимизации восстановить значения параметра модельного уравнения, которое предположительно обобщенно отражает изменения в напряженно-деформированном состоянии геосреды [7, 8], которое в свою очередь прямо влияет на интенсивность RVA, наблюдаемую в экспериментальных данных.

1. О моделировании динамики RVA

Для описания механизмов миграции ^{222}Rn разработано множество математических моделей, в том числе эманационный метод [2]. В его рамках рассматривается миграция в подземных водах, в пористых или трещиноватых геологических средах. Как пример можно привести модель на основе физико-химических представлений [9]. Основой таких моделей является применение ODE либо PDE целочисленных порядков с соответствующими начальными и краевыми условиями [10]. Исследуя процесс накопления радона в накопительной камере в ходе его миграции сквозь среду к поверхности, будем отталкиваться от хорошо изученной классической модели [11, 12] следующего вида:

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\lambda_0 A(t) + S^{\Delta}, \tag{1}$$

где $A(t) \in C^1[0,T]$ – RVA, Бек/м^3; $t \in [0,T]$ – текущее время моделирования; $T > 0$ – общее время моделирования; λ_0 – кратность воздухообмена (AER), c^{-1}.

Но в рамках данного исследования нас интересуют модели переноса радона, в основе которых лежат механические представления. Это модели, которые учитывают изменение вертикальной скорости газового потока под действием тектонических напряжений [13], что в свою очередь может приводить к изменениям проницаемости и пористости геосреды, в которой происходит процесс переноса (миграция) радона. Здесь пористость среды обусловлена наличием изолированных пор, а проницаемость среды понимается как наличие каналов, проводящих газ между порами. Пористость среды может приводить к замедлению процесса переноса газа, т.е. субдиффузии, а проницаемость среды, наоборот, к ускорению, т.е. супердиффузии. Данные процессы относятся к явлениям аномальной диффузии [14]. Классической ODE модели RVA (1) будет недостаточно для описания таких особенностей среды.

2. Модель RVA на основе дробно-дифференциального исчисления

Аномальную диффузию можно описать, обратившись к хорошо развитому математическому аппарату интегро-дифференциального исчисления [15–17]. Это связывает интересующие нас характеристики проницаемости геосреды с понятием эредитарности (наследственности или памяти) – свойства системы или среды помнить некоторое время оказанное на нее воздействие [18]. Так как к образованию структур, замедляющих или ускоряющих процесс переноса газа ^{222}Rn в геосреде, должны приводить процессы изменения напряжения и деформаций геосреды – процессы, протекающие не мгновенно и влияющие на другие процессы в геосреде некоторое время после события. Исходя из предположения о том, что перенос ^{222}Rn происходит в среде, подверженной таким процессам, в работе [7] проведено обобщение классической модели RVA (1) до эредитарной α-модели RVA.

Как правило, процессы вариаций RVA имеют характер накопительного процесса, а значит, подчиняются логистическому закону. Поэтому в качестве модельного уравнения используется уравнение Риккати [DA_Solid_2022_Investigation_of_Finite_42]. Учитывая все вышесказанное, модель представляется задачей Коши вида:

$$\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\int_0^t \frac{\dot{A}(\sigma)}{(t-\sigma)^{\alpha}}d\sigma = -a(t)A(t)^2 - \lambda_0 A(t) + S^{\Delta}, \quad A(0) = A_0, \tag{2}$$

где $\Gamma(.)$ – гамма-функция Эйлера; A_0 – константа, определяющая значение RVA в момент времени $t = 0$; λ_0 – кратность воздухообмена (AER), c^{-1}; S^{Δ} – константа, отвечающая за диффузионный механизм переноса, Бек/м$^3 c$; $a(t)$ – коэффициент при квадратичном компоненте, полагается, что этот компонент отвечает за сток ^{222}Rn из камеры за счет атмосферного давления; α – порядок дробной производной, отвечающий за интенсивность процесса переноса ^{222}Rn вследствие эффекта памяти [7].

В работе [7] показано, что (2) может описывать как процессы роста, так и спада RVA в накопительных камерах в зависимости от значений и видов функций, входящих в модельное уравнение. Верифицируем обе описанные модели (1) и (2), для чего используем экспериментальные данные по вариациям RVA. Данные из рисунка 1 получены в пункте YSSR на полуострове Сахалин. Регистрация RVA проводилась в течение 160 часов в накопительной камере на глубине 2 м с шагом в 30 мин.

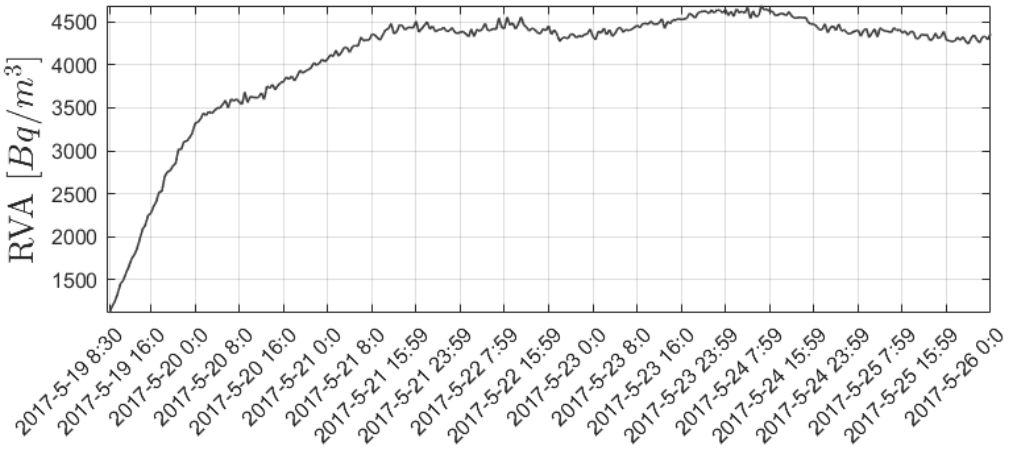


Рис. 1. *Данные по β-излучению, сопровождающему радиоактивный распад ^{222}Rn, характеризующие вариации RVA*

Fig. 1. *Data on β-radiation accompanying radioactive decay of ^{222}Rn, that characterize variations of RVA*

На рисунке 2 приведены результаты моделирования процесса накопления ^{222}Rn по моделями (2) и (1) с параметрами вида:

$$N = 320, \quad T = 320, \quad \lambda_0 = 0{,}025, \quad A_0 = 0{,}239, \quad a(t) = 0, \quad S^{\Delta} = \lambda_0. \qquad (3)$$

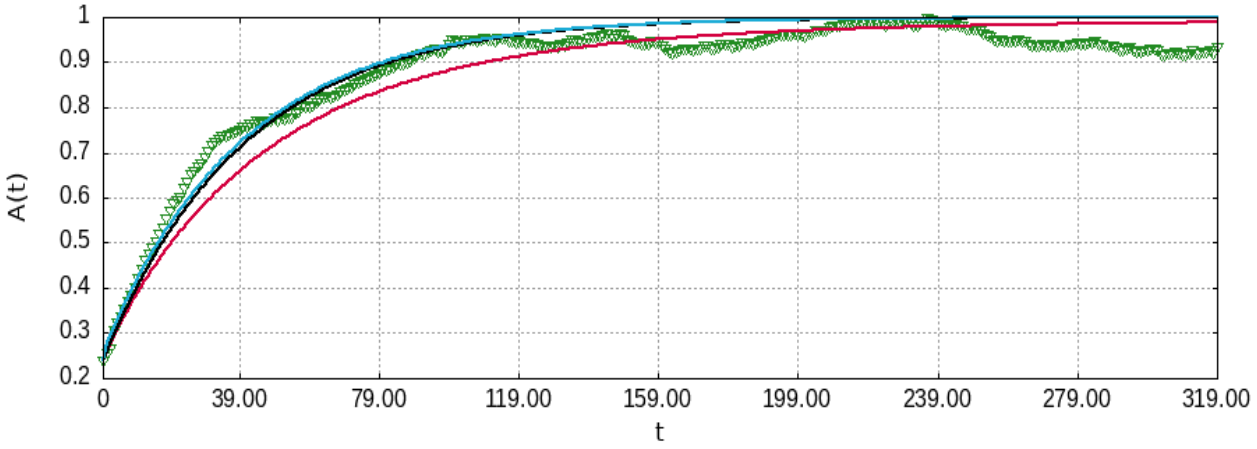


Рис. 2. *Модельные кривые по моделям (2) и (1) при различных параметрах*

Fig. 2. *Model curves by models (2) and (1) at different parameters*

На рисунке 2 представлены:

зеленым – обработанные экспериментальные данные по вариациям RVA с пункта YSSR, для чего было проведено сглаживание методом Simple Moving Average и нормировка на максимум;

красным – модельная кривая по (2) с параметрами (3), где $\alpha = 0{,}95$с коэффициентами подобия: детерминации ($R^2 = 0{,}9$) и корреляции ($corr = 0{,}97$);

черным – модельная кривая по (2) с параметрами (3), где $\alpha = 1$, здесь $R^2 = 0{,}926$, $corr = 0{,}984$;

бирюзовым – модельная кривая по (1) классической модели с теми же параметрами, здесь $R^2 = 0{,}929$, $corr = 0{,}985$.

Значение параметра AER среды $\lambda_0 = 0{,}025$ уточняется перебором за счет решения (1) классической модели до достижения высоких значений детерминации (R^2) и корреляции ($corr$) с обработанными данными.

Как показано на рисунке 2, в случае $\alpha = 1$ модельные кривые по эредитарной (2) и классической (1) моделям практически совпадают. Это подтверждает корректность обобщения до эредитарной α–модели RVA.

Далее модель (2) прошла апробацию на пунктах мониторинга ^{222}Rn на геодинамическом полигоне в Петропавловске-Камчатском. Данные (рис. 3), используемые при моделировании, получены в пункте GLLR, расположенном в районе Паратункой гидротермальной системы. Регистрация RVA проводилась 22 часа в накопительной камере на глубине 1 м с шагом 2 мин.

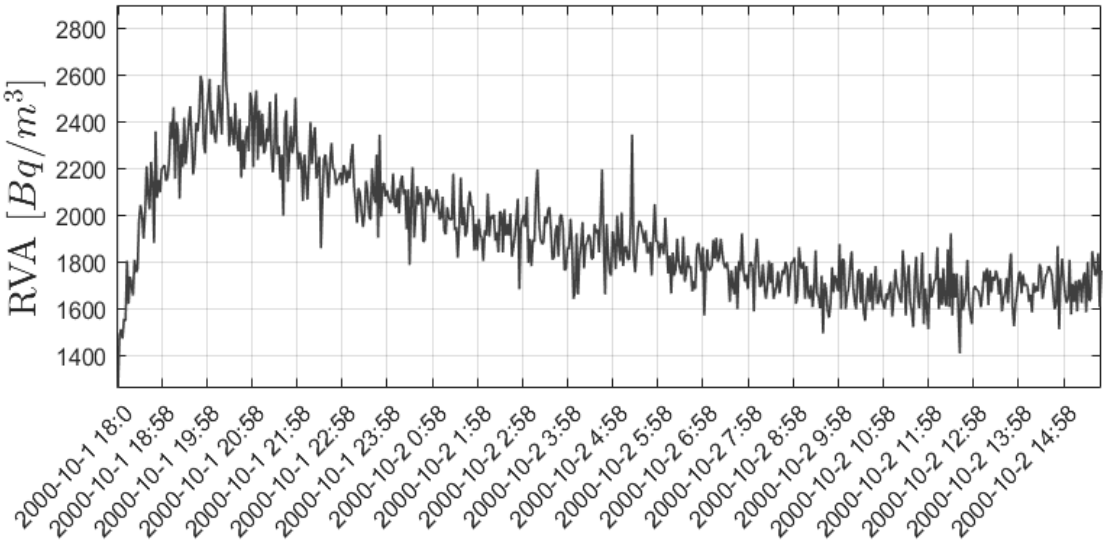


Рис. 3. *Данные по β-излучению, сопровождающему радиоактивный распад ^{222}Rn, характеризующие вариации RVA*

Fig. 3. *Data on β-radiation accompanying radioactive decay of ^{222}Rn, that characterize variations of RVA*

На рисунке 4 приведены результаты моделирования процесса накопления ^{222}Rn, где $\alpha = 0{,}65$, а остальные параметры модели (2) имеют вид:

$$N = 657,\ T = 657,\ \lambda_0 = 0{,}2,\ A_0 = 0{,}478,\ a(t) = \lambda_0\, sin\left(\frac{3\pi}{5}\frac{t}{T}\right)^2,\ S^{\Delta} = \lambda_0. \qquad (4)$$

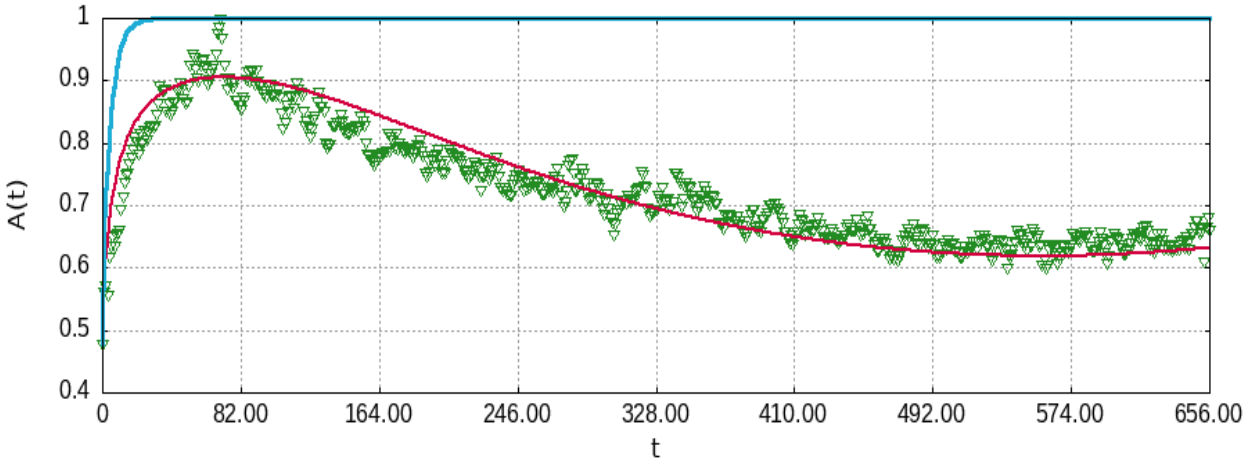


Рис. 4. *Модельные кривые по моделями (2) и (1) при различных параметрах*

Fig. 4. *Model curves by models (2) and (1) at different parameters*

На рисунке 4 представлены:

зеленым – обработанные экспериментальные данные с пункта GLLR;

красным – модельная кривая (2) с параметрами (4), подбираемыми вручную ($R^2 = 0{,}86,\ corr = 0{,}95$);

бирюзовым – кривая по (1) классической модели с (4) параметрами ($R^2 = -0{,}8$, $corr = 0{,}2$).

3. Постановка обратной задачи

В исследовании наибольший интерес представляет идентификация значения $0<\alpha<1$ порядка дробной производной. Однако значение всех параметров и видов функций определяется вручную, до достижения высоких значений коэффициентов детерминации и корреляции с данными, что приводит к большим временным затратам. Это приводит нас к обратным задачам [1]. Запишем задачу Коши (2) в виде обратной задачи на компоненты вектора $\vec{X}$:

$$\partial_{0t}^{\alpha(\vec{X})}A(\sigma)=F(A(t),t),\quad A(0)=A_0, \tag{5}$$

где $\partial_{0t}^{\alpha(\vec{X})}A(\sigma)=\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\int_0^t\frac{\dot{A}(\sigma)}{(t-\sigma)^{\alpha}}d\sigma$ – дробная производная Герасимова–Капуто [19, 20]; $F(A(t),t)=-a(t)A(t)^2-\lambda_0A(t)+S^{\Delta}$ – функция, отвечающая за различные механизмы изменения уровня ^{222}Rn в камере, и в общем случае она может быть нелинейной; $\vec{X}=\left[X_0...X_{K-1}\right]$ – компоненты вектора, определяющие функцию $\alpha(t)$.

Функция $\alpha(\vec{X})$ неизвестна, нужно восстановить компоненты вектора $X_0...X_{K-1}$ по известной дополнительной информации, т.е. экспериментальным данным. Т.к. α – константа для всех $t\in[0,T]$, то $k=1$, а значит $\alpha(\vec{X})=\alpha\left(\left[X_0\right]\right)=\alpha$. Что определяет (5) как задачу одномерной оптимизации на параметр α.

Полученная задача одномерной оптимизации решается с помощью итерационного метода Левенберга – Марквардта Ньютоновского типа [6].

4. Алгоритм метода Левенберга–Марквардта

Алгоритм решения задачи (5) основан на многократном решении прямой задачи Коши (2) с помощью неявной конечно-разностной схемы (IFDS), предложенной в работе [DA_Solid_2022_Investigation_of_Finite_42], и реализован на языке программирования C. Алгоритм IFDS решения прямой задачи реализован на языке C в виде параллельного эффективного алгоритма для GPU. Опишем поэтапно цикл алгоритма:

1. Задаем на $n=0$ шаге:

a. Вектор обратной задачи $A=A\left(t_i\right)=\left[\varphi_i\right]=\vec{\varphi}$, где $i=0,..,M-1$, M – число наблюдений, φ_i – дополнительная информация, $N=M$ – число узлов вычислительной сетки;

b. Начальное приближение $\overrightarrow{X^{(0)}}$ для компонент $\vec{X}$;

c. Параметр регуляризации $\gamma^{(0)}=\nu\cdot\max_i\left(b_{ii}^{(0)}\right)$ – главная диагональ матрицы $B^{(0)}=J\left(\overrightarrow{X^{(0)}}\right)^TJ\left(\overrightarrow{X^{(0)}}\right)$, где $J(\cdot)$ – матрица Якоби, ν – заданная константа.

2. Вычисляем на $n=0$ шаге $s_0=\Psi\left(\overrightarrow{X^{(0)}}\right)$ – начальное значение функционала невязки:

a. Решаем прямую задачу (2) численно относительно начального приближения $\alpha\left(\overrightarrow{X^{(0)}}\right)$, получаем вектор начального решения $\overrightarrow{A^{(0)}}=A\left(\overrightarrow{X^{(0)}}\right)$;

b. Формируем вектор невязки $\overrightarrow{\eta^{(0)}}=\eta\left(\overrightarrow{X^{(0)}}\right)=\vec{\varphi}-\overrightarrow{A^{(0)}}$;

c. Вычисляем невязку $s_0 = \Psi\left(\overrightarrow{X^{(0)}}\right) = \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{M-1}\left[\eta_i^{(0)}\right]^2$.

3. Для $n \geq 0$ строим матрицу Якоби $J(\cdot)$ по каждой компоненте $\vec{X} = \left[X_0 ... X_{k-1}\right]$:

a. Задаем приближение $\overrightarrow{X^{(n)}}$ для всех K компонент $\vec{X}$, для чего вычисляем $\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\delta X} = \left[X_k^{(n)} + \delta X_k\right]$, где $\overrightarrow{\delta X}$ – заданные малые приращения для $\vec{X}$ компонент, $k = 0..K-1$;

b. Решаем прямую задачу (2) численно относительно $\alpha\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\delta X}\right)$ приближения, получая решение $A\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\delta X}\right)$;

c. Формируем вектор невязки $\overrightarrow{\eta^{(n)\delta}} = \$\$\eta\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\delta X}\right)\$\$ = \vec{\varphi} - A\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\delta X}\right)$, причем $\overrightarrow{\eta^{(n-1)\delta}} = \eta\left(\overrightarrow{X^{(n-1)}} + \overrightarrow{\delta X}\right) = \eta\left(\overrightarrow{X^{(n)}}\right) = \vec{\varphi} - A\left(\overrightarrow{X^{(n)}}\right) = \Theta$;

d. Вычисляем $J_{ij} = \frac{\eta_i^{(n)\delta} - \eta_i^{(n-1)\delta}}{\delta X_k}$, где $k = 0..K-1$, $i = 0..N-1$.

4. Для $n \geq 0$ вычисляем $s_1 = \Psi\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\Delta X}\right)$ – значение функционала невязки:

a. Вычисляем шаг $\overrightarrow{\Delta X} = \left[\Delta X_k\right]$ – оптимальные приращения $\vec{X}$, решая систему линейных алгебраических уравнений вида:

$$\overrightarrow{\Delta X} = \left(J^T J + \gamma diag\left(J^T J\right)\right)^{-1}\left(-J^T \Theta\right),$$

b. Решаем прямую задачу (2) численно относительно $\alpha\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\Delta X}\right)$ приближения, получая решение $\overrightarrow{A^{(n)\Delta}} = A\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\Delta X}\right)$;

c. Формируем вектор невязки $\overrightarrow{\eta^{(n)\Delta}} = \eta\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\Delta X}\right) = \vec{\varphi} - \overrightarrow{A^{(n)\Delta}}$;

d. Вычисляем невязку $s_1 = \Psi\left(\overrightarrow{X^{(n)}} + \overrightarrow{\Delta X}\right) = \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{M-1}\left[\eta_i^{(n)\Delta}\right]^2$.

5. Условия выхода из цикла:

a. Корректный выход. Если среднеквадратичная ошибка $\varepsilon \leq \Omega$, где $\varepsilon = \frac{1}{M}\sum_{i=0}^{M-1}\left[\varphi_i - A_i^{(n)\Delta}\right]^2$, Ω – критерий остановки, заданная точность решения. Следовательно, алгоритм сходится к оптимальному решению.

b. Некорректный выход. Алгоритм не дает существенного изменения значений $\overrightarrow{\Delta X}$ в ходе итераций, т.е.

$$\lim_{n\to\infty}\left(\frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1}\left[\Delta X_k^{(n)} - \Delta X_k^{(n-1)}\right]\right) \to 0,$$

следовательно, алгоритм сходится к некоторому решению.

6. Условия продолжения цикла:

a. Если $s_0 < s1$, то $s_0 = s1$, $\vec{X} = \vec{X} + \overrightarrow{\Delta X}$, $\gamma = \frac{\gamma}{c}$, где c – заданная константа; $n = n+1$, переходим к пункту 3;

b. Если $s_0 > s1$, то $\gamma = c\gamma$, переходим к пункту 4.

5. Результаты моделирования

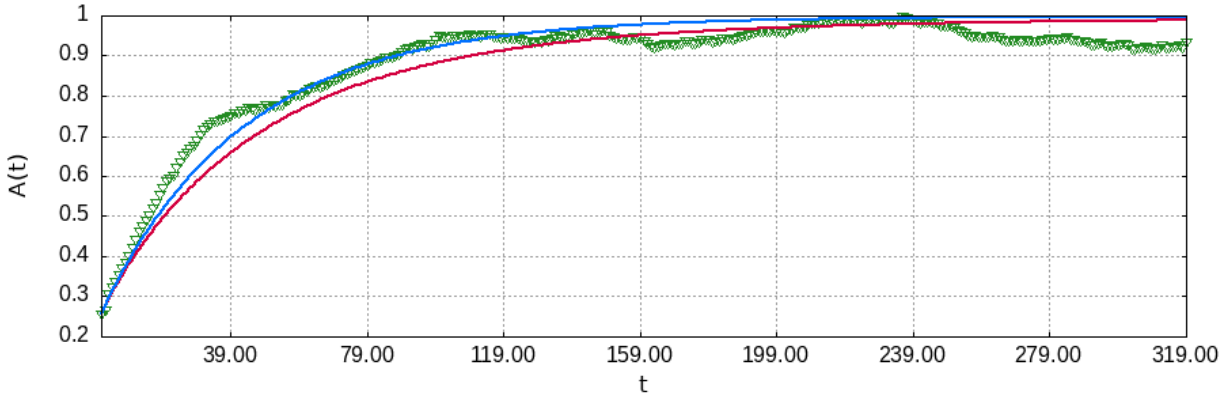


Рис. 5. *Модельные кривые, полученные решением прямой и обратной задач*

Fig. 5. *Model curves obtained by solving direct and inverse problems*

На рисунке 5 представлены результаты моделирования по прямой задаче (2) с параметрами (3) и результаты, полученные с помощью решения обратной задачи (5) с параметрами (3) и $v = 5$, $c = 1$, $\Omega = 1 \cdot 10^{-2}$: зеленым – обработанные экспериментальные данные с пункта YSSR; красным – модельная кривая при $\alpha = 0{,}95$, подбираемым вручную ($R^2 = 0{,}9$, $corr = 0.97$); синим – модельная кривая с восстановленным $\alpha = 0{,}98$ из дополнительной информации ($R^2 = 0{,}93$, $corr = 0{,}982$).

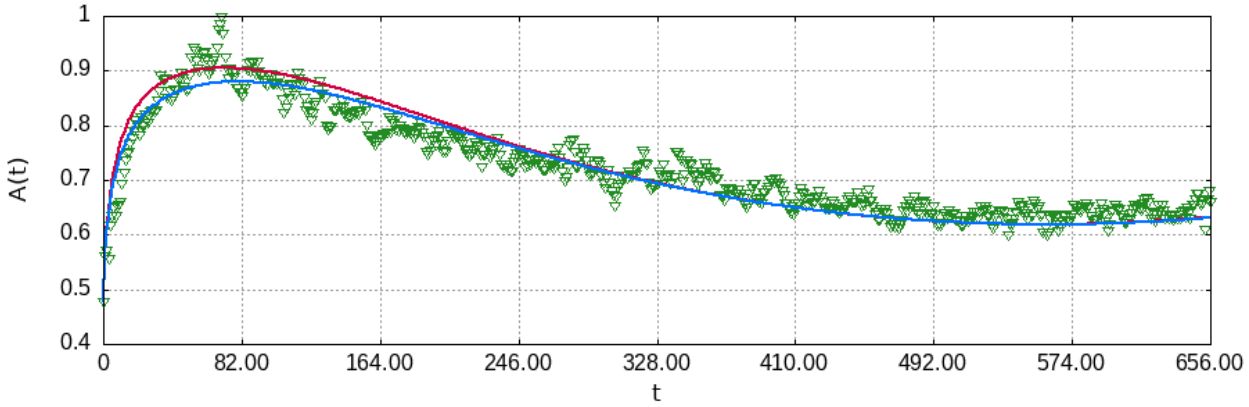


Рис. 6. *Модельные кривые, полученные решением прямой и обратной задач*

Fig. 6. *Model curves obtained by solving direct and inverse problems*

На рисунке 6 представлены результаты моделирования по прямой задаче (2) с параметрами (4) и результаты, полученные с помощью решения обратной задачи (5) с параметрами (4) и $v = 5$, $c = 1$, $\Omega = 1 \cdot 10^{-4}$: зеленым – обработанные данные GLLR; красным – модельная кривая при $\alpha = 0{,}65$, подбираемым вручную ($R^2 = 0{,}86$, $corr = 0{,}95$); синим – модельная кривая с восстановленным $\alpha = 0{,}59$ из дополнительной информации ($R^2 = 0{,}9$, $corr = 0{,}95$).

Заключение

На языке программирования C был разработан программный комплекс, реализующий: эредитарную α–модель RVA и алгоритмы ее численного решения; описанный алгоритм решения обратной задачи Левенберга–Марквардта; визуализацию данных и результатов моделирования.

Показано, что помощью итерационного метода Левенберга – Марквардта можно восстанавливать значение α, отвечающего за интенсивность процесса переноса радиоактивного газа радона.

Из результатов моделирования видно, что с помощью решения обратной задачи можно более точно восстанавливать параметры математической модели процесса накопления ^{222}Rn, характеризующие то или иное свойство среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кабанихин С. И., Искаков К. Т.* Оптимизационные методы решения коэффициентных обратных задач. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2001. 315 с.
2. *Рудаков В. П.* Эманационный мониторинг геосред и процессов. Москва: Научный мир, 2009. 175 с.
3. *Фирстов П. П., Макаров Е. О., Глухова И. П. и др.* Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 1. № 2. С. 16–32. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032
4. *Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J.* A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. Vol. 476. No. 3–4. Pp. 371–396. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.06.008
5. *Neri M., Giammanco S., Ferrera E. et al.* Spatial distribution of soil radon as a tool to recognize active faulting on an active volcano: The example of Mt. Etna (Italy) // Journal of environmental radioactivity. 2011. Vol. 102(9). Pp. 863–870. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.05.002
6. *Gill P.E., Murray W., Wright M.H.* Practical Optimization. Philadelphia: SIAM, 2019. 421 p.
7. *Tverdyi D.A., Makarov E.O., Parovik R.I.* Hereditary Mathematical Model of the Dynamics of Radon Accumulation in the Accumulation Chamber // Mathematics. 2022. Vol. 11. No. 4:850. Pp. 1–20. DOI: 10.3390/math11040850
8. *Твёрдый Д. А., Макаров Е. О., Паровик Р. И.* Исследования напряженно-деформированного состояния геосреды эманационными методами на примере alpha(t)-модели переноса радона // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2023. Т. 3. № 44. С. 86–104. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-44-3-86-104
9. *Понамарев А. С.* Фракционирование в гидротерме как потенциальная возможность формирования предвестников землетрясений // Геохимия. 1989. № 5. С. 714–724.
10. *Паровик Р. И.* Математическое моделирование неклассической теории эманационного метода. *Ред. Фирстов П. П., Ильин И. А.* Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2014. 80 с.
11. *Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V.* Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 124. Pp. 185–190. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.04.014
12. *Фирстов П.П., Макаров Е. О.* Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. 148 с.
13. *King C.Y.* Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption // Advisory Group Meeting held. Vienna. International atomic energy agency. 1991. Pp. 22–36.

14. *Uchaikin V.V.* Fractional Derivatives for Physicists and Engineers. Vol. I. Background and Theory. Berlin, Springer. 2013. 373 p.

15. *Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J.* Theory and Applications of Fractional Differential Equations. Amsterdam, Elsevier Science Limited. 2006. 204 p.

16. *Нахушев А. М.* Дробное исчисление и его применение. М.: Физматлит, 2003. 272 с.

17. *Псху А. В.* Уравнения в частных производных дробного порядка. М.: Наука, 2005. 199 с.

18. *Volterra V.* Functional theory, integral and integro-differential equations. London, Blackie & Son Limited.1930. 226 p.

19. *Gerasimov A.N.* Generalization of linear deformation laws and their application to internal friction problems. Applied Mathematics and Mechanics. 1948. Vol. 12. Pp. 529–539.

20. *Caputo M.* Elasticita e Dissipazione. Bologna, Zanichelli. 1969. 150 p.

REFERENCES

1. Kabanihin S.I., Iskakov K.T. *Optimizacionnye metody resheniya koefficientnyh obratnyh zadach* [Optimisation methods for solving coefficient inverse problems]. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj universitet, 2001. 315 p. (In Russian)

2. Rudakov V.P. *Emanacionnyj monitoring geosred i processov* [Emanation monitoring of geo-mediations and processes]. Moscow: Nauchnyj mir, 2009. 175 p. (In Russian)

3. Firstov P.P., Makarov E.O., Gluhova I.P. et. al. Search for strong earthquake precursor anomalies from subsurface gas monitoring data at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic test site. *Geosistemy perekhodnyh zon* [Geosystems of transition zones] 2018. Vol. 1. No 2. Pp. 16–32. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032. (In Russian)

4. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*. 2009. Vol. 476. No. 3–4. Pp. 371–396. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.06.008

5. Neri M., Giammanco S., Ferrera E. et al. Spatial distribution of soil radon as a tool to recognize active faulting on an active volcano: The example of Mt. Etna (Italy). *Journal of environmental radioactivity*. 2011. Vol. 102(9). Pp. 863–870. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.05.002

6. Gill P.E., Murray W., Wright M.H. Practical Optimization. Philadelphia, USA: SIAM, 2019. 421 p.

7. Tverdyi D.A., Makarov E.O., Parovik R.I. Hereditary Mathematical Model of the Dynamics of Radon Accumulation in the Accumulation Chamber. *Mathematics*. 2022. Vol. 11. No. 4:850. Pp. 1–20. DOI: 10.3390/math11040850

8. Tverdyi D.A., Makarov E.O., Parovik R.I. Research of Stress-Strain State of Geo-Environment by Emanation Methods on the Example of alpha(t)-Model of Radon Transport. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. 2023. Vol. 3. No. 44. Pp. 86–104. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-44-3-86-104. (In Russian)

9. Ponamarev A.S. Fractionation in hydrotherm as a potential possibility of formation of earthquake precursors. *Geohimiya* [Geochemistry]. 1989. No 5. Pp. 714–724. (In Russian)

10. Parovik R.I. *Matematicheskoe modelirovanie neklassicheskoj teorii emanacionnogo metoda* [Mathematical modelling of the non-classical theory of the emanation method]. Petropavlovsk-Kamchatskij, KamGU im. Vitusa Beringa, 2014. 80 p. (In Russian)

11. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 124. Pp. 185–190. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.04.014

12. Firstov P.P., Makarov E.O. *Dinamika podpochvennogo radona na Kamchatke i sil'nye zemletryaseniya* [Dynamics of subsurface radon in Kamchatka and strong earthquakes]. Petropavlovsk-Kamchatskij: KamGU im. Vitusa Beringa, 2018. 148 p. (In Russian)

13. King C.Y. Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Advisory Group Meeting held. Vienna. *International atomic energy agency*. 1991. Pp. 22–36.

14. Uchaikin V.V. Fractional Derivatives for Physicists and Engineers. Vol. I. Background and Theory. Berlin, Springer. 2013. 373 p.

15. Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J. Theory and Applications of Fractional Differential Equations. Amsterdam, Elsevier Science Limited. 2006. 204 p.

16. Nahushev A.M. *Drobnoe ischislenie i ego primenenie* [Fractional calculus and its applications]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 272 p. (In Russian)

17. Pskhu A.V. *Uravneniya v chastnyh proizvodnyh drobnogo poryadka* [Equations in partial derivatives of fractional order]. Moscow: Nauka, 2005. 199 p. (In Russian)

18. Volterra V. Functional theory, integral and integro-differential equations. London: Blackie & Son Limited,1930. 226 p.

19. Gerasimov A.N. Generalization of linear deformation laws and their application to internal friction problems. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1948. Vol. 12. Pp. 529–539.

20. Caputo M. Elasticita e Dissipazione. Bologna, Zanichelli. 1969. 150 p.

Информация об авторе

Твёрдый Дмитрий Александрович, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. лаборатории электромагнитных излучений, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН;

684034, Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7;

tverdyi@ikir.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6983-5258

Information about the author

Tverdyi Dmitrii Alexandrovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS;

684034, Russia, Kamchatka, Elizovsky district, Paratunka village, 7 Miranaya street;

tverdyi@ikir.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6983-5258

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 004.023 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-95-102
EDN: DVFIYH

Обучение искусственной нейронной сети с использованием гибридного алгоритма оптимизации PSOJaya

Е. М. Казакова

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

Аннотация. Метод оптимизации роем частиц (PSO – Particle swarm optimization) и Jaya – это эвристические алгоритмы оптимизации, которые используются для поиска оптимальных решений в задачах оптимизации. Каждый из этих методов имеет свои сильные и слабые стороны, и выбор между ними зависит от конкретной задачи оптимизации и требований к производительности. В данной работе предлагается гибрид алгоритмов PSO и Jaya для повышения эффективности оптимизации. В этой статье PSO, Jaya, PSOJaya используются в качестве методов обучения искусственной нейронной сети (ИНС) для задачи классификации набора данных Balance Scale. Результаты работы гибридного алгоритма сравниваются с результатами алгоритмов Backpropagation (метод обратного распространения ошибки), PSO, Jaya. В тестовых расчетах алгоритмы сравниваются на основе среднего значения, медианы, стандартного отклонения и «лучшего» минимального значения ошибок после 30 симуляций. Результаты эксперимента показывают, что ИНС, обученная с помощью PSOJaya, имеет лучшую точность, чем обученные с помощью Backpropagation, PSO и Jaya.

Ключевые слова: эвристический алгоритм, оптимизация, метод роя частиц (PSO), Jaya, метод обратного распространения ошибки (Backpropagation), гибридный алгоритм, конвейерная гибридизация, ИНС, классификация

Поступила 01.11.2023, одобрена после рецензирования 04.11.2023, принята к публикации 14.11.2023

Для цитирования. Казакова Е. М. Обучение искусственной нейронной сети с использованием гибридного алгоритма оптимизации PSOJaya // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 95–102. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-95-102

MSC: 68T07 Original article

Training an artificial neural network using the PSOJaya hybrid optimization algorithm

E.M. Kazakova

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. Particle swarm optimization (PSO) and Jaya are heuristic optimization algorithms that are used to find optimal solutions in optimization problems. Each of these methods has its own advantages and disadvantages, and the choice between them depends on the specific optimization problem and performance requirements. This paper proposes a hybrid of PSO and Jaya algorithms to improve optimization efficiency. In this paper PSO, Jaya, PSOJaya are used as artificial neural network (ANN) training methods for the classification task on the Balance Scale dataset. The results of the hybrid algorithm are compared with the

© Казакова Е. М., 2023

results of the Backpropagation, PSO and Jaya algorithms. The test calculations compare the algorithms based on the mean, median, standard deviation, and "best" minimum error value after 30 simulations. The experiment results show that the ANN trained with PSOJaya has higher accuracy than the one trained with Backpropagation, PSO and Jaya.

Keywords: heuristic algorithm, optimization, particle swarm method (PSO), Jaya, Backpropagation, hybrid algorithm, pipeline hybridization, ANN, classification

Submitted 01.11.2023, approved after reviewing 04.11.2023, accepted for publication 14.11.2023

For citation. Kazakova E.M. Training an artificial neural network using the PSOJaya hybrid optimization algorithm. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 95–102. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-95-102

Введение

PSO – это метод оптимизации, используемый в вычислительной математике и искусственном интеллекте для поиска оптимальных значений в задачах оптимизации. PSO моделирует процесс оптимизации как движение «частиц» в пространстве поиска, где каждая частица представляет собой потенциальное решение задачи, и они сотрудничают, чтобы найти оптимальное решение, подражая поведению стаи птиц или группы животных [1].

Алгоритм Jaya (Jaya в переводе с санскрита означает «victory» (победа), также называемый «джая») – это оптимизационный алгоритм, который был разработан для решения задач оптимизации [2]. Jaya является относительно простым и эффективным алгоритмом, используемым для нахождения оптимальных значений в задачах оптимизации без градиентов и ограничений. Основная идея данного алгоритма состоит в том, что он использует популяцию решений и итеративно улучшает их, двигаясь к лучшим решениям в пространстве решений. Однако Jaya не всегда стабильно сходится к оптимальным решениям и может иметь переменное качество оптимизации в зависимости от задачи и параметров.

Выбор алгоритма оптимизации зависит от характеристик конкретной задачи, однако имеющийся эвристический алгоритм может быть гибридизирован с другими эвристическими алгоритмами с целью улучшения их производительности и способности решать сложные оптимизационные задачи. Путем объединения разных методов гибридные алгоритмы могут комбинировать преимущества каждого алгоритма и справляться с ограничениями и сложностями, с которыми они сталкиваются. Гибридизация методов оптимизации, таких как PSO и Jaya, может быть полезной для достижения преимуществ обоих методов и преодоления их ограничений.

Существует несколько подходов к созданию гибридных эвристических алгоритмов [3]: вложение (embedded) [4, 5], препроцессор/постпроцессор, включающий последовательную и конвейерную гибридизацию (preprocessor/postprocessor) [6], коалгоритмы (coalgorithms) [7].

В данной работе разработан гибридный алгоритм PSOJaya по принципу конвейерной гибридизации без изменения общей работы алгоритмов PSO и Jaya.

Конвейерная гибридизация предполагает последовательное выполнение поисковых алгоритмов оптимизации, пока не будет достигнут критерий остановки.

Алгоритм PSO

Метод PSO направлен на итеративную оптимизацию задачи, начиная с набора или популяции возможных решений, называемых роем частиц, в котором каждая частица знает глобальное наилучшее положение в рое, а также его индивидуальное наилучшее положение, найденное до сих пор в процессе поиска в пространстве решения задачи.

Вначале инициализируется рой частиц x_i из N D-мерных векторов с действительными значениями и аналогично генерируется скорость частиц v_i каждой частицы. После инициализации роя и скорости для каждой частицы вычисляются значение целевой функции и

начальное индивидуальное лучшее положение $f(p^0_{best_i})$ вместе с начальным глобальным (или окрестным) наилучшим положением $f(g^0_{best})$. На следующем этапе каждая частица обновляет свою скорость и положение, исходя из ее текущего положения, скорости и опыта, полученного от лучшего решения в популяции по формулам

$$x^{t+1}_{i,j} = x^t_{i,j} + v^{t+1}_{i,j} \tag{1}$$

$$v^{t+1}_{i,j} = \omega v^t_{i,j} + c_1 r^{t+1}_{1_{i,j}}\left(p^t_{best_i,j} - x^t_{i,j}\right) + c_2 r^{t+1}_{2_{i,j}}\left(g^t_{best,j} - x^t_{i,j}\right), \tag{2}$$

где $v^0_{i,j} = 0$ и $v^{t+1}_{i,j}$ – вектор скорости i-й частицы на итерации $t+1$ в j измерении, $p^t_{best_i,j}$ – наилучшее индивидуальное положение частицы, $g^t_{best,j}$ – наилучшее глобальное положение среди всех частиц в рое, $r^{t+1}_{1_{i,j}}$, $r^{t+1}_{2_{i,j}}$ – случайные величины, принимающие значения на текущей итерации $t+1$ из диапазона $[0, 1]$, ω (инерциальный вес), c_1, c_2 – параметры алгоритма. Первое слагаемое в уравнении (2) называется инерционной компонентой, которая обеспечивает частице соответствующий импульс для перемещения по пространству поиска без резкого изменения направления на основе истории предыдущих направлений полета, второе слагаемое называется когнитивной компонентой и обозначает память о предыдущем индивидуальном лучшем положении, в котором получала свою лучшую результативность в прошлом; третье слагаемое – социальная компонента, определяющая текущую производительность, связанную с лучшими глобальными решениями, найденными до сих пор.

Алгоритм Jaya

Основная идея алгоритма Jaya заключается в том, что каждое решение в популяции должно стремиться быть лучше, и для этого оно может быть обновлено на основе лучших решений, найденных в популяции. Это позволяет алгоритму исследовать пространство решений и находить лучшие решения по мере продвижения по итерациям. Вначале генерируется популяция решений x_i, на следующем этапе вычисляется значение целевой функции $f(x_i)$. Среди всех полученных решений-кандидатов отбираются частица x_{best} с наилучшим положением и соответствующее наилучшее значение f_{best}, а наихудший кандидат x_{worst} получает наихудшее значение f_{worst}. Каждое решение $f(x^i_{kj})$ (x^i_{kj} – k-я частица с j-й переменной на i-й итерации) в популяции сравнивается с текущим наилучшим решением $f(x^i_{best,j})$ ($x^i_{best,j}$ – наилучшая частица с j-й переменной на i-й итерации). Если $f\left(x^i_{kj}\right) < f\left(x^i_{best,j}\right)\left(f\left(x^i_{kj}\right) > f\left(x^i_{best,j}\right)\right)$, то текущее положение частицы обновляется по формуле

$$x^{i'}_{k,j} = x^i_{k,j} + r^i_{1,j}\left(x^i{}_{best,j} - |x^i_{k,j}|\right) - r^i_{2,j}\left(x^i{}_{worst,j} - |x^i_{k,j}|\right), \tag{3}$$

где $r^i_{1,j}$, $r^i_{2,j}$ – случайные величины, принимающие значения на текущей итерации i из диапазона $[0, 1]$, $x^i_{best,j}$ – значение переменной j для наилучшего кандидата, а $x^i{}_{worst,j}$ – значение переменной j для наихудшего кандидата, $x^{i'}_{k,j}$ – обновленное значение $x^i_{k,j}$. Член $r^i_{1,j}\left(x^i{}_{best,j} - |x^i_{k,j}|\right)$ указывает на стремление решения приблизиться к лучшему решению, а член $r^i_{2,j}\left(x^i{}_{worst,j} - |x^i_{k,j}|\right)$ указывает на тенденцию решения избегать наихудшего решения. Все принятые значения функции в конце итерации сохраняются, и эти значения становятся входными данными для следующей итерации.

Гибридный алгоритм PSO-Jaya

Гибридный алгоритм PSOJaya является комбинацией двух оптимизационных алгоритмов – PSO и Jaya. Преимущество гибридного метода заключается в увеличении скорости сходимости, так как оба метода могут взаимодополнять друг друга и помогать ускорить процесс оптимизации, также он может способствовать большей разнообразности поиска за счет различных подходов в стратегии обновления решений, что может быть полезно в задачах, где разнообразие решений важно. В случае, если один из методов сталкивается с трудностью в оптимизации, другой метод может компенсировать его недостатки.

Общий принцип работы гибридного алгоритма PSOJaya:

1. Инициализация: создается начальная популяция частиц размером M для PSO с пунктом 1 раздела PSO.

2. PSO-фаза: частицы PSO итеративно обновляют свое положение и скорость, исследуя пространство решений. Целевая функция вычисляется для каждой частицы, обновляются лучшие решения, найденные каждой частицей и во всей популяции (раздел PSO).

3. Jaya-фаза: после завершения PSO-фазы в алгоритм Jaya передается N ($N \leq M$) лучших найденных решений алгоритмом PSO из M решений. Используя алгоритм Jaya, выполняется итеративное обновление решений по формуле (3) с целью улучшения их качества (раздел Jaya). После завершения работы Jaya обновляются положения N частиц в PSO из Jaya.

4. Проверка критерия остановки: алгоритм продолжает выполнять PSO-фазы и Jaya-фазы, пока не будет достигнут заданный критерий остановки, такой как максимальное количество итераций или требуемая точность решения.

Обучение искусственной нейронной сети

Существует ряд методов использования эвристических алгоритмов для обучения нейросети:

1. Эвристические алгоритмы используются для нахождения комбинации весов и смещений, обеспечивающей минимальную ошибку для ИНС [8].

2. Эвристические алгоритмы используются как способ найти правильную структуру для ИНС в конкретной задаче [9].

3. Эвристические алгоритмы используются для настройки параметров алгоритма обучения на основе градиента [10].

В данной статье PSO, Jaya и PSOJaya применяются к ИНС с использованием первого метода. Это означает, что структура ИНС фиксирована, алгоритмы находят комбинацию весов и смещений, которая дает минимальную ошибку для ИНС. Для проектирования ИНС необходимо определить основные элементы: во-первых, следует определить функцию потерь, использующую ошибку ИНС, для оценки пригодности частиц в ИНС с алгоритмами обучения PSO, Jaya и PSOJaya; во-вторых, необходимо определить стратегию кодирования весов и смещений для каждого ИНС с соответствующими алгоритмами.

Функция потерь

Архитектура ИНС в данной статье имеет вид: один входной, один скрытый и один выходной слои, где количество нейронов на входном слое равно n, на скрытом слое – h, а на выходном слое – m (n – h – m)**.** Функцией активации служит сигмоида. После вычисления нейронов на выходном слое ошибка сети (функция стоимости) будет иметь вид

$$E = \frac{1}{q}\sum_{i=1}^{m}\left(\widehat{y_i^k} - y_i^k\right)^2,$$

где q – количество экземпляров в обучающем наборе, $\widehat{y_i^k}$ – выход сети для k-го экземпляра, y_i^k – метка для k-го экземпляра в обучающем наборе.

Кодирование весов

После определения функции пригодности следующим этапом является выбор стратегии кодирования для представления весов и смещений ИНС для каждой частицы в PSO, Jaya и PSOJaya. Согласно [11], существует три метода кодирования и представления весов и смещений ИНС для каждой частицы в эвристических алгоритмах. В данной статье использовалась стратегия векторного кодирования. Для задействованной ИНС каждая частица представляет все веса и смещения структуры нейросети. Например, для ИНС со структурой 2 входа, 4 нейрона на скрытом слое, 1 выход (2– 4 –1) можно представить соответствующее кодирование для каждой частицы как:

$$particle(i) = [w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}, w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}, \overline{w_{11}}, \overline{w_{21}}, \overline{w_{31}}, \overline{w_{41}}],$$

$$particle_matrix\ = [particle(1), particle(2), \dots, particle(M)],$$

где $w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}, w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}$ – веса между входом и скрытым слоем, $\overline{w_{11}}, \overline{w_{21}}, \overline{w_{31}}, \overline{w_{41}}$ – веса между скрытым слоем и выходом, M – общее количество частиц (рой), $i=1, \dots, M$. При вычислении выходных данных ИНС частицы снова декодируются в матрицу весов, поэтому процесс декодирования становится немного сложным. Тем не менее такая стратегия кодирования часто используется в области оптимизации функций.

Результаты обучения

Для сравнения эффективности работы алгоритмов Backpropagation (BP), PSO, Jaya и PSOJaya в обучении ИНС проведен вычислительный эксперимент с ИНС по классификации состояний объекта на наборе данных Balance Scale (шкалы баланса). Набор данных получен из UC Irvine Machine Learning Repository [12]. Экземпляры в наборе данных соответствуют одному из 3 классов: шкала справа, шкала слева или шкала сбалансирована. Набор данных состоит из 625 экземпляров и 4 признаков: левый вес, левое расстояние, правый вес и правое расстояние. Например, элемент набора данных «2, 5, 2, 1» (левый вес = 2, левое расстояние = 5, правый вес = 2, правое расстояние = 1) следует классифицировать по классу «слева». Для обучения используется 468 образцов, а для тестирования – 157. Архитектура нейросети имеет вид 4–18–3.

В этой задаче предполагается, что каждая частица инициализируется случайным образом в диапазоне [–1, 1]. Алгоритмы имеют следующие параметры: для PSO, PSO-Jaya $\omega = 2$, $c_1 = 1$, $c_2 = 0{,}5$, $v_{max} = 0{,}1$. Размер роя для трех алгоритмов $M = 40$, в гибридном алгоритме из M частиц роя в Jaya передается $N = 10$ наилучших найденных решений PSO.

Для оценки эффективности работы классификатора используются метрики *accuracy* (верность) и F_1.

Алгоритмы BP, PSO, Jaya и PSOJaya сравниваются на основе среднего значения, медианы, стандартного отклонения и наилучшей из среднеквадратичной ошибки (MSE – Mean Square Error) для в обучающего набора Balance scale после 30 симуляций. Критерием завершения процесса обучения является выполнение максимального количества итераций (в данном случае 500). Экспериментальные результаты для задачи приведены в таблицах 1, 2. Наилучшие результаты выделены жирным шрифтом.

В таблице 1 указаны значения F_1-метрик и *accuracy* для классификатора с алгоритмами BP, PSO, Jaya и PSOJaya после 30 симуляций. Как видно из таблицы, гибридный алгоритм PSOJaya превзошел алгоритмы PSO, Jaya, достигнув лучшей точности классификации на обучающем и тестовом наборах.

Таблица 1. Среднее значение метрик *accuracy* и F_1 после 30 симуляций

Table 1. Average accuracy and F_1 metric after 30 simulations

№	Алгоритм	На обучающем наборе (%)	На тестовом наборе (%)	F_1 метрика
1	BP	90,58	91,67	0,91
	PSO	90,28	91,3	0,91
	Jaya	88,78	89,36	0,89
	PSO-Jaya	**90,99**	**92,52**	**0,92**

Из таблицы 2 видно, что классификатор с гибридным алгоритмом работает лучше, чем другие классификаторы с алгоритмами PSO, Jaya, исходя из значений среднего, медианы, стандартного отклонения и минимального MSE. Эти статистические данные показывают, что классификатор с PSOJaya имеет лучшую способность избегать локальных минимумов. Также для минимального MSE гибридный алгоритм имеет лучшие результаты, что указывает на большую точность классификатора, чем классификаторов с алгоритмами PSO и Jaya.

Таблица 2. Среднее, медиана, стандартное отклонение и best MSE

Table 2. Mean, median, standard deviation and best MSE

№	Алгоритм	Среднее	Медиана	Станд. отклонение	best MSE
1	BP	0,0449	0,0448	1,3877e-17	0,0448
	PSO	0,0581	0,0575	0,0016	0,0549
	Jaya	0,0615	0,0606	0,0056	0,0517
	PSO-Jaya	0,0486	0,0485	0,0016	0,046

На рисунке 1 показана кривая сходимости классификатора данных Balance Scale с BP, PSO, Jaya и PSOJaya, основанная на средних значениях MSE для обучающего набора данных после 30 симуляций. Кривая показывает, что гибридный алгоритм PSOJaya дает лучшую скорость сходимости для классификатора данных Balance scale.

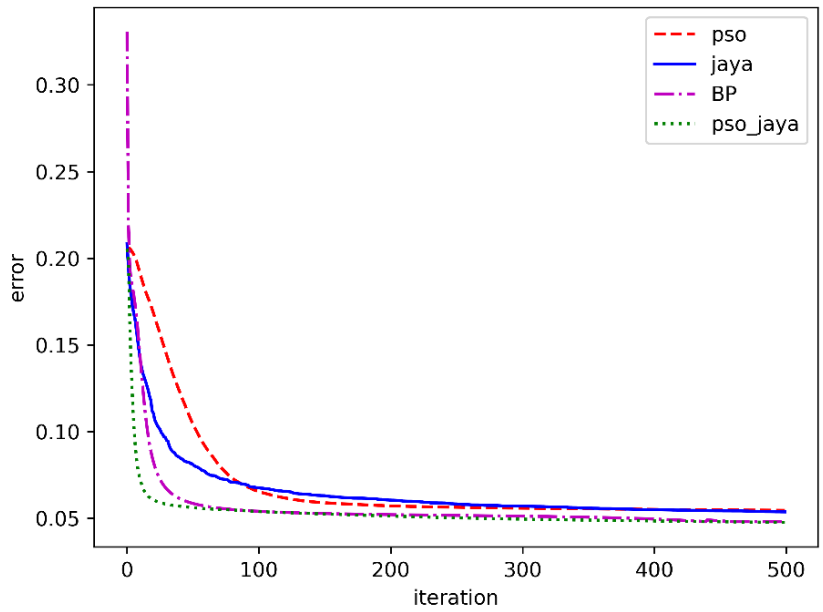


Рис. 1. *Среднее значение MSE*

Fig. 1. *Average MSE value*

Заключение

В данной статье представлен гибридный алгоритм для задач оптимизации на основе двух эвристических алгоритмов PSO и Jaya. Идея гибридного алгоритма заключается в конвейерной последовательной работе двух алгоритмов PSO и Jaya. Чтобы оценить эффективность работы предложенного гибридного алгоритма, было произведено обучение нейросети для задачи классификации Balance scale.

На основе полученных данных в результате экспериментов можно заключить, что гибридный алгоритм PSOJaya дает лучшие результаты, чем алгоритмы PSO, Jaya по отдельности и BP для рассматриваемой задачи классификации.

REFERENCES

1. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. *IEE International Conference on Neural Networks*. 1995. Pp. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968

2. Rao R. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *Int J Indus Eng Comput*. 2016. Vol. 1. No. 7. Pp. 19–34. DOI: 10.5267/j.ijiec.2015.8.004

3. *Карпенко А. П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. 2 издание. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 446 с.

Karpenko A.P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2017. 446 p. (In Russian)

4. Garg H. A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*. 2016. Vol. 274. Pp. 292–305. DOI: 10.1016/j.amc.2015.11.001

5. Mirjalili S., Hashim S.-Z.M. A new hybrid PSOGSA algorithm for function optimization. *Proceedings of ICCIA 2010-2010 International Conference on Computer and Information Application*. 2010. Pp. 374–377. DOI: 10.1109/ICCIA.2010.6141614

6. Şenel F.A., Gökçe F. Yüksel A.S. et al. A novel hybrid PSO–GWO algorithm for optimization problems. *Engineering with Computers.* 2019. Vol. 35. Pp. 1359–1373. DOI: 10.1007/s00366-018-0668-5

7. Zhou Y., Shengyu P.A. Hybrid Co-evolutionary particle swarm optimization algorithm for solving constrained engineering design problems. *J. Comput.* 2010. Vol. 6. No. 5. Pp. 965–972. DOI: 10.4304/jcp.5.6.965-972

8. Mirjalili S.A., Hashim S.-Z.M., Sardroudi H.M. Training feedforward neural networks using hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm. *Applied Mathematics and Computation*. 2012. Vol. 22. No. 218. Pp. 11125–11137. DOI: 10.1016/j.amc.2012.04.069

9. Junior F.-E.F., Yen G.G. Particle swarm optimization of deep neural networks architectures for image classification. *Swarm and Evolutionary Computation*. Vol. 49. 2019. Pp. 62–74. DOI: 10.1016/j.swevo.2019.05.010

10. Garro B.A., Vázquez R.A. Designing artificial neural networks using particle swarm optimization algorithms. *Computational intelligence and neuroscience*. 2015. P. 61. DOI: 10.1155/2015/369298

11. Zhang J.R., Zhang J., Lok T.M., Lyu M.R. A hybrid particle swarm optimization–back-propagation algorithm for feedforward neural network training. *Applied mathematics and computation*. 2007. Vol. 2. No. 185. Pp. 1026–1037.

12. Siegler R. Balance Scale. UCI Machine Learning Repository. 1994. https://doi.org/10.24432/C5488X.

Информация об авторе

Казакова Елена Мусовна, 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;
shogenovae@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5819-9396

Information about the author

Kazakova Elena Musovna, 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;
shogenovae@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5819-9396

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 004.94 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-103-108
EDN: FRJXII

Информационное обеспечение реометрических исследований процессов структурирования эластомерных композитов

А. С. Кузнецов

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

Аннотация. В статье описан системный подход к разработке модели информационной поддержки процессов управления реометрическими испытаниями эластомерных композитов. Создано информационное обеспечение на основе процессной модели организации управления сложными химико-технологическими процессами смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов. Представлена модель организации и управления процессами проведения реометрических испытаний эластомерных композитов на основе процессного подхода. Выделены группы процессов. Приведена схема модели автоматизированной системы управления реометрическими испытаниями, необходимая для разработки и проектирования модели информационной поддержки процессов управления структурированием эластомеров на основе цифровых моделей химических лабораторий. Методика научного исследования строится на анализе научных данных, сравнительном анализе, синтезе данных, графической интерпретации. Результатом исследования является создание информационного обеспечения реометрических исследований процессов структурирования эластомерных композитов. В работе также определены перспективы развития и рассмотрены исследования в данной области.

Ключевые слова: информационное обеспечение, автоматизация, информатизация, цифровой двойник, модель управления, программные средства, реометрические испытания, цифровая модель

Поступила 17.11.2023, одобрена после рецензирования 27.11.2023, принята к публикации 30.11.2023

Для цитирования. Кузнецов А. С. Информационное обеспечение реометрических исследований процессов структурирования эластомерных композитов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 103–108. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-103-108

MSC: 94-10; 94-11 Original article

Information support for rheometric studies of structuring processes of elastomer composites

A.S. Kuznetsov

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

Abstract. The article describes a systematic approach to developing a model of information support for control processes of rheometric testing of elastomeric composites. Information support has been created based on a process model for organizing the management of complex chemical and technological processes of mixing and structuring multicomponent elastomeric composites. A model for organizing and managing processes for conducting rheometric tests of elastomeric composites based on a process approach is presented. Process groups are selected. A diagram of a model of an automated control system for rheometric tests is presented, which is necessary for the development and design of a model of information support for

© Кузнецов А. С., 2023

control processes of elastomer structuring based on digital models of chemical laboratories. The scientific research methodology is based on the analysis of scientific data, comparative analysis, data synthesis, and graphic interpretation. The result of the study is the creation of information support for rheometric studies of the structuring processes of elastomeric composites. The work also identifies development prospects and reviews research in this area.

Keywords: information support, automaton, informatization, digital twin, control model, software, rheometric tests, digital model

Submitted 17.11.2023, approved after reviewing 27.11.2023, accepted for publication 30.11.2023

For citation. Kuznetsov A.S. Information support for rheometric studies of structuring processes of elastomer composites. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 103–108. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-103-108

Введение

На сегодняшний день наиболее эффективными являются методы управления производственными процессами, включающие инструменты их автоматизации и цифровизации.

Автоматизация и информатизация испытаний в реометрических исследованиях являются крайне важными, так как позволяют использовать ряд преимуществ:

- повышенная производительность процессов;
- детализация процессов на основе информационных моделей;
- улучшение качества, а также повышение предсказуемости качества готового продукта – продукции из эластомерных композитов;
- повышенная последовательность и согласованность производственных процессов получения готового продукта;
- снижение прямых затрат человеческого труда и расходов.

Следующим новым этапом после автоматизации и информатизации управления современными процессами и сложными производствами является внедрение цифровых инструментов управления – одна из важнейших задач, предусмотренных концепцией Индустрии 4.0 [1]. Среди перечня всевозможных направлений и технологий цифровизации технологических процессов и целых производств необходимо отдельно выделять инструменты цифрового моделирования и средства визуализации оборудования и данных. Цифровизация цепочки производственных процессов и операций позволяет оперировать большими оперативными данными, которые необходимо считывать, организовывать их сбор, быстрый экспресс-анализ, систематизацию, обработку, хранение, передачу и представление в определенной форме. Численное моделирование и визуализация экспериментальных данных процессов значительно облегчают принятие управленческих решений и выступают в качестве основного подхода к построению цифровой модели технологических процессов и производств [1, 2].

Целью работы является создание формализованного описания групп и цепочек производственных процессов структурирования многокомпонентных эластомерных композитов как средства информационной поддержки принятия решений при управлении реометрическими исследованиями.

Основная часть

На сегодняшний день решения на основе процессного и проектно-ориентированного подходов представляют собой современные и эффективные инструменты организации и внедрения систем управления [1]. Основным инструментом анализа сложных цепочек, технологических стадий, процессов и операций является их описание на основе системного подхода. В качестве основы подобного подхода было выбрано представление функций

управления в качестве действующих подсистем организации, причем эти функции комбинируются по принципу подобия, схожести [3]. Производственная система делится на составляющие ее подсистемы по функциональному признаку. В результате при создании процессной модели организации оперативного управления реометрическими исследованиями многокомпонентных эластомерных композитов были рассмотрены четыре группы процессов (рис. 1).



Рис. 1. *Процессная модель управления реометрическими исследованиями*

Fig. 1. *Process model for managing rheometric studies*

Группа 1 модели управления представляет собой совокупность средств управления приборной базой обеспечения процессов управления качеством готовой продукции, в нее входят инструменты выбора и применения технических средств, реализующих процессы контроля качества исходного сырья (полуфабриката), блок контроля и управления качеством – уровнем свойств сырья и готовой продукции. Второй блок группы процессов – это инструменты планирования и контроль испытаний, он содержит перечень процессов составления плана проведения испытаний и мероприятия технического контроля по основным показателям качества процесса структурирования в соответствии с паспортом технологии, техническим регламентом и контрольными картами. Блок третьей группы отвечает за этап моделирования технологических процессов структурирования. Формализация знаний о процессе начинается с описания предметной области – построения вербальной модели процесса структурирования. Далее строится комплекс логико-информационных моделей процессов, отвечающих за детализацию превращения исходного сырья от поставщика в готовый продукт для потребителя усилиями конкретных исполнителей процессов производства на основе нормативно-технической документации. После проведения детального анализа процессов реометрических исследований строится модель управления.

Четвертая группа процессной модели управления реометрическими исследованиями – группа управления изменениями, содержит в себе два подпроцесса: актуализация сведений о параметрах процесса и средства управления дефектами продукции. Подпроцесс актуализации сведений позволяет гибко и оперативно корректировать основные технологические параметры процесса структурирования, регулируя показатели качества готового продукта – изделия из эластомерных композитов с заданным уровнем эксплуатационных свойств. Блок управления дефектами готового продукта позволяет дифференцировать готовый продукт по уровню качества. Полученный продукт на данном этапе проверяется на наличие брака, и в зависимости от величины отклонения уровня свойств может быть снижен класс продукции или происходит ее забраковка.

Построенная на рисунке 1 процессная модель управления представляет собой средство информационной поддержки процесса принятия решений по контролю и управлению химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов. Решения принимаются боле гибко и оперативно за счет улучшенной детализации цепочки производственных процессов, стадий и операций, а также выбора наиболее чувствительных к управляющим воздействиям контрольных точек управления.

Управление процессами структурирования эластомерных композитов сводится к выдержке определенных значений основных показателей качества готового продукта – заданных на этапе рецептуростроения уровня свойств – класса качества готового продукта.

С помощью модели оперативного управления выдерживается определенный доверительный интервал для основных количественных характеристик [4]. На рисунке 2 представлена схема реализации модели управления технологическими процессами структурирования эластомерных композитов, реализуемая с помощью реографа, который выполняет функцию датчика динамического состояния объекта управления.

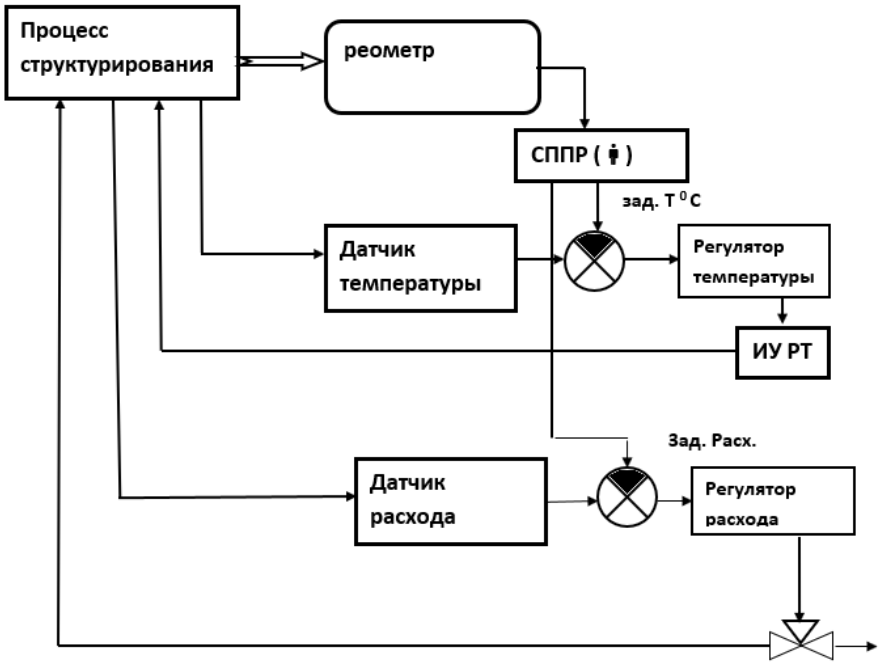


Рис. 2. *Схема организации управления процессом структурирования с применением реометра*
(ИУ РТ – исполнительное устройство регулятора температуры,
СППР – система поддержки принятия решений)

Fig. 2. *Scheme of process control organization of structuring using a rheometer*
(IU RT – temperature controller actuator,
DSS – decision support system)

Датчиком динамического состояния для процесса структурирования является реометр, с помощью которого реализуется экспресс-отбор проб малого количества продукта. Температура процесса поддерживается постоянной и задается с помощью регулятора, корректируется с помощью исполнительного устройства регулирования температуры.

В предлагаемой гибридной системе управление процессом структуризации осуществляется через систему поддержки принятия решений (СППР) на основе интеллектуальной системы управления. При реализации функций оперативного контроля и управления возможны три варианта практического применения СППР с различной степенью внедрения цифровых технологий управления:

1. В качестве первого варианта можно рассмотреть традиционную автоматизированную систему управления (АСР), где СППР представляет собой автоматизированную систему регулирования либо по отклонению, либо по возмущению.

2. Второй вариант организации управления процессами структурирования эластомерных композитов с помощью системы управления включает в состав блока управления (БУ) интеллектуальную систему управления. Такой вариант организации контроля и управления называется гибридной моделью управления.

3. Третий вариант реализации управления технологическим процессом на основе наиболее полного применения цифровых технологий носит название управления на основе цифровых моделей управления – «цифровых двойников» [5, 6]. Это модель управления процессами на основе методов и алгоритмов искусственного интеллекта без оператора. Отметим, что выбор конкретного варианта реализации задач и функций управления происходит на основе принятия решений по организации управления, которые в свою очередь требуют обладания всей полнотой информации о протекающих процессах. Эта задача решается с помощью создания средств информационной поддержки.

Заключение

Для создания динамической модели информационной поддержки процессов реометрических исследований и испытаний на основе системного подхода в управлении может быть использована процессная модель, содержащая различные группы исследований, которые включают в себя все стадии и технические операции реометрических испытаний. Приведена схема организации управления процессом структурирования эластомерных композитов на основе реометра. Данные модели представляют собой средства информационной поддержки для оптимизации планирования и проведения всего спектра реометрических исследований, а также для ускорения процессов подготовки, выработки и принятия управленческих решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Репин В. В.* Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. 2-е изд. Москва: Стандарты и качество, 2005. 408 с.

2. *Егоров А. Ф.* Интегрированные системы управления химическими производствами: учеб. пособие. Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2020. 200 с. ISBN 978-5-7237-1850-0.

3. *Кузнецов А. С.* О применении процессно-ориентированного подхода на производстве эластомерных композитов // Сборник материалов V международной научно-практической конференции «Научные дискуссии в условиях мирового кризиса: новые вызовы, взгляд в будущее». В 2-х частях. Ростов-на-Дону, 2022. С. 77–78.

4. *Корнюшко В. Ф., Кузнецов А. С., Садеков Л. В.* Информационное и программное обеспечение гибридной интеллектуальной системы при управлении технологическими

процессами // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 4. С. 629–638. DOI: 10.15827/0236-235X.136.629-638.

5. *Кокорев Д. С., Юрин А. А.* Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-journal. 2019. № 10(34). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-ponyatie-tipy-i-preimuschestva-dlya-biznesa (дата обращения: 02.10.2023).

6. *Аникин А. В., Шмакова Е. Г., Разливинская С. В.* Методология применения цифровых двойников для научно-исследовательских лабораторий // Информатизация образования и науки. 2022. № 3(55). С. 97–109.

REFERENCES

1. Repin V.V. *Protsessnyy podkhod k upravleniyu. Modelirovaniye biznes-protsessov.* [Process approach to management. Business process modeling]. Moscow: Standarty i kachestvo, 2005. 408 p. (In Russian)

2. Egorov A.F. *Integrirovannyye sistemy upravleniya khimicheskimi proizvodstvami: ucheb. posobiye* [Integrated control systems for chemical production: textbook. Allowance]. Moscow: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2020. 200 p. ISBN 978-5-7237-1850-0. (In Russian)

3. Kuznetsov A.S. *O primenenii protsessno-oriyentirovannogo podkhoda na proizvodstve elastomernykh kompozitov* [On the application of a process-oriented approach to the production of elastomeric composites]. Materials V international scientific and practical conference “Scientific discussions in the context of the global crisis: new challenges, a look into the future”. In 2 parts. Rostov-on-Don, 2022. Pp. 77–78. (In Russian)

4. Kornyushko V.F., Kuznetsov A.S., Sadekov L.V. Information and software of a hybrid intelligent system for managing technological processes. *Programmnyye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2021. Vol. 34. No. 4. Pp. 629–638. DOI: 10.15827/0236-235X.136.629-638. (In Russian)

5. Kokorev D.S., Yurin A.A. *Tsifrovyye dvoyniki: ponyatiye, tipyi preimushchestva dlya biznesa* [Digital twins: concept, types and benefits for business]. *Colloquium-journal.* 2019. No. 10(34). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-ponyatie-tipy-i-preimuschestva-dlya-biznesa (access date: 10/02/2023). (In Russian)

6. Anikin A.V., Shmakova E.G., Razlivinskaya S.V. Methodology for using digital twins for research laboratories. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science]. 2022. No. 3(55). Pp. 97–109. (In Russian)

Информация об авторе

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

Information about the author

Kuznetsov Andrey Sergeevich, Candidate of Technical 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, 1 building;

askgoogle@internet.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1569-4765

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 004.83 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-109-115
EDN: FWBYMM

Разработка алгоритма на основе логических операций для обнаружения закономерностей в 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 метод локальной интерпретации решений обученной нейронной сети функциями многозначной логики предикатов. Локальная интерпретация нейронной сети относится к процессу объяснения решений, принимаемых моделью на конкретном примере или в окрестности конкретного входа. В основе предлагаемого подхода лежит множество функций многозначной логики, которые представляют собой обобщенные операции, отвечающие определенным требованиям. Комбинируя эти функции, можно обнаружить внутренние закономерности в данных и даже корректировать результаты, полученные с помощью нейронных сетей. Предложенный метод был исследован в контексте задач классификации с использованием многомерных дискретных признаков. В таких случаях каждый признак может принимать одно из k возможных значений и иметь равную важность для идентификации класса. Этот подход открывает новые возможности для понимания и объяснения правил, лежащих в основе данных, которые не всегда очевидны при использовании обычных нейронных сетей.

Ключевые слова: интерпретация, многозначная логика, нейронная сеть, обобщенное сложение, данные

Поступила 30.10.2023, одобрена после рецензирования 01.11.2023, принята к публикации 10.11.2023

Для цитирования. Лютикова Л. А. Разработка алгоритма на основе логических операций для обнаружения закономерностей в неполных данных // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 109–115. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-109-115

MSC: 68T27 Original article

Development of an algorithm based on logical operations to detect patterns in data with missing values

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 a method of local interpretation of solutions of a trained neural network by functions of multivalued predicate logic. The local interpretation of a neural network refers to the process of explaining the decisions made by the model on a specific example or in the vicinity of a specific input. The proposed approach is based on a set of functions of multivalued logic, which are generalized operations that meet certain requirements. By combining these functions, it is possible to detect internal

© Лютикова Л. А., 2023

patterns in the data and even correct the results obtained with the help of neural networks. The proposed method was investigated in the context of classification problems using multidimensional discrete features. In such cases, each attribute can take one of k possible values and have equal importance for class identification. This approach opens up new possibilities for understanding and explaining the rules underlying the data, which are not always obvious when using conventional neural networks.

***Keywords**:* interpretation, multivalued logic, neural network, generalized addition, data

Submitted 30.10.2023, approved after reviewing 01.11.2023, accepted for publication 10.11.2023

For citation. Lyutikova L.A._Development of an algorithm based on logical operations to detect patterns in data with missing values. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 109–115. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-109-115

Введение

Методы интерпретации работы нейронной сети позволяют анализировать и понимать, как и почему сеть принимает определенные решения или делает прогнозы.

Логические методы интерпретации линейной нейронной сети обычно основаны на анализе весов и пороговых значений модели. Поскольку линейная нейронная сеть представляет собой комбинацию линейных операций (умножение на веса) и нелинейных функций активации, интерпретация может быть связана с определением важности каждого признака или переменной в модели. Локальные методы фокусируются на объяснении решений модели на конкретных примерах или входах, в то время как глобальные методы интерпретации стремятся предоставить более общую и глобальную информацию о модели. Оба типа методов имеют свои преимущества и могут быть полезны в разных ситуациях в зависимости от поставленной задачи интерпретации.

В работе предлагается генерация интерпретируемых функций. Предлагается подобрать множество логических функций многозначной логики предикатов или на основе построения деревьев, которые воспроизводят поведение нейронной сети и позволяют объяснить принимаемые решения.

Методы интерпретации работы нейронной сети на основе построения деревьев позволяют создать понятную и интерпретируемую модель, которая объясняет принимаемые решения сети [1–4].

Постановка задачи

Допустим, у нас есть объекты, которые характеризуются набором свойств или признаков. Каждый объект представлен в виде многомерного вектора, где каждая координата соответствует значению одной из характеристик объекта. Однако информация о некоторых характеристиках может отсутствовать [5].

Задачей линейной нейронной сети является способность принимать входные данные (набор признаков объекта) и выдавать соответствующий выходной результат.

$X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$, где $x_i \in \{0,1,...,k_r - 1\}$, $k_r \in [2,...,N], N \in Z$ – входные данные $X_i = \{x_1(y_i), x_2(y_i), ..., x_n(y_i)\}$, $i = 1,...,n$, $y_i \in Y, Y = \{y_1, y_2, ..., y_m\}$ – выходные данные:

$$\begin{pmatrix} x_1(y_1) & x_2(y_1) & ... & x_n(y_1) \\ x_1(y_2) & x_2(y_2) & ... & x_n(y_2) \\ ... & ... & ... & ... \\ x_1(y_m) & x_2(y_m) & ... & x_n(y_m) \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ ... \\ y_m \end{pmatrix}.$$

Каждый нейрон в сети имеет свой набор весов, который позволяет ему распознавать элементы заданной предметной области, основываясь на наборе признаков. Важным преимуществом является использование прямых сумм для формирования архитектуры и настройки параметров сети без необходимости решения сложных оптимизационных задач.

Это позволяет аппроксимировать зависимость между входными и выходными данными и использовать нейронную сеть для обработки и анализа объектов в заданной предметной области [7].

Задача логической интерпретации прямых сумм нейронной сети заключается в нахождении функций многозначной логики, которые при применении к тем же входным данным, что и нейронная сеть, дают те же самые выходные значения.

Другими словами, мы стремимся найти логические выражения или правила, которые могут точно описать и объяснить решения, принимаемые нейронной сетью. Это позволяет нам иметь более понятное и интерпретируемое представление работы сети, используя понятные логические операции и правила.

Таким образом, логическая интерпретация прямых сумм нейронной сети помогает нам перевести сложные вычисления и принятие решений сети в понятные логические формулы или правила, что может быть полезным для понимания и объяснения работы сети, а также проверки и верификации ее действий [6].

Алгоритм нахождения функций, соответствующих прямой сумме

Рассмотрим систему многозначной логики, на которой определены операции $L = \left\langle L, \bar{x}, \&, \vee, \bar{}, \to \right\rangle$, $L = \{0,1,...,k-1\}$, множество функций обобщенного сложения, обозначаемое как Σ. Цель состоит в том, чтобы найти это множество функций, удовлетворяющих условию $Y = f(X)$.

Все искомые функции $\sigma(x, y)$ должны обладать следующим свойством: $\sigma(x,0) = \sigma(0, x) = x$, будем называть их функциями обобщенного сложения.

Требуется найти множество таких функций Σ, которые удовлетворяют еще одному условию – $\Sigma(a_1,...,a_{n-1}, a_n) = y$.

Алгоритм строим в виде дерева решений.

Предположим, что у нас есть *k* возможных значений для переменной, где *k* может быть любым числом. Хотя конкретное значение неизвестно, оно должно принимать одно из *k* возможных значений. Следовательно, у нас есть *k* разветвлений в дереве, соответствующих этим возможным значениям.

Мы можем представить это в виде условий, где каждое условие проверяет значение и перенаправляет нас по соответствующей ветке дерева. Условия могут быть записаны следующим образом:

Будем считать, что $\Sigma(a_1,...,a_{n-1}, a_n) = \Sigma(a_1,...,a_{n-1}) + a_n = \sigma(\Sigma(a_1,...,a_{n-1}), a_n)$. Величина $\Sigma(a_1,...,a_{n-1})$ неизвестна, но она должна принимать одно из значений $L = \{0,1,...,k-1\}$. Будет выполнено одно из *k* условий:

$$\Sigma(a_1,...,a_{n-1}) = 0,\ \Sigma(a_1,...,a_{n-1}) = 1\ ,\ldots,\ \Sigma(a_1,...,a_{n-1}) = k-1. \quad (1)$$

Значит,

$$\Sigma(0, a_n) = y,\ \Sigma(1, a_n) = y,\ \ldots,\ \Sigma(k-1, a_n) = y, \quad (2)$$

т.е. получаем *k* разветвлений дерева.

На следующем шаге рассмотрим следующее соотношение $\Sigma(a_1,...,a_{n-1}) = \Sigma(a_1,...,a_{n-2}) + a_{n-1} = \sigma(\Sigma(a_1,...,a_{n-2}), a_{n-1})$ с учетом сформулированных ранее предположений относительно значений $\Sigma(a_1,...,a_{n-1})$, т.е. каждая из ветвей (2) разобьется в свою очередь еще на *k*.

Для построения этих функций мы можем создать дерево решений, которое будет иметь *k* разветвлений, где *k* – количество возможных значений для переменной. Каждое разветвление в дереве будет соответствовать одному из возможных значений переменной. Мы проверяем значение переменной и переходим по соответствующей ветви дерева, чтобы определить, какую функцию из множества Σ использовать.

Таким образом, каждое условие в дереве будет проверять значение переменной и направлять нас по соответствующей ветви в дереве, где мы применяем соответствующую функцию обобщенного сложения из множества Σ [8].

Это позволяет нам построить множество функций, которые учитывают различные значения переменной и обеспечивают гибкость и адаптивность в принятии решений на основе входных данных.

Пример 1. Рассмотрим систему трехзначной логики, где мы хотим построить решающую функцию на основе множества функций обобщенного сложения Σ $L = \left\langle L, \bar{x}, \&, \vee, \bar{}, \to \right\rangle$, $L = \{0,1,2\}$. Для достижения этой цели мы создаем дерево решений, которое имеет несколько ветвлений, соответствующих возможным значениям переменной. Каждое ветвление в дереве представляет определенное значение переменной, и на каждом уровне дерева мы применяем соответствующую функцию обобщенного сложения из множества Σ.

Пусть задано: $\Sigma\left(1,0,\frac{1}{2},1\right) = \frac{1}{2}$.

Ветвь 1. $\Sigma\left(1,0,\frac{1}{2}\right) = 0 \Rightarrow$ необходимо, чтобы $\Sigma(0,1) = \frac{1}{2}$, но это противоречит условию $\sigma(x,0) = \sigma(0,x) = x$. Значит, путь в дереве не существует.

Ветвь 2. $\Sigma\left(1,0,\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \Rightarrow \Sigma\left(\frac{1}{2},1\right) = \frac{1}{2}$. Путь существует. $\Sigma(1,0) = 0$ – невозможно, путь в дереве не существует.

2. $\Sigma(1,0) = \frac{1}{2}$ – невозможно, путь в дереве не существует.

3. $\Sigma(1,0) = 1$ – возможно.

Продолжаем цепочку: $\Sigma(1,0) = 1$, $\Sigma\left(1,\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}$, $\Sigma\left(\frac{1}{2},1\right) = \frac{1}{2}$. Рассмотрим 3-ю ветвь:

$\Sigma\left(1,0,\frac{1}{2}\right) = 1 \Rightarrow \Sigma(1,1) = \frac{1}{2}$.

Такое возможно, поэтому строим ветви далее:

1. $\Sigma(1,0) = 0$ – невозможно, путь в дереве не существует.

2. $\Sigma(1,0) = \frac{1}{2}$ – невозможно, путь в дереве не существует.

3. $\Sigma(1,0) = 1$ – возможно. Восстановим цепочку действий и получим:

$$\Sigma(1,0)=1,\ \Sigma\left(1,\frac{1}{2}\right)=1,\ \Sigma(1,1)=\frac{1}{2}.$$

Таким образом, если мы рассмотрим таблицу истинности без учета свойства коммутативности (табл. 2), то она будет отражать значения функции в соответствии с заданными входами независимо от порядка аргументов.

Однако если мы учтем свойство коммутативности, то получим таблицу истинности, которая отражает значения функции, учитывая возможность изменения порядка аргументов (табл. 3). Это означает, что результаты функции будут одинаковыми независимо от того, какой из аргументов является первым, а какой вторым.

Учет коммутативности позволяет упростить анализ и понимание функции, поскольку мы можем рассматривать только уникальные комбинации аргументов, а не все возможные перестановки. Это также позволяет нам обобщить и применять функцию к различным наборам аргументов, сохраняя при этом одинаковые значения функции [9–11].

Таким образом, учет коммутативности в таблице истинности помогает нам упростить анализ функции и рассматривать ее более обобщенным образом, не зависящим от конкретных порядков аргументов.

Табл. 1. / Table 1.

	0	$\frac{1}{2}$	1
0	0	$\frac{1}{2}$	1
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$
1	1	$\frac{1}{2}$	

Табл. 2. / Table 2.

	0	$\frac{1}{2}$	1
0	0	$\frac{1}{2}$	1
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		1
1	1		$\frac{1}{2}$

Табл. 3. / Table 3.

	0	$\frac{1}{2}$	1
0	0	$\frac{1}{2}$	1
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		1
1	1	1	$\frac{1}{2}$

Для данного примера мы имеем таблицу истинности, где занятые ячейки соответствуют необходимым условиям для выполнения заданного тождества, а пустые ячейки соответствуют несущественным условиям. Каждая свободная ячейка может принимать три возможных значения: 0, пусто и 1. Это означает, что каждая свободная ячейка порождает три варианта, которые могут быть заполнены.

Исходя из этого, мы можем определить точное количество функций в классе решений, то есть мощность этого класса.

В случае таблицы 1 количество функций в классе решений составляет 9, поскольку мы не предполагаем свойство коммутативности заранее и исследуем все возможные комбинации значений аргументов.

В случае таблицы 2 количество функций в классе решений также составляет 9. Однако если мы считаем свойство коммутативности наперед заданным, то количество функций в классе решений будет равно 3 (табл. 3).

Таким образом, утверждается, что коммутативность уменьшает мощность множества допустимых решений, поскольку количество свободных ячеек в таблице истинности уменьшается.

Можно утверждать, что существует алгоритм, который позволяет определить, можно ли выразить заданную функцию в виде формулы, используя операции обобщенного сложения. Алгоритм применяется построчно к заданной функции, представленной в виде таблицы истинности, а затем полученные результаты пересекаются. Если результирующее

множество пересечений не пусто, это означает, что может быть найдена группа решающих функций. Если же пересечение пусто, это означает, что заданную зависимость нельзя представить одной функцией, но можно подобрать минимальное количество функций, которые удовлетворяют решениям нейронной сети.

Заключение

Исследования в области логических функций и их применение в анализе данных предоставляют нам инструменты для выявления скрытых закономерностей и решения различных задач. Предложенные алгоритмы, основанные на построении таблиц истинности и учете коммутативности, позволяют получить логические функции, которые могут быть рассмотрены как адекватные локальные решатели поставленных задач.

Логические функции, полученные в результате этих алгоритмов, представляют собой формулы, состоящие из операций обобщенного сложения. Обобщенное сложение позволяет нам объединять и комбинировать значения переменных, учитывая их взаимодействие и влияние друг на друга. Такие функции обладают свойствами полноты и замкнутости относительно логических операций, что делает их мощным инструментом для анализа и обработки данных.

Применение этих логических функций в анализе данных позволяет нам выявить скрытые закономерности и зависимости между переменными. Они позволяют нам моделировать сложные взаимосвязи и отношения, которые сложно выразить другими методами. Путем применения этих функций к различным наборам данных мы можем обнаруживать не только явные закономерности, но и более скрытые и нетривиальные зависимости.

REFERENCES

1. *Журавлев Ю. И.* Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. 1978. Т. 33. С. 5–68.

Zhuravlev Yu.I. On the algebraic approach to solving problems of recognition or classification. *Problemy kibernetiki* [Problems of cybernetics]. 1978. Vol. 33. Pp. 5–68. (In Russian)

2. *Шибзухов З. М.* Корректные алгоритмы агрегирования операций // Распознавание образов и анализ изображений. 2014. № 3–24. С. 377–382.

Shibzukhov Z.M. Correct algorithms for aggregating operations. *Raspoznavaniye obrazov i analiz izobrazheniy* [Pattern recognition and image analysis]. 2014. No. 3–24. Pp. 377–382. (In Russian)

3. Naimi A.I., Balzer L.B. Multilevel generalization: an introduction to super learning. *European Journal of Epidemiology*. 2018. Vol. 33. Pp. 459–464.

4. Wang H., Smith S. Big data analysis and perturbation using a data mining algorithm. *Journal of Soft Computing Paradigm*. 2021. No. 3–01. Pp. 19–28.

5. Joe MrK Vijesh, Jennifer S. Raj User Recommendation System Dependent on Location-Based Orientation Context. *Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology*. 2021. No. 3–01. Pp. 14–23.

6. Grabisch M., Marichal J-L., Pap E. Aggregation functions. Cambridge University Press. 2009. Vol. 127. P. 16.

7. Calvo T., Belyakov G. Aggregating functions based on penalties. *Fuzzy sets and systems*. 2010. No. 10–161. Pp. 1420–1436.

8. Mesiar R., Komornikova M., Kolesarova A., Calvo T. Fuzzy aggregation functions: a revision. Sets and their extensions: representation, aggregation and models. Springer-Verlag. Berlin, 2008.

9. Yang F., Yang Zh., Cohen W.W. Differentiable learning of logical rules for reasoning in the knowledge base. *Advances in the field of neural information processing systems*. 2017. Pp. 2320–2329.

10. *Флах П.* Машинное обучение: наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. Москва: ДМК Пресс, 2015. 400 с.

Flach P. *Mashinnoye obucheniye: nauka i iskusstvo postroyeniya algoritmov, kotoryye izvlekayut znaniya iz dannykh* [Machine learning: the science and art of building algorithms that extract knowledge from data]. Moscow, DMK Press, 2015. 400 p. (In Russian)

11. Lyutikova L.A., Shmatova E.V. Algorithm for constructing logical operations to identify patterns in data. *E3S Web of Conferences*, Moscow, November 25–27, 2020. Vol. 224. P. 01009.

Информация об авторе

Лютикова Лариса Адольфовна, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом 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;

lylarisa@yandex**,** ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4941-7854

Information about the author

Lyutikova Larisa Adolfovna, Candidate of Physical and Mathematics Sciences, Head 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;

lylarisa@yandex**,** ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4941-7854

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.4:681.5.015.5 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-116-124
EDN: GKYLVI

Моделирование и оптимизация модулей и информационных массивов в киберфизической системе

Т. В. Аветисян, Я. Е. Львович, А. П. Преображенский, Ю. П. Преображенский

Воронежский институт высоких технологий
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а

Аннотация. В настоящее время в производственной сфере мы можем наблюдать внедрение и активное развитие элементов киберфизических систем. В такой системе происходит процесс циркуляции больших объемов данных. В статье рассмотрены особенности решения задач, связанных с оптимизацией процессов обработки информации в киберфизических системах на производственных предприятиях. Необходимо решить задачи оптимизации ресурсов, используемых при формировании киберфизических систем на основе входящих в них компонентов. Рассмотрены два этапа. На первом этапе проводится решение динамических задач, связанных с тем, что осуществляется синтез модулей киберфизической системы. Второй этап связан с тем, что информационные массивы в киберфизической системе должны быть оптимальным образом размещены в модуле управления. Представленный в работе подход может быть применен в ходе анализа различных киберфизических систем.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, киберфизическая система, информация, управление

Поступила 16.10.2023, одобрена после рецензирования 28.11.2023, принята к публикации 08.12.2023

Для цитирования. Аветисян Т. В., Львович Я. Е., Преображенский А. П., Преображенский Ю. П. Моделирование и оптимизация модулей и информационных массивов в киберфизической системе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 116–124. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-116-124

MSC: 65–11 Review article

Modeling and optimization of modules and information arrays in a cyberphysical system

T.V. Avetisyan, Ya.E. Lvovich, A.P. Preobrazhensky, Yu.P. Preobrazhensky

Voronezh Institute of High Technologies
394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street

Abstract. Nowadays in the production sphere we can observe the introduction and active development of elements of cyber-physical systems. In such a system there is a process of circulation of large amounts of data. The article considers the peculiarities of solving problems related to the optimization of information processing in cyber-physical systems at manufacturing enterprises. It is necessary to solve the problems of optimization of resources used in the formation of cyber-physical systems on the basis of components included in them. Two stages are considered. At the first stage, the solution of dynamic problems related to the fact that the synthesis of cyber-physical system modules is carried out. The second stage is related to the fact that information arrays in the cyber-physical system should be optimally placed in the control module. The approach presented in this paper can be applied in the course of analyzing various cyber-physical systems.

© Аветисян Т. В., Львович Я. Е., Преображенский А. П., Преображенский Ю. П., 2023

Keywords: modeling, optimization, cyber-physical system, information, control

Submitted 16.10.2023, approved after reviewing 28.11.2023, accepted for publication 08.12.2023

For citation. Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhensky A.P., Preobrazhensky Yu.P. Modeling and optimization of modules and information arrays in a cyberphysical system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 116–124. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-116-124

Введение

Когда синтезируются информационные массивы внутри киберфизических систем, требуется решение нескольких задач. Важно в этих массивах определить содержание, рассмотреть особенности их организации, построение алгоритмов поиска информации, осуществить размещение информации внутри памяти модулей, входящих в состав киберфизических систем. Модули могут входить в структуру различным образом. Одним из ключевых параметров является время обмена информацией между модулями. Эффективность функционирования киберфизических систем может быть повышена за счет осуществления процедуры оптимального синтеза при учете состава модулей, особенностей связей между ними и уменьшения времени передачи информации.

Можно выделить несколько этапов в ходе решения задач.

На первом этапе проводится решение динамических задач, связанных с тем, что осуществляется синтез модулей киберфизической системы. При этом каждый из модулей используется с определенной частотой, им ставятся в соответствие информационные массивы, которых задано определенное количество. Минимизацию обмена между элементами памяти и памятью в модуле управления можно рассматривать в виде критерия оптимизации, когда решается такая задача.

Второй этап связан с тем, что информационные массивы в киберфизической системе должны быть оптимальным образом размещены внутри модуля управления. При решении таких задач ориентируются на соответствующие критерии. Они связаны или с минимизацией затрат, необходимых для использования информационных массивов или с минимизацией времени, которое требуется для того, чтобы осуществить обмен с модулем управления.

Анализ особенностей, связанных с тем, как ведется оптимизация процессов в киберфизических системах

Можно указать, что когда ведется проектирование по киберфизическим системам, в ряде случаев требуется привлечение интеграционных подходов. Например, если рассматривается теория проектирования Девопс [1], то в ней учитывается, что разрыв будет уменьшаться среди разработок и осуществлением модернизации, которая есть внутри жизненного цикла. Когда рассматривают практическое использование, то осуществляют переходы от водопадных моделей к применению циклических и спиральных моделей [2]. Есть другие подходы, основанные на ITIL (Information Technology Infrastructure Library – библиотека инфраструктуры информационных технологий). Тогда возникают возможности для того, чтобы снижать разрыв по этапам в ходе реализации жизненного цикла в киберфизических системах [3, 4]. В существующих условиях есть методики, связанные с тем, что учитываются свойства вариабельности (agility), которые относятся к киберфизическим системам [5]. Необходимо, чтобы целостность данных была обеспечена в ходе привлечения протоколов управления, которые связаны с киберфизическими системами [6]. Представляет интерес проведение анализа по тому, как использовать модули в киберфизических системах для получения больших значений эффективности.

Методика определения модулей и массивов в киберфизической системе

При определении количества и содержания информационных массивов дадим постановку соответствующей задачи. Будем считать, что в состав киберфизической системы входит множество модулей $M = \{m_1, m_2, \dots, m_v, .., m_V\}$. Они функционируют с определенной частотой Q_v, $v = \overline{1,V}$. Рассматривается множество информационных элементов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_z, .., d_Z\}$. Используется матрица, на основе которой информационные элементы будут осуществлять связь с модулями киберфизической системы $B = ||b_{vz}||$. В ней $b_{vz} = 1$, если происходит считывание или запись v-м модулем z-го информационного элемента, в противном случае $b_{vz} = 0$. $U = \{u_1, u_2, \dots, u_z, .., u_Z\}$ рассматривается в виде вектора. Для него размеры информационных элементов, которые анализируются, будут определяться на основе компонентов [1, 2].

Множества информационных элементов, которые оптимальным образом распределены, должны быть определены внутри информационных массивов. При этом необходимо выполнение условия по минимальному числу обменов системы модулей киберфизической системы с управляющим модулем с учетом того, что существуют ограничения по размерам и сложности информационных массивов.

Есть возможности для того, чтобы применять описание на основе двудольного графа $G(M, D, B^{m(a)})$. В нем $M = \{ m_v, v = \overline{1,V} \}$ является множеством модулей в киберфизической системе, $D = \{d_z, z = \overline{1,Z}\}$ рассматривается как множество информационных элементов в киберфизической системе, на основе множества дуг $B^{m(a)}$ происходит определение связей информационных элементов и модулей. При этом применяется матрица смежности $B^{m(a)} = ||{b_{vz}}^{m(a)}||$.

Если анализировать графовую задачу, то в ней можно обозначить соответствующую формулировку. Необходимо по двудольному графу провести процесс синтеза. При этом важно обеспечить минимальное число дуг. Для информационных массивов, в зависимости от их размеров и сложности, будут существовать соответствующие ограничения. Множество информационных массивов, которое рассматривается, представляется как $B = \{b_s, s = \overline{1,S}\}$, множество массивов и множество модулей будут связываться на основе соответствующего множества дуг $K^{m(a)}$. При этом необходимо определить матрицу смежности $K = ||{k_{vs}}^{m(a)}||$. Можно определить переменные таким образом: ${k_{vs}}^{m(a)} = 1$ при выполнении условия $\sum_{z=1}^{Z} {b_{vz}}^{m(a)} \cdot x_{zs} \geq 1$ и ${k_{vs}}^{m(a)} = 0$ при выполнении условия $\sum_{z=1}^{Z} {b_{vz}}^{m(a)} \cdot x_{zs} = 0$. В случае, когда в s-й массив происходит распределение z-го информационного элемента, будем считать, что $x_{zs} = 1$. В противном случае $x_{zs} = 0$. Тогда есть возможность задачу синтеза сформулировать таким образом:

$$\min_{\{x_{zs}\}} \sum_{v=1}^{V} \sum_{s=1}^{S} Q_v({k_{vs}}^{m} + {k_{vs}}^{a})\Sigma, \tag{1}$$

с учетом ограничений: N_s – по общему числу информационных элементов внутри массива:

$$\sum_{z=1}^{Z} x_{zs} \leq N_s, \quad s = \overline{1,S}, \tag{2}$$

$N1_s$ – по объему массива:

$$\sum_{z=1}^{Z} \beta_z \cdot x_{zs} \le N1_s, \quad s = \overline{1,S}, \tag{3}$$

по дублированию элементов для различных массивов:

$$\sum_{s=1}^{S} x_{zs} = 1, \quad \forall_z = \overline{1,Z}, \tag{4}$$

по совместимости элементов внутри одного массива:

$$x_{zs} + x_{z's} \le 1 \tag{5}$$

с учетом того, заданы d_z и $d_{z'}$ – модули киберфизической системы.

Тогда можно говорить о том, что мы пришли к задаче нелинейного программирования. По ней получение точного решения может быть обеспечено на основе схемы «ветвей и границ». Применяется такая схема для того, чтобы осуществлять процесс ветвления. Первый элемент соответствует первому массиву. Второй элемент соответствует первому или второму массиву. Третий элемент соответствует первому, второму или третьему массиву и т.д.

Для всего множества решений в задаче требуется указание точной нижней оценки *E1*. Она определяется таким образом:

$$E1 = 2 \cdot \sum_{v=1}^{V} Q_v .$$

В случае, когда все информационные элементы распределяются, такая оценка может быть получена. Эти элементы будут в одном массиве при обработке внутри модулей информационной системы. Когда каждый из информационных элементов будет распределен в отдельный массив, то по задаче можно получить точную оценку $E2$ во всем множестве решений:

$$E1 = \sum_{v=1}^{V} \sum_{s=1}^{S} Q_v \cdot b_{vz} .$$

Чтобы для u-й вершины ветвления дать оценку по любому из подмножеств решений E_u, необходимо использовать такое выражение [3–4]

$$E_u = E1 + \Delta E_u ,$$

здесь ΔE_u – рассматривается для u-й вершины, в которой осуществляется ветвление.

Существует зависимость значения ΔE_u от того, какое множество переменных $\{x_{zs}\}$, которые относятся к u-й вершине, когда реализуется процесс ветвления. Вычисление ΔE_u реализуется следующим способом:

$$\Delta E_u = \sum_{v=1}^{V} Q_v (P_v^{\,m} + P_v^{\,a}) .$$

Здесь $P_v^{\,m(a)} = k_{vz}^{\,m(a)} - 1$, когда $\sum_{z=1}^{W_u} k_{vz}^{\,m(a)} - 1 > 0$, $P_v^{\,m(a)} = 0$, когда $\sum_{z=1}^{W_u} k_{vz}^{\,m(a)} - 1 \le 0$, W_u рассматривается в виде количества формируемых массивов, которые будут относиться к u-й вершине, когда реализуется процесс ветвления.

Мы исходим из того, получено решение задачи, формулы (1)–(5), которое представляется соответствующим образом. Следующим шагом является переход к решению задачи, когда полученные массивы будут организованы с использованием оптимальных подходов. Необходимо, чтобы происходила их загрузка в управляющий модуль.

Внутри модулей киберфизической системы необходимо стремиться к тому, чтобы было минимизировано время, в течение которого происходит обработка данных. Помимо этого, важно, чтобы при использовании, хранении и формировании информационных массивов обеспечивалась минимизация по общим затратам. Это может считаться критериями при рассмотрении соответствующих задач.

Дадим обозначения, которые используются при рассмотрении в ходе реализации решения.

При обработке данных происходит рассмотрение множества задач $I = \{1,2,\dots,i,\dots,I_0\}$, если для киберфизической системы к задаче i модуль v будет относиться, то в матрице $N = ||n_{iv}||$ значение $n_{iv} = 1$, иначе $n_{iv} = 0$, при записи в модуль v информационного массива z в матрице $M = ||{m_{iv}}^{m(a)}||{m_{iv}}^{m(a)} = 1$, иначе ${m_{iv}}^{m(a)} = 0$. В анализируемой системе частота решения задачи будет P_i. По v-му модулю будет частота применения q_{vi} при решении i-й задачи. В случае формирования z-го информационного массива число информационных элементов будет N_z. С учетом этого, L_z показывает в z-м информационном массиве число записей, тогда $R_z=N_zL_z$ соответствует в информационном массиве объему. C_0 – в вычислительном устройстве значение стоимости единицы времени. C_θ – в θ-м модуле памяти значение стоимости времени. S_θ – в θ-м модуле памяти значение стоимости памяти. $\tau_{v\theta}$ – время передачи информации для v-го модуля киберфизической системы от θ-го модуля памяти. ${\tau_{z\mu}}^{\theta(m),a} = 0$, $\tau_{z\mu\theta}$ – показывает при использовании θ-го модуля памяти с привлечением μ-го способа время передачи информации, которое соответствует z-му информационному массиву. T_v – вычислительное время, которое относится к v-му модулю в киберфизической системе. d_v – размер модуля в киберфизической системе. $\Delta\tau_v$ – вычислительное время, которое связано с поиском v-го модуля в киберфизической системе. $\Delta\tau_z$ – вычислительное время, связанное с тем, что считывается z-й информационный массив. ${\Delta\tau_z}^m$ – вычислительное время, связанное с тем, что происходит считывание z-го информационного массива. ${\Delta\tau_z}^a$ – вычислительное время, связанное с тем, что происходит запись z-го информационного массива.

Используем альтернативные переменные: ${x_{z\mu}}^\theta = 1$, если организация информационного массива осуществляется на основе μ-го метода, ${x_{z\mu}}^\theta = 0$ – в противном случае, ${y_v}^\theta = 1$, если v-й модуль в киберфизической системе содержит θ-й модуль памяти, ${y_v}^\theta = 0$ – в противном случае [6–8].

Тогда можно рассмотреть задачу, которая связана с тем, каким образом будут выбираться оптимальные подходы по формированию структуры информационных массивов, обеспечению связей между модулями в киберфизической системе и информационными массивами с учетом требований по минимизации затрат всей системы.

Для того чтобы определить полные затраты, необходимо рассмотреть сумму основных затрат C_1 и затрат на функционирование C_2. Чтобы определить затраты C_1, требуется опираться на следующее выражение:

$$C_1 = \sum_{\theta=1}^{\theta_0} S_\theta \cdot \Big(\sum_{v=1}^{V} d_v y_v^\theta + \sum_{s=1}^{S} \sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^\theta \Big) \cdot d_\theta^{-1}.$$

В затратах C_2 мы можем выделить следующие компоненты: стоимость работы вычислительного устройства C_{21}, стоимость формирования адресной таблицы C_1, стоимость процессов чтения и записи между модулями в киберфизической системе и управляющим модулем C_{23}. Чтобы указанные компоненты были определены, необходимо опираться на следующие выражения [9–11]:

$$C_{21} = C_0 \cdot \sum_{i=1}^{I} P_i \cdot \sum_{v=1}^{V} n_{iv} \cdot g_v^i \cdot T_v = C_0 \cdot \sum_{v=1}^{V} Q_v \cdot T_v ,$$

$$C_{23} = \sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_\theta \{ \sum_{i=1}^{I_0} P_i \sum_{v=1}^{V} n_{iv} g_{iv} [(\tau_v^\theta y_v^\theta + \sum_{s=1}^{S} \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}{}^m t_{s\mu}{}^{\theta(m)} + m_{vs}{}^a t_{s\mu}{}^{\theta(a)}))] \} =$$

$$= \sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_\theta \{ \sum_{v=1}^{V} Q_v [(\tau_v^\theta y_v^\theta + \sum_{s=1}^{S} \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}{}^m t_{s\mu}{}^{\theta(m)} + m_{vs}{}^a t_{s\mu}{}^{\theta(a)}))] \},$$

$$C_1 = C_0 \cdot [\sum_{i=1}^{I} P_i \cdot \sum_{v=1}^{V} n_{iv} \cdot g_v^i \cdot \Delta\tau_v + \sum_{i=1}^{I} P_i \cdot \sum_{v=1}^{V} n_{iv} \cdot g_v^i \cdot (m_{vs}{}^m \Delta t_s{}^m + m_{vs}{}^a t_s{}^a)] .$$

После преобразований получаем

$$\min_{\{ y_v^\theta x_{s\mu}^\theta \}} \{ [(\sum_{v=1}^{V} d_v y_v^\theta + \sum_{s=1}^{S} \sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^\theta) + d_\theta^{-1}] +$$

$$+ \sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_\theta \{ \sum_{v=1}^{V} Q_v [(\tau_v^\theta y_v^\theta + \sum_{s=1}^{S} \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}{}^m t_{s\mu}{}^{\theta(m)} + m_{vs}{}^a t_{s\mu}{}^{\theta(a)}))] \} \qquad (6)$$

с учетом ограничений: T_i – время, которое требуется для передачи информации от модулей киберфизической системы к управляющему модулю, когда будет решаться i-я задача:

$$\sum_{v=1}^{V} n_{iv} g_{iv} [(\tau_v^\theta y_v^\theta + \sum_{s=1}^{S} \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}{}^m t_{s\mu}{}^{\theta(m)} + m_{vs}{}^a t_{s\mu}{}^{\theta(a)}))] \le T_i , \qquad (7)$$

G_v – по применяемому модулю памяти θ-го типа:

$$\sum_{v=1}^{V} a_v y_v^\theta + \sum_{s=1}^{S} \sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^\theta \le G^\theta , \theta = 1,2,...,\theta_0, \qquad (8)$$

по совместному взаимодействию модулей киберфизической системы, информационных массивов с модулем памяти θ-го типа:

$$y_v^\theta + x_{s\mu}^\theta \le 1, \qquad (9)$$

когда будут рассматриваться различные носители, на которых размещаются модули памяти киберфизической системы, то задаются v и (s,μ).

$$\sum_{v=1}^{V} y_v^\theta = 1, v = \overline{1,V} \qquad (10)$$

по размещению массивов киберфизической системы на различных носителях

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0}\sum_{\theta=1}^{\theta_0} y_{s\mu}^{\theta}=1, s=\overline{1,S}, \tag{11}$$

при использовании носителей, имеющих определенный тип, когда размещаются модули и массивы внутри киберфизических систем

$$\sum_{v=1}^{V} y_v^{\theta}=0, \textit{если задано } \theta, \tag{12}$$

$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{\mu=1}^{\mu_0} x_{s\mu}^{\theta}=0, \textit{для заданного } \theta. \tag{13}$$

С точки зрения практического использования могут быть проанализированы задачи, в которых: 1) реализуется выбор по оптимальным способам, связанным с тем, как организуются массивы и модули, которые есть во внешней памяти; 2) реализуется выбор по оптимальным способам, в которых время обработки данных будет минимизироваться.

Если рассматривается первый случай, то критерий представляется формулой [12, 13] таким образом:

$$\min_{\{x_{s\mu}^{\theta}, y_v^{\theta}\}} \sum_{\theta=1}^{\theta_0}\sum_{v=1}^{V} Q_v[\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{\mu=1}^{\mu_0}(m_{vs}{}^{m}t_{s\mu}{}^{\theta(m)} + m_{vs}{}^{a}t_{s\mu}{}^{\theta(a)})], \tag{14}$$

для второго случая

$$\min_{\{x_{s\mu}^{\theta}, y_v^{\theta}\}} \sum_{v=1}^{V} n_{iv}P_i g_v^i[\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{\mu=1}^{\mu_0}(m_{vs}{}^{m}t_{s\mu}{}^{\theta(m)} + m_{vs}{}^{a}t_{s\mu}{}^{\theta(a)})]. \tag{15}$$

В представленных задачах, помимо ограничений, представленных формулами (7)–(13), необходимо учесть дополнительное ограничение, связанное с общими затратами H по формированию и функционированию системы обмена данными:

$$\sum_{\theta=1}^{\theta_0} S_{\theta}[(\sum_{v=1}^{V} d_v y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^{\theta}) + d_{\theta}^{-1}] +$$

$$+\sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_{\theta}\{\sum_{v=1}^{V} Q_v[(\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{\mu=1}^{\mu_0}(m_{vs}{}^{m}t_{s\mu}{}^{\theta(m)} + m_{vs}{}^{a}t_{s\mu}{}^{\theta(a)}))]\} \le H.$$

Формулы (6), (14) и (15) отражают задачи линейного программирования с булевыми переменными.

Результаты моделирования

В ходе моделирования по представленной методике было рассмотрено 15 модулей и 20 информационных массивов в киберфизической системе. Разработана имитационная модель, на основе которой проводились исследования. Реализация имитационной модели была в среде C++. В качестве дополнительного условия предлагается учитывать, что информационные массивы не дублируются.

Используемый алгоритм рассматривался как сформированный на основе двух частей. Первая из них связана с тем, что реализуется процесс сортировки по множеству модулей (n) и информационных массивов (m). При этом установлено, что требуется для того, чтобы были осуществлены вычисления, $O(n(m + \log(n)))$ времени.

Во второй части алгоритма происходила реализация методики оптимизации. Число операций, которые были необходимы, не превышает k. Эксперименты показали, что итоговое время работы рассмотренного алгоритма составляет O(n(k+m + log())). Если ведется определение по целочисленному решению, то важно по каждому из нецелочисленных параметров сделать разделение решения относительно 2 ветвей: по первой ветви рассматривается x= 0; по второй ветви считается, что x >= 1, и требуется, чтобы был осуществлен процесс пересчета по нижней границе решения. После этого был осуществлен выбор по решению, которое соответствует наименьшей границе. Целочисленное решение определялось при осуществлении итерационного пересчета по параметрам.

Полученный состав информационных массивов дает возможности для того, чтобы осуществить сокращение обращений модулей информационной системы к синтезированной системе массивов на 35% по сравнению с произвольным их размещением.

Выводы

Представленный в работе подход является достаточно общим. Он может использоваться для широкого класса киберфизических систем, которые могут являться распределенными. В дальнейшем подход может быть обобщен для киберфизических систем, имеющих переменную структуру.

REFERENCES

1. Len Bass, Ingo Weber, Liming Zhu. DevOps A Software Architect’s Perspective. NJ: Addison-Wesley Professional, 2015.

2. Richard W. Selby. Software Engineering: Barry W. Boehm's Lifetime Contributions to Software Development, Management, and Research. *John Wiley & Sons.* 2007. 834 p.

3. *Ингланд Р*. Овладевая ITIL. М.: Лайвбук, 2011. 200 с.

England R. *Ovladevaya ITIL* [Mastering ITIL]. M.: Live Book, 2011. 200 p. (In Russian)

4. The Open Group architecture framework. URL: http://www.opengroup.org/togaf.

5. Babar M.A., Brown A.W., Mistrik I. Agile software architecture aligning agile processes and software architectures. MA, USA: Morgan Kaufmann, 2014.

6. *Мещеряков Р. В., Исхаков А. Ю., Евсютин О. О.* Современные методы обеспечения целостности данных в протоколах управления киберфизических систем. Тр. СПИИРАН, 2020. Вып. 19. Т. 5. С. 1089–1122. DOI: https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.5.71

Meshcheryakov R.V., Iskhakov A.Y., Evsyutin O.O. Modern methods of ensuring data integrity in control protocols of cyberphysical systems. *Tr. SPIIRAN,* 2020. No. 19. Vol. 5. Pp. 1089–1122. DOI: https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.5.71. (In Russian)

7. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. Modeling the processes of increasing the efficiency of the internet of things system. In the collection: *Proceedings – 2022, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2022*. Pp. 1030–1034.

8. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. Modeling the classification of internet of things objects by failures. In the collection: *Proceedings – 2022, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022*. Pp. 1035–1039.

9. Lvovich I.Y., Preobrazhenskiy A.P., Lvovich Y.E., Choporov O.N. Algorithmization of control of information and telecommunication systems based on the optimization model.

Procedia Computer Science. Ser. "14th International Symposium "Intelligent Systems", INTELS 2020. 2021. Pp. 563–570.

10. Lvovich I.Ya., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Y.P. et al. The investigation of the characteristics of conflicts in industrial organizations based on modeling. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Pp. 477–481.

11. Lvovich I., Preobrazhenskiy A., Lvovich Y., Choporov O. Optimization of internet of things system. *Communications in Computer and Information Science*. 2021. Vol. 1448. Pp. 135–148.

12. Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P. et al. Models for evaluating the performance of complex information and communication systems. *Journal of Physics: Conference Series*. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 22099.

13. Sanfelice R.G. et al. Analysis and design of cyber-physical systems. A hybrid control systems approach. Cyber-physical systems: From theory to practice. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016. Pp. 1–29.

Информация об авторах

Аветисян Татьяна Владимировна, преподаватель, Колледж Воронежский институт высоких технологий;
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;
vtatyana_avetisyan@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3559-6070

Львович Яков Евсеевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий;
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;
office@vivt.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7051-3763

Преображенский Андрей Петрович, д-р техн. наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий;
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;
app@vivt.ru**,** ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6911-8053

Преображенский Юрий Петрович, канд. техн. наук, доцент, проректор по ИТ, Воронежский институт высоких технологий;
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;
office@vivt.ru

Information about the authors

Avetisyan Tatiana Vladimirovna, Lecturer, College of the Voronezh Institute of High Technologies;
394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;
vtatyana_avetisyan@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3559-6070

Lvovich Yakov Evseyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies;
394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;
office@vivt.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7051-3763

Preobrazhensky Andrei Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies;
394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;
app@vivt.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6911-8053

Preobrazhensky Yury Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for IT, Voronezh Institute of High Technologies;
394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;
office@vivt.ru

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.8 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-125-131
EDN: HZNHCC

Система виртуального моделирования робототехнических систем сельскохозяйственного назначения

М. И. Анчёков, А. М. Лешкенов

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В данной работе предложена система виртуального моделирования сельскохозяйственных роботов. Проведен анализ существующих систем моделирования. Сформулированы требования к системе виртуального моделирования, которая позволит решать задачи коллективной роботизированной борьбы с сорняками и задачи высокопроизводительного фенотипирования.

Ключевые слова: системы виртуального моделирования, робототехника, борьба с сорняками, фенотипирование

Поступила 30.11.2023, одобрена после рецензирования 07.12.2023, принята к публикации 10.12.2023

Для цитирования. Анчёков М. И., Лешкенов А. М. Система виртуального моделирования робототехнических систем сельскохозяйственного назначения // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 125–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-125-131

MSC: 68T40 Original article

System for virtual simulation of robotic systems for agricultural purposes

M.I. Anchekov, A.M. Leshkenov

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. This paper proposes a system for virtual simulation of agricultural robots. An analysis of existing simulation systems was carried out. Requirements for a virtual simulation system are formulated, which will allow solving problems of collective robotic weed control and high-throughput phenotyping.

Keywords: virtual simulation systems, robotics, weed control, phenotyping

Submitted 30.11.2023, approved after reviewing 07.12.2023, accepted for publication 10.12.2023

For citation. Anchekov M.I., Leshkenov A.M. System for virtual simulation of robotic systems for agricultural purposes. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 125–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-125-131

Введение

Виртуальное моделирование робототехнических систем является важным этапом их создания. Оно позволяет быстро проверять гипотезы, сравнивать разные подходы, рассчитывать экономическую эффективность и т.д. Отсутствие круглогодичной возможности натурных экспериментов при разработке сельскохозяйственных роботов, предназначен-

© Анчёков М. И., Лешкенов А. М., 2023

ных для высокопроизводительного фенотипироавния и борьбы с сорняками, актуализирует задачу разработки систем виртуального моделирования.

На данный момент существуют системы виртуального моделирования, которые можно условно разделить на два больших класса: специализированные системы и системы на основе графических (игровых) движков.

К специализированным можно отнести ROS/Gazebo, Isaac SDK, CoppeliaSim (бывшая V-REP). К системам, основанным на игровых движках, можно отнести системы на основе Unity3d, Unreal Engine.

ROS/Gazebo – программный комплекс, состоящий из взаимодействующих элементов, которые развиваются сообществом отдельно. ROS (Robot Operating System) предоставляет набор программ и библиотек, который позволяет решать широкий спектр задач (системы автоматического управления, алгоритмы поиска пути, реализация сенсорной и эффекторной системы роботов и т.д.). Gazebo – это 3D физический симулятор робототехнических систем, который основывается на физическом движке ODE [1, 2]. Моделирование на основе предложенного программного комплекса позволяет создавать симуляции с высокой степенью физической корректности, пользоваться большим количеством готовых решений и де-факто является стандартом в области моделирования роботов.

В случае, если есть необходимость решать высокопроизводительные задачи как на этапе моделирования, так и на этапе внедрения, можно воспользоваться дополнениями к ROS, реализованными компанией NVIDIA в программном комплексе NVIDIA Isaac ROS [1]. Данное решение можно назвать инфраструктурным, так как оно позволяет уже на этапе моделирования сориентироваться на высокопроизводительном вычислителе, который будет установлен на реальном роботе, и начать его использовать.

CoppeliaSim является программой, которую разрабатывает Coppelia Robotics AG. При установке CoppeliaSim [3] мы получаем готовую среду моделирования, в которой уже имеется некоторое количество готовых примеров, документация.

Виртуальное моделирование на основе игровых движков Unity3D [4, 5], Unreal Engine [6] позволяет создавать достаточно детализированные симуляции. Однако изначально они создавались для других целей, и процесс разработки виртуальной модели может занять много времени.

Постановка задачи

На наш взгляд, все вышеуказанные системы обладают своими положительными характеристиками, однако у них есть один достаточно большой минус – высокий порог вхождения. Так, некоторые системы (ROS/Gazebo, Isaac SDK, CoppeliaSim) способны моделировать физическое взаимодействие между роботами и роботами и средой. Данная возможность очень полезна на том этапе разработки, когда уже есть чертежи и макеты проектируемого изделия, известные массогабаритные характеристики основных узлов, силомоментные характеристики приводов и т.д. Однако на этапе создания систем распознавания, принятия решений и управления решение этих проблем может занять достаточно много времени и, что еще хуже, потребовать постоянного пересмотра полученных решений в процессе дальнейших исследований.

Другие системы (Unity3D, Unreal Engine) являются полноценными игровыми движками (game engine), которые открывают практически неограниченные возможности для визуализации и моделирования роботототехнических систем, однако требуют значительного вклада труда программистов.

[1] https://developer.nvidia.com/isaac-ros

Таким образом, к основным требованиям разрабатываемой системы можно отнести: низкий порог вхождения, открытость системы для расширения, гибкую настройку функциональности, возможность сетевого взаимодействия, отсутствие привязки к конкретному языку программирования.

Описание среды

Основными структурными элементами разрабатываемой системы являются: виртуальное поле, роботы (летающие и наземные), растения (культурные и сорные). Виртуальное поле представляет собой клеточный мир. Каждая клетка поделена на ярусы (рис. 1).

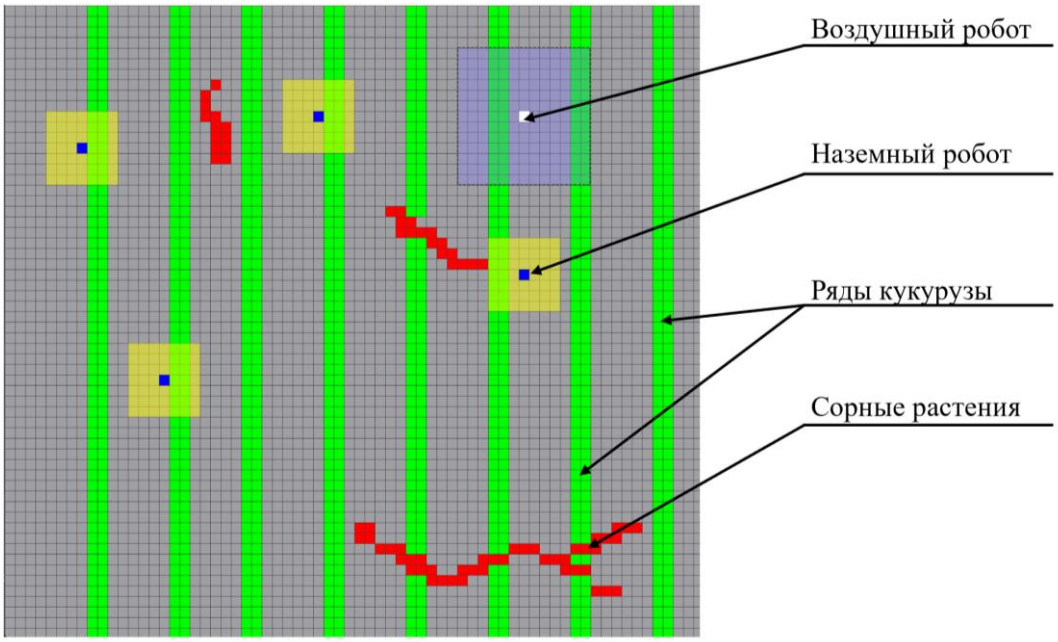


Рис. 1. *Виртуальное поле*

Fig. 1. *Virtual field*

Каждый из ярусов содержит информацию, которая необходима для моделирования. Так, первый ярус содержит информацию о дронах, которые в данный момент времени находятся в воздухе. Второй ярус содержит информацию о культурных или сорных растениях. В общем случае информация представляет собой структурированное описание растений (биологические и/или хозяйственно полезные признаки) и графическое представление растений.

Третий ярус предназначен для хранения информации о роботах. В каждой клетке находится информация о роботе, который ее занимает.

Четвертый ярус отвечает за хранение информации о свойствах почвенного слоя. Данная информация нужна для последующего моделирования конкуренции растений и моделирования роботов для анализа почвы.

Для настройки виртуальной среды необходимо указать размеры виртуальной среды в клетках. Для начального этапа моделирования целесообразным является выбор масштаба 1 клетка = 1 м^2. Для детального моделирования следует выбирать масштаб 1 клетка = 1/16 м^2.

Вид и месторасположение культурных растений задаются файлом конфигурации, который описывает, какое культурное растение находится в конкретной клетке.

Расположение сорных растений может определяться как файлом конфигурации, в котором указано месторасположение, так и генерироваться на основе статистической информации, которая есть у пользователя.

Описание роботов

С точки зрения программирования роботы представляют собой класс (рис. 2), у которого обязательно должны быть определены сенсоры окружающей среды, сенсор сообщений от других роботов, эффекторы движения, отправки сообщений и воздействия на окружающую среду. Также роботы должны иметь систему управления. Здесь под системой управления понимается система управления в широком смысле, которая включает в себя систему распознавания, принятия решений и, собственно, систему управления.

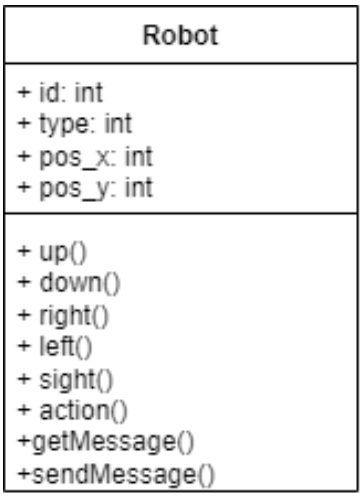


Рис. 2. *UML диаграмма класса Robot*

Fig. 2. *UML diagram of the Robot class*

Описание растений

В общем случае описание растений можно осуществлять тремя способами:

– статистическим, когда задаются законы пространственного распределения растения и интервалы характеристик, из которых случайным образом выбираются значения конкретного растения;

– детерминированным, когда каждое растение описывается в общем случае кортежем из двух элементов: структурированным описанием и графическим представлением.

– комбинированным, который сочетает в себе первые два способа, например, конкретные положения описываются детерминированным способом, а значения в структурированном описании задаются статистическим.

Такой подход позволит в дальнейшем решать задачи моделирования фенотипирования с помощью роботов.

Далее представлен пример структурного описания кукурузы на основе формата JSON.

```
{
"id":1000,
"pos":{"x":5, "y":7},
"name":"maize",
"height":2.2,
"cob":{
  "1":{"mounting height":0.9, "size":0.15},
  "2":{"mounting height":1.3, "size":0.17 }
}
"number of leaves": 5
}
```

где: id – уникальный номер растения;
pos – координаты растения;
name – название растения;
height – высота растения;
cob – секция описывает початки, высоту их крепления (mounting height), размер (size);
number of leaves – количество листьев.

В случае необходимости описание можно расширить информацией о фазе роста и времени достижения конкретной фазы роста.

Описание взаимодействия

Важным аспектом создания среды моделирования являются механизмы взаимодействия составных элементов.

Взаимодействие робот-растение. Как воздушные, так и наземные роботы могут получать информацию только из области видимости, т.е. находятся в частично наблюдаемой среде. Предполагается, что у воздушных роботов область видимости шире, чем у наземных. Конкретные значения задаются на этапе настройки системы моделирования перед запуском. Для систем управления, которые готовы работать с информацией от реальных датчиков, возможно применить процедуру рандомизации, которая изменяет заранее заданные показания сенсорной системы на величину погрешности измерения с заданным законом распределения. Данная процедура позволит решить проблему переобучения, когда система распознавания не строит закономерности, а запоминает конкретные значения. Для решения задач моделирования процесса борьбы с сорняками необходимо реализовать механизм воздействия робота на растение. Для этого в описание как культурных, так и сорных растений добавляется параметр *health*, который является безразмерным и описывает интегральное состояние «здоровья» растения и принимает значение от 0 до 100, где 0 – растение мертвое, 100 – растение абсолютно здорово. Если растение находится в области воздействия робота, робот может изменить значение *health* растения, тем самым имитировать процесс воздействия на растение. Если учесть, что информация о сорных и культурных растениях поступает по одному каналу, роботу необходимо принимать решение о том, как он будет взаимодействовать с каждым растением.

Взаимодействие робот-робот. Для моделирования коллективных эффектов роботам необходимо предоставить возможность обмениваться сообщениями. В зависимости от целей моделирования возможна гибкая настройка среды обмена сообщениями. Так, возможно реализовать обмен сообщениями всех со всеми или ограничить радиус отправки/приема сообщений конкретными значениями, за пределами которых невозможно получить или отправить сообщение.

Взаимодействие робот-среда. Параметры, которые описывают данное взаимодействие, позволяют гибко управлять степенью физической корректности среды. Так, можно задать «стоимость» передвижения роботов и таким образом моделировать процесс выбора оптимального пути. Например, наземные роботы имеют возможность передвигаться только вдоль рядов кукурузы и, соответственно, должны в принятии решений это учитывать, а воздушные роботы не имеют таких ограничений, однако должны учитывать более высокую стоимость (или энергозатратность) своего перемещения. Таким образом, подобный поход позволяет моделировать процесс борьбы с сорными растениями и оценивать экономическую эффективность полученных результатов.

Сетевое взаимодействие и обеспечение бесперебойности процесса моделирования

Предлагаемая система виртуального моделирования не привязывается к определенным формализмам, с помощью которых разрабатывается система управления робота. Для подключения системы управления к роботу можно воспользоваться двумя механизмами. Первый механизм основан на системе модулей языка Python, когда система управления реализована на языке Python или есть программный интерфейс, позволяющий обратиться к ней с помощью языка Python. Второй механизм основан на так называемой клиент-серверной архитектуре. Система управления конкретного робота может физически находиться на другом компьютере, но при этом обмениваться с сервером по протоколу http. Данный подход обладает большей универсальностью, так как снимает ограничение на совместимость с языком Python.

Задача обеспечения бесперебойности процесса моделирования особо актуальна в случае, если моделирование занимает достаточно продолжительный период времени. В предлагаемой системе она решается за счет периодического сохранения промежуточных этапов в базу данных, к которым можно будет вернуться в случае, если произошел сбой.

Заключение

В статье описаны основные существующие системы виртуального моделирования сельскохозяйственных роботов. Показана актуальность разработки системы моделирования, которая обладает новыми свойствами и лишена недостатков предыдущих систем. Дальнейшее развитие предложенной системы моделирования необходимо расширить, добавив возможность моделирования вредителей и болезней растений.

REFERENCES

1. Zhao S., Hwang S.-H. Complete coverage path planning scheme for autonomous navigation ROS-based robots. *ICT Express.* 2023.

2. Albonico M. et al. Software engineering research on the Robot Operating System: A systematic mapping study. *Journal of Systems and Software.* 2023. Vol. 197. P. 111574.

3. Ribeiro J.P.L. и др. Computational Simulation of an Agricultural Robotic Rover for Weed Control and Fallen Fruit Collection–Algorithms for Image Detection and Recognition and Systems Control, Regulation, and Command. *Electronics.* 2022. Vol. 11. No. 5. P. 790.

4. Wang C. и др. Virtual Simulation of Fruit Picking Robot Based on Unity3D. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1631. No. 1. P. 012033.

5. *Аверкин А. Н. и др.* Разработка моделей и алгоритмов для беспилотного управления сельскохозяйственной техникой с применением технологий виртуальной и дополненной реальности // Вестник ТГТУ. 2020. № 4.

Averkin A.N. et al. Development of models and algorithms for unmanned control of agricultural machinery using virtual and augmented reality technologies. *Vestnik TGTU*. 2020. No. 4. (In Russian)

6. Jiang C. et al. Co-simulation of the Unreal Engine and MATLAB/Simulink for Automated Grain Offoading. *IFAC-PapersOnLine.* 2022. Vol. 55. No. 24. Pp. 379–384.

Информация об авторах

Анчёков Мурат Инусович, науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X

Лешкенов Аслан Мухамедович, зав. лабораторией «Сельскохозяйственная робототехника», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9516-3213

Information about the authors

Anchekov Murat Inusovich, Researcher of the Laboratory “Molecular selection and biotechnology”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X

Leshckenov Aslan Muhamedovich, Head of the Laboratory “Agricultural robotics”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360002, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9516-3213

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.89 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-132-141
EDN: IDMWRY

Кооперативное взаимодействие участников гетерогенного коллектива автономных агентов с использованием нейрокогнитивных моделей согласованного поведения*

К. Ч. Бжихатлов[1], И. А. Пшенокова[2], О. В. Нагоева[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. В статье представлены концепция и алгоритм работы системы кооперативного взаимодействия гетерогенного коллектива автономных агентов на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры. Кроме того, представлен процесс формирования общего графа проблемной ситуации в процессе планирования выполнения коллективной миссии, полученной человеко-машинным коллективом. Подобная система необходима для реализации согласованного целенаправленного поведения гетерогенных человеко-машинных коллективов. Актуальность исследования определяется необходимостью разработки алгоритма кооперативного взаимодействия участников гетерогенного коллектива автономных агентов для развития теории и практики создания интеллектуальных систем принятия решений и управления на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

Ключевые слова: мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры, мультиагентные системы, автономный агент, коллаборативная робототехника

Поступила 29.11.2023, одобрена после рецензирования 07.12.2023, принята к публикации 09.12.2023

Для цитирования. Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А., Нагоева О. В. Кооперативное взаимодействие участников гетерогенного коллектива автономных агентов с использованием нейрокогнитивных моделей согласованного поведения // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 132–141. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-132-141

MSC: 68T42; 68T40 Review article

Cooperative interaction of participants in a heterogeneous team of autonomous agents using neurocognitive models of coordinated behavior*

K.Ch. Bzhikhatlov[1], I.A. Pshenokova[2], O.V. Nagoeva[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

© Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А., Нагоева О. В., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-19-00787).

* The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22-19-00787).

Abstract. The concept and algorithm of operation of a system of cooperative interaction of a heterogeneous team of autonomous agents based on a multi-agent neurocognitive architecture are presented in the article. The article also describes the process of forming a general graph of a problem situation in the process of planning the implementation of a collective mission received by a human-machine team. Such a system is necessary to implement coordinated, goal-oriented behavior of heterogeneous human-machine teams. The relevance of the study is determined by the need to develop an algorithm for cooperative interaction between participants in a heterogeneous team of autonomous agents for the development of the theory and practice of creating intelligent decision-making and control systems based on multi-agent neurocognitive architectures.

Keywords: multi-agent neurocognitive architectures, multi-agent systems, autonomous agent, collaborative robotics

Submitted 29.11.2023, approved after reviewing 07.12.2023, accepted for publication 09.12.2023

For citation. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A., Nagoeva O.V. Cooperative interaction of participants in a heterogeneous team of autonomous agents using neurocognitive models of coordinated behavior. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 132–141. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-132-141

Введение

Расширение сферы применения роботов связано с рядом сопутствующих задач. В том числе при работе в сложных и труднопрогнозируемых условиях совместно с людьми и другими автономными роботами становится вопрос обеспечения согласованного поведения участников коллаборативной системы. Здесь под участниками системы понимаются автономные роботы, программы и люди, объединенные в общий гетерогенный мультиагентный человеко-машинный коллектив. При этом одним из перспективных способов организации коммуникации в подобном коллективе представляется использование диалоговых систем на основе интеллектуальной системы принятия решений (искусственного интеллекта). Такой подход обеспечивает совместимость с такими общими глобальными концепциями информатизации, как цифровая экономика, обволакивающий интеллект, интернет вещей, всепроникающие и встроенные вычисления (ubiquitous and embedded computing) [1]. Используя сервис диалоговой системы, человек сможет общаться, давать различные команды и ставить определенные задачи любым интеллектуальным агентам, как полностью программным, так и встроенным в систему управления роботом или устройством, на некотором ограниченном подмножестве естественного языка [2]. Наличие возможности быстрой эффективной коммуникации с интеллектуальными агентами с помощью диалогового интерфейса над специализированными подмножествами естественного языка позволит добиться уровня и интенсивности взаимодействия роботов под управлением таких интеллектуальных агентов и людей [3], необходимых для создания коллаборативных гетерогенных человеко-машинных систем коллективного поведения, настраиваемых на совместное согласованное решение сложных проблем.

Основная проблема, связанная с синтезом таких когнитивных архитектур, состоит в значительной вариативности конфигураций, структуры и состава когнитивных узлов [4]. Разработчик должен определиться с выбором соответствующих параметров для того, чтобы при применении когнитивной архитектуры сохранялся баланс между вычислительной эффективностью и семантической целостностью решений задач интеллектуальной обработки информации [5]. В когнитивных архитектурах на основе децентрализованных вычислителей, например в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре [6], эта проблема решается на основе применения алгоритмов динамического развития распределенной вычислительной конфигурации когнитивной архитектуры на основе мультиагентной кооперации между агентами-вычислителями.

1. Концепция кооперативного взаимодействия гетерогенного коллектива автономных агентов

При решении сложных задач в труднопрогнозируемой среде необходимо обеспечение надежной системы взаимодействия между всеми агентами, участвующими в решении задачи. При этом для достижения поставленных целей могут быть использованы группы автономных робототехнических и программных систем различного вида [7]. Кроме того, для обеспечения эффективной работы подобной группы гетерогенных автономных агентов в нее могут быть включены операторы-люди как для постановки миссий, так и для контроля и содействия при их выполнении. При этом становится актуальной задача обеспечения согласованного поведения подобного человеко-машинного коллектива.

Учитывая сложность задач, выполняемых группами роботов в частично наблюдаемых и труднопрогнозируемых условиях внешней среды, в качестве основы для реализации системы принятия решений необходимо применение интеллектуальных систем управления [8]. В данной работе рассматривается система управления гетерогенным коллективом на основе рекурсивных мультиагентных нейрокогнитивных архитектур [9]. Данный формализм предполагает реализацию интеллектуальной системы управления за счет моделирования поведения головного мозга в виде мультиагентной системы. При этом в отличие от классических искусственных нейронных сетей нейрон рассматривается как отдельный актор с собственной целевой функцией максимизации внутренней энергии, собственной базой знаний, возможностью обмениваться информацией и заключать мультиагентные контракты с другими нейронами.

Стоит отметить, что принцип рекурсивности мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры предполагает возможность вложенности систем интеллектуального принятия решений друг в друга при сохранении принципов организации функционирования и взаимодействия акторов на разных уровнях рекурсии. В частности, на рисунке 1 показана архитектура мультиагентной системы принятия решений, включающей в себя несколько интеллектуальных агентов. Они в свою очередь состоят из мультиагентных моделей нейронов, которые также состоят из отдельных акторов.

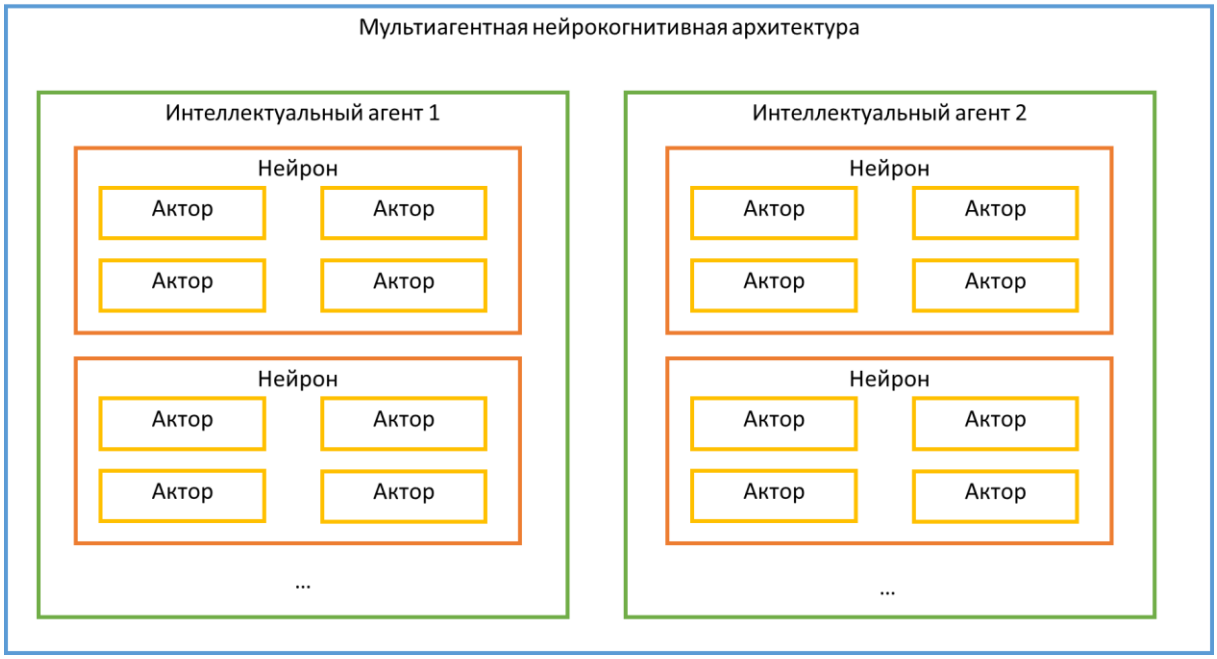


Рис. 1. *Архитектура рекурсивной мультиагентной системы принятия решений*

Fig. 1. *Architecture of a recursive multi-agent decision-making system*

Подобная архитектура позволит организовать независимое моделирование систем принятия решений отдельных программных и робототехнических агентов в одной общей архитектуре. То есть на каждом уровне рекурсии реализуются возможности планирования поведения актора, пополнения собственных баз знаний, обмен сообщениями и заключение контрактов между акторами одного уровня. Подобная архитектура предполагает, что каждый отдельный интеллектуальный агент отвечает за систему принятия решений отдельного робота или программы. Кроме того, отдельные интеллектуальные агенты могут использоваться для моделирования возможного поведения независимых активных акторов в системе (операторы, другие люди, роботы, не входящие в данный коллектив). Это позволит обеспечить обмен сообщениями между всеми участниками коллектива.

Работу человеко-машинного коллектива условно можно разделить на этапы: постановка миссии, планирование, выполнение, контроль результатов и отчет. При этом чаще всего инициализатором миссии выступает человек-оператор. Для этого необходимо предусмотреть возможность взаимодействия с некоторыми из роботов и программных агентов за счет естественно-языкового интерфейса [10]. При этом сами роботы и программные агенты могут обмениваться данными, используя и другие протоколы передачи данных. В частности, для обеспечения сбора данных с общей сенсорной подсети возможна прямая передача сигнала с датчиков между системами управления автономными роботами. Кроме того, интеллектуальные агенты, отвечающие за моделирование поведения отдельных акторов имеют возможность обмениваться сообщениями в рамках работы мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры. Кроме того, реализация системы распознавания речи позволит применять и естественно-языковой интерфейс между роботами. Данный подход приведет к излишней нагрузке на вычислительную систему, но при этом позволит легко интегрировать человека в машинный коллектив и упростит работу операторам. Структура взаимодействия акторов человеко-машинного коллектива показана на рисунке 2.

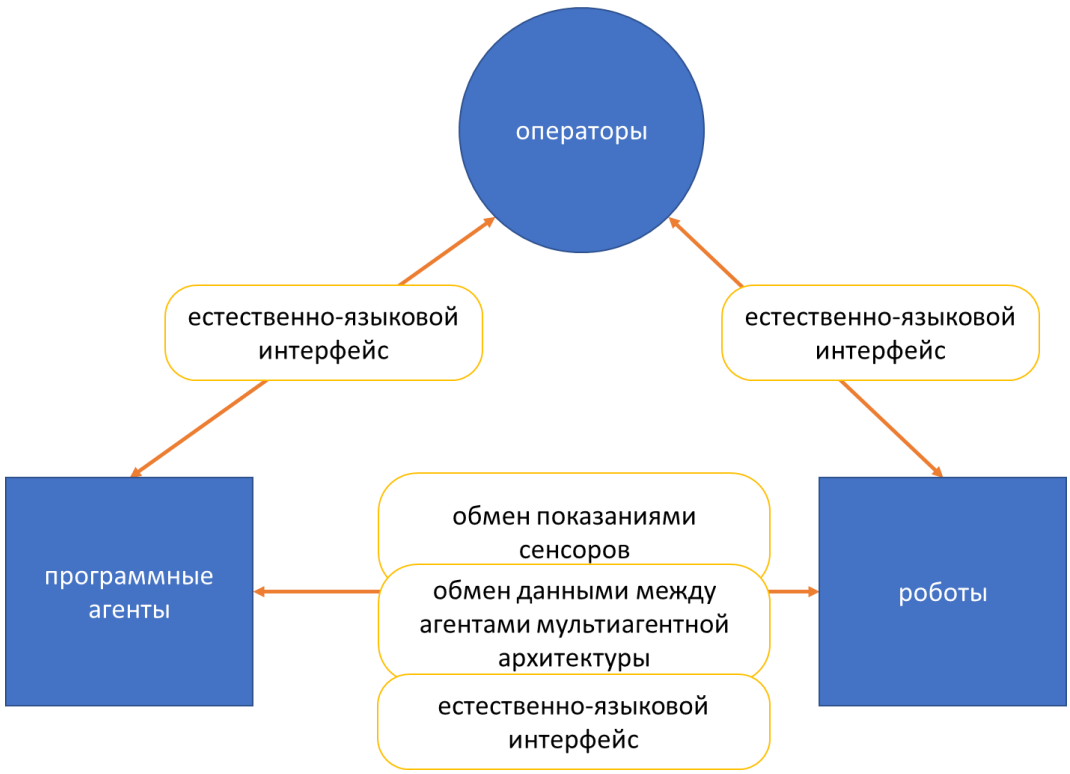


Рис. 2. *Структура взаимодействия акторов человеко-машинного коллектива*

Fig. 2. *Structure of interaction between actors of a human-machine team*

Отдельно стоит рассмотреть процесс группового планирования действий при получении коллективной миссии. Коллективная миссия – это задача синтеза согласованного поведения всех участников гетерогенного коллектива (людей, автономных роботов и программных агентов) для достижения поставленных целей. При этом процесс синтеза поведения каждого агента состоит в построении графа проблемной ситуации. Пример графа показан на рисунке 3. На рисунке круг обозначает состояние системы «агент – среда», квадрат – возможные действия агента, а треугольник – возможную реакцию внешней среды на действия агента.

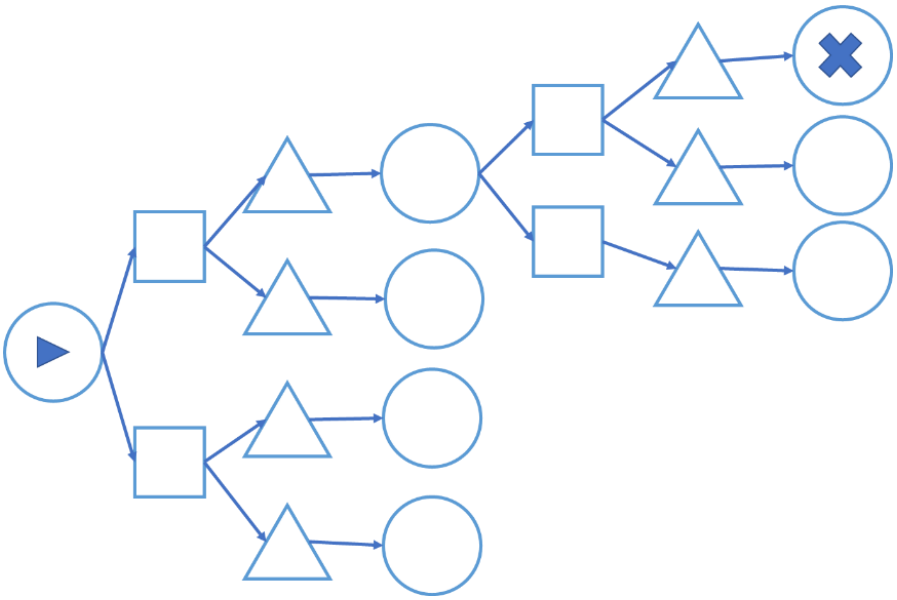


Рис. 3. *Пример графа проблемной ситуации отдельного участника человеко-машинного коллектива*

Fig. 3. *An example of a graph of a problem situation for an individual participant in a human-machine team*

Начальной вершиной графа является текущее состояние системы «агент – среда», а искомой вершиной – целевое состояние. Каждое состояние характеризуется набором событий, связанных с агентом или окружающей средой и характеризующих данное состояние. Каждое состояние соединено дугами графа с одним или несколькими возможными действиями агента, которые в свою очередь могут привести к одному или нескольким вариантам реакции внешней среды. В результате на графе генерируются новые вершины с описанием набора возможных состояний среды, которые также ведут к генерации очередного набора «действие – реакция – состояние». Задача системы принятия решений – построить подобный граф до тех пор, пока в нем не появится вершина, соответствующая целевому состоянию среды (выполнению поставленной задачи), и найти наиболее эффективный путь к этой вершине. Причем эффективность пути определяется не длиной траектории на графе, а некоторой метрикой, построенной самим интеллектуальным агентом (например, минимизацией затраченной роботом энергии).

При построении графа проблемной ситуации для коллективной миссии в состав вершин включаются все события, зафиксированные участниками коллектива. При этом такая модель текущего (или возможного) состояния требует коллективной оценки, то есть каждый агент по отдельности оценивает сумму событий, входящих в вершину графа. Также вместо действия одного агента необходимо рассмотреть действия или бездействие всех участников коллектива. Здесь стоит отметить, что агенты-люди в данной модели могут

быть рассмотрены либо как акторы, чьими действиями можно управлять (если система принятия решений в рамках поставленной миссии имеет право ставить задачи операторам), или как активные агенты внешней среды, чью реакцию можно только смоделировать с некоторым уровнем достоверности. Часть графа проблемной ситуации для коллектива агентов приведена на рисунке 4.

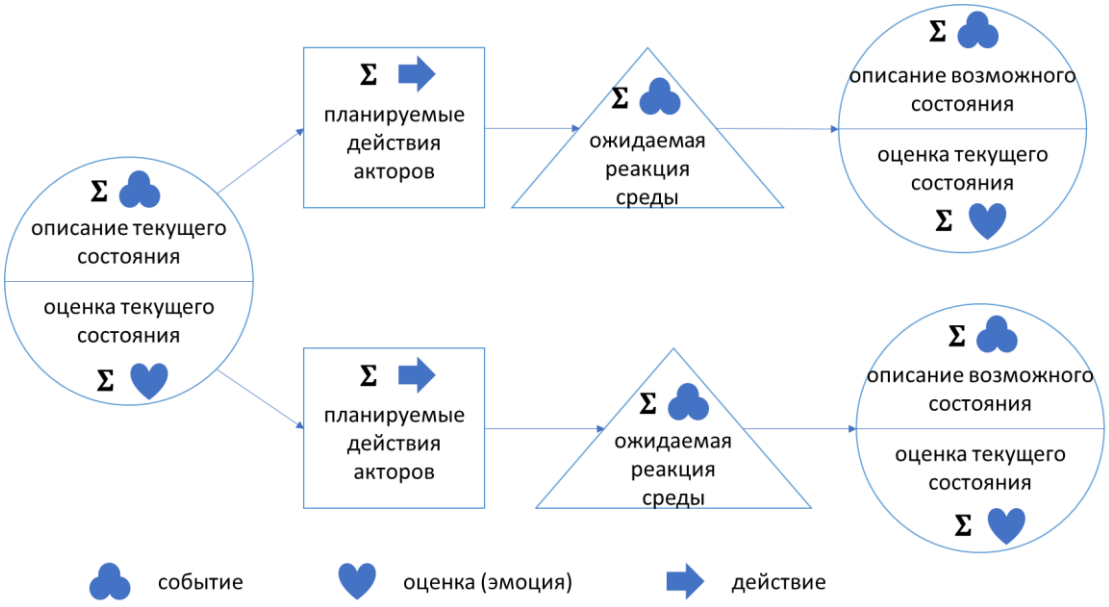


Рис. 4. *Граф проблемной ситуации при решении коллективной миссии*

Fig. 4. *Graph of a problem situation when solving a collective mission*

При построении данного графа возникает необходимость оценки достоверности событий, входящих в каждую вершину (верхняя часть круга на рисунке). Это связано с тем, что в коллективе роботов появляется возможность верифицировать некоторые данные, например, наличие выброса в показаниях датчиков у одного робота при отсутствии его у других может стать причиной невключения информации о данном событии в модель текущего состояния системы «агенты – среда». Кроме того, если среди исполнительных устройств системы принятия решений есть люди, становится отдельная подзадача расчета вероятности невыполнения ими поставленной задачи (в виде еще одной ветки с реакцией среды). Оценка нахождения целевой вершины ложится либо на доверенного интеллектуального агента, либо принимается при согласованном решении интеллектуальных агентов в системе.

2. Программная реализация кооперативного взаимодействия гетерогенного коллектива автономных агентов

Описанная выше архитектура интеллектуальной системы принятия решений может быть реализована как на базе единого вычислительного устройства, так и за счет распределенных вычислений на базе каждого робота в коллективе. При этом разработанная мультиагентная архитектура не требует каких-либо изменений при масштабировании и переносе на множество отдельных ЭВМ. Архитектура системы принятия решений, развернутой на одном сервере, показана на рисунке 5. В этом случае каждый участник человеко-машинного коллектива представлен набором сенсоров и эффекторов в мультиагентной архитектуре. Такая архитектура имеет более высокие требования к вычислительной возможности ЭВМ и надежности системы связи роботов с сервером.

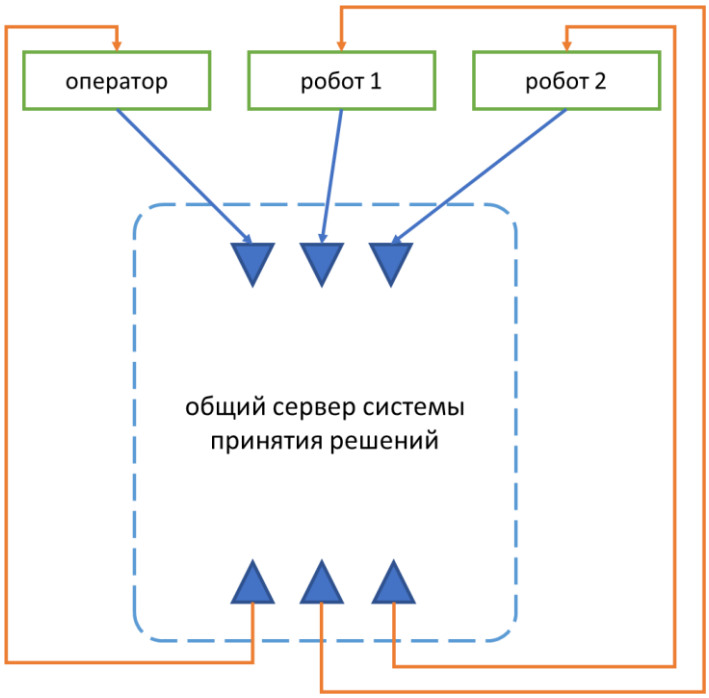


Рис. 5. *Архитектура системы принятия решений на одном сервере*

Fig. 5. *Architecture of a decision-making system on one server*

Напротив, при реализации распределенной архитектуры каждый программный и робототехнический агент запускает часть мультиагентной архитектуры на собственной бортовой ЭВМ. Распределенная реализация мультиагентной архитектуры принятия решений показана на рисунке 6.

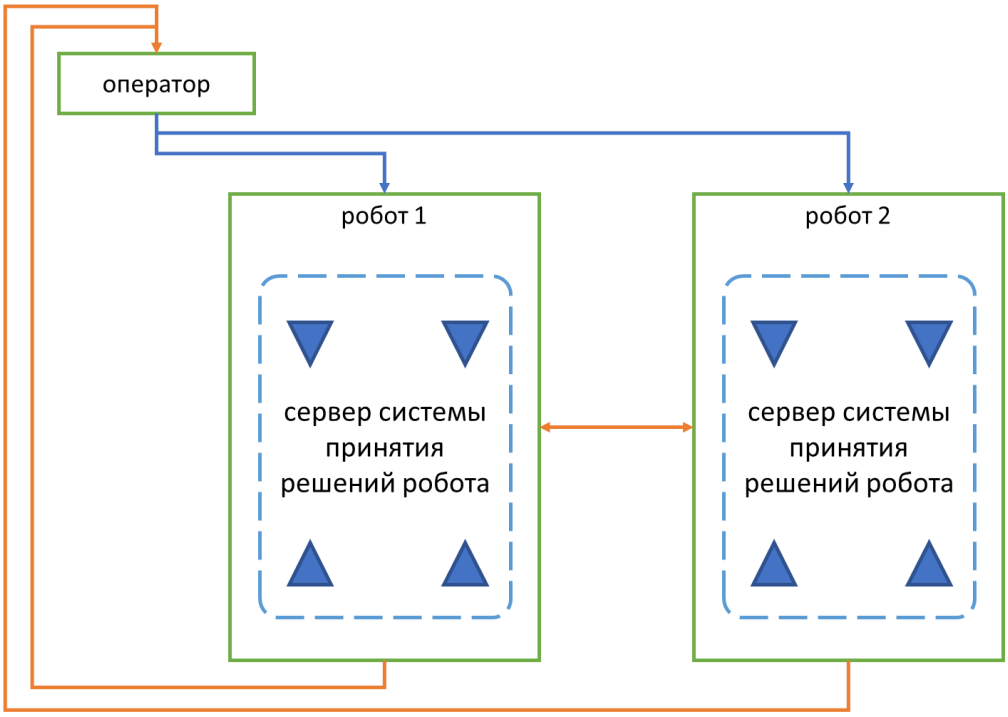


Рис. 6. *Архитектура распределенной реализации системы принятия решений*

Fig. 6. *Architecture of a distributed implementation of a decision-making system*

В этом случае оператор может взаимодействовать с системой принятия решений (ставить миссии, получать задания и запрашивать отчеты) через любого из роботов. При этом каждый робот моделирует отдельного интеллектуального агента (или нескольких агентов при наличии вычислительных ресурсов) и передает все сообщения другим участникам коллектива за счет беспроводной связи или естественно-языкового интерфейса.

Заключение

Представленная система кооперативного взаимодействия участников гетерогенного коллектива автономных агентов может быть использована для обеспечения согласованного управления человеко-машинными коллективами и может контролировать основные процессы выполнения поставленной задачи. Алгоритм создания общего графа проблемной ситуации для коллективной миссии учитывает данные от всех участников человеко-машинного коллектива и направлен на максимизацию эффективности работы всей системы в целом, при этом может быть распределен на множество отдельных вычислительных устройств. Описанная архитектура построена на мультиагентной нейрокогнитивной модели системы принятия решений, что должно обеспечить возможность простого масштабирования и эффективного обучения интеллектуального агента. Архитектура обеспечивает эффективный и удобный протокол обмена данными как между автономными роботами, так и между роботом и человеком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. 2-е издание. Москва: Вильямс, 2007. 1424 с. ISBN 0-13-790395-2.

2. *Бжихатлов К. Ч., Канкулов С. А., Малышев Д. А. и др.* Интерактивное формирование пространственных онтологий автономного робота на основе нейрокогнитивных моделей семантики // Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону, 2021. С. 147–154.

3. *Нагоев З. В., Пшенокова И. А., Нагоева О. В.* Автоматическая реконструкция характера и темперамента пользователей на основе мультиагентного обучения нейрокогнитивных моделей сознательного и бессознательного по данным о поведении пользователя в сети интернет // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 6(104). С. 66–77.

4. *Нагоев З. В., Сундуков З. А., Пшенокова И. А., Денисенко В. А.* Архитектура САПР распределенного искусственного интеллекта на основе самоорганизующихся нейрокогнитивных архитектур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 2(94). С. 40–47.

5. *Кулинич А. А.* Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 2. С. 95–106.

6. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 232 с.

7. *Gorodetskii V.I., Karsayev O.V., Samoylov V.V., Serebryakov S.V.* Applied multiagent systems of group control // Scientific and Technical Information Processing. 2010. Vol. 37. No. 5. Pp. 301–317.

8. *Awni Hannun.* The Role of Evolution in Machine Intelligence. 2021.

9. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z.* Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures // Cognitive Systems Research. 2021. Vol. 66. Pp. 82–88.

10. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2022. 150 с.

REFERENCES

1. Russell S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod* [Artificial Intelligence: A Modern Approach]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2007. 1424 p. ISBN 0-13-790395-2. (In Russian)

2. Bzhikhatlov K.Ch., Kankulov S.A., Malyshev D.A. et al. *Interaktivnoye formirovaniye prostranstvennykh ontologiy avtonomnogo robota na osnove neyrokognitivnykh modeley semantiki* [Interactive formation of spatial ontologies of an autonomous robot based on neurocognitive models of semantics]. *Materialy XVI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii i XII molodezhnoj shkoly-seminara «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference and the XII Youth School-Seminar "Advanced Systems and Management Problems"]. Rostov-na-Donu, 2021. Pp. 147–154. (In Russian)

3. Nagoev Z. V., Pshenokova I. A., Nagoeva O. V. Automatic reconstruction of the nature of users' temperament based on multi-agent training of neurocognitive models of the conscious and subconscious according to data on user behavior on the Internet. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. 2021. No. 6(104). Pp. 66–77. (In Russian)

4. Nagoev Z.V., Sundukov Z.A., Pshenokova I.A., Denisenko V.A. CAD architecture of distributed artificial intelligence based on self-organizing neurocognitive architectures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2020. No. 2(94). Pp. 40–47. (In Russian)

5. Kulinich A.A. Decision support model for the formation of coalitions in conditions of uncertainty. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy* [Artificial intelligence and decision making]. 2012. No. 2. Pp. 95–106. (In Russian)

6. Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p. (In Russian)

7. Gorodetskii V.I., Karsayev O.V., Samoylov V.V., Serebryakov S.V. Applied multiagent systems of group control. *Scientific and Technical Information Processing*. 2010. Vol. 37. No. 5. Pp. 301–317.

8. Awni Hannun. The Role of Evolution in Machine Intelligence. 2021.

9. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures. *Cognitive Systems Research*. 2021. Vol. 66. Pp. 82–88.

10. Nagoev Z.V., Nagoeva O.V. *Obosnovaniye simvolov i mul'tiagentnyye neyrokognitivnyye modeli semantiki yestestvennogo yazyka* [Justification of symbols and multi-agent neurocognitive models of natural language semantics]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2022. 150 p. (In Russian)

Информация об авторах

Бжихатлов Кантемир Чамалович, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

haosit13@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0924-0193

Пшенокова Инна Ауесовна, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. «Интеллектуальные среды обитания», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3394-7682

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

Information about the authors

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory "Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems", Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360002, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;
haosit13@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0924-0193

Pshenokova Inna Auesovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory "Intelligent Living Environments", 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;
pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3394-7682

Nagoeva Olga Vladimirovna, Researcher of the Department "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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.7 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-142-151
EDN: KRADRX

О нахождении оценки сложности дискретных k-значных функций

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. В настоящей работе вводятся понятия производной и интеграла дискретных k-значных функций с учетом свойств операций сложения и умножения по модулю k. Опираясь на свойство полноты интегрального разложения k-значных функций, автор предлагает универсальный метод оценки сложности k-значных полностью определенных функций, в т.ч. не имеющих аналитического представления, а задаваемых только табличным способом или представимых при помощи других таблично задаваемых функций. Исследована структура отношения «первообразная – производная» в зависимости от свойств числа k. Предложена модель в виде ориентированного графа этого отношения. Выделены три основных типа введенного отношения.

Ключевые слова: k-значная функция, оператор дифференцирования, оператор интегрирования, свойство полноты, функции интегрального базиса, ориентированный граф

Поступила 24.10.2023, одобрена после рецензирования 02.11.2023, принята к публикации 10.11.2023

Для цитирования. Димитриченко Д. П. О нахождении оценки сложности дискретных k-значных функций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 142–151. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-142-151

MSC: 68P01 Original article

On finding an estimate of the complexity of discrete k-valued functions

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. In this paper the concept of derivative and integral of discrete k-valued functions is introduced, taking into account the properties of the operations of addition and multiplication modulo k. Based on the property of completeness of the integral expansion of k-valued functions, a universal method is proposed for estimating the complexity of k-valued fully defined functions, including not having an analytical representation, but specified only in a tabular way, or representable using other tabular functions. The structure of the "primitive – derivative" relation is studied depending on the properties of the number k. A model in the form of a directed graph of this relationship is proposed. Three main types of introduced relations are identified.

Keywords: k-valued function, differentiation operator, integration operator, completeness property, integral basis functions, directed graph

Submitted 24.10.2023, approved after reviewing 02.11.2023, accepted for publication 10.11.2023

For citation. Dimitrichenko D.P. On finding an estimate of the complexity of discrete k-valued functions. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 142–151. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-142-151

© Димитриченко Д. П., 2023

Введение

Широкое применение сложных логических функций, например, функций булевой алгебры для построения электронных логических схем, востребованных при проектировании программно-аппаратных компонентов вычислительной техники, а также алгоритмов логической обработки данных, привело к необходимости привлечения адаптированных аналогов дифференциального исчисления к вопросу анализа этих функций.

Для решения схемотехнической задачи построения электронной схемы функции, заданной, например, таблицей истинности, важно определить оптимальную структуру такой функции. Для решения этой задачи необходимо выявить характер влияния входных переменных на получаемый результат: какие из них являются важными, а какие – второстепенными.

Эту задачу позволяет решать приведенный в [1] метод получения частных производных заданной булевой функции первого и высших порядков. Для этой цели применяется дискретный аналог приращения функции при переключении исследуемой переменной. Эта переменная в первом случае принимает значение логического нуля, а во втором – логической единицы. Анализируется сумма по модулю 2 полученных выражений как дискретный аналог предельного приращения функции в исследуемой точке (анализируемой переменной). Чем больше единиц (переключений) производит полученное выражение на всех наборах остальных переменных, тем в большей мере зависит исходная функция от исследуемой переменной. Именно эту переменную целесообразно исключить (задействовать в первую очередь) при построении соответствующей электронной схемы данной функции, чтобы получить оптимально реализованную схему на основе логических элементов, сложения, умножения и скобок. Продолжая процесс исключения наиболее значимых переменных из суммы оставшихся подфункций, можно говорить о производных второго, третьего (и высших) порядков.

В работе [2] предложен метод полиномиального представления *k*-значных функций, позволяющий получать дискретные аналоги рядов Тейлора для исследуемых функций.

В [3] был предложен метод нахождения производных для переменнозначных логических функций и на их основе вычисления степени значимости входных переменных в совокупности продукционных правил исходной обучающей выборки.

Настоящая работа посвящена анализу взаимосвязи между свойствами известных алгебраических структур (кольца, поля) вместе с операциями сложения и умножения по модулю k [4] и свойствами отношения «первообразная – производная», построенного на множестве *k*-значных функций при помощи операторов дискретного интегрирования и дискретного дифференцирования.

Общая постановка задачи

Пусть на множестве $X = 0, 1, \dots, k-1$ задана некоторая k-значная функция $y = F(x): x \in X, F: X \rightarrow Y, Y = 0, 1, \dots, k-1$.

Очевидно, что мощность множества всех полностью определенных функций, например заданных табличным способом, будет равна k^k.

Прежде чем дать определения операторов дифференцирования и интегрирования на описанном множестве функций, введем две бинарные операции: сложения «+» и умножения «*» по модулю k.

Так как множества *X* и *Y* эквивалентны, то мы можем говорить о задании алгебраической структуры $\{k, +, *\}, k >= 2$ [3] с известными свойствами введенных операций (такими как коммутативность, ассоциативность и дистрибутивность), определяемыми значением k [4].

Если k является простым числом $k = p, p >= 2$, то $\{k, +, *\}$ будет полем (так как при этом отсутствуют делители нуля), в противном случае $\{k, +, *\}$ является кольцом.

Условимся, что пока не будет оговорено особо, «+» – это сложение по модулю k, а «*» – это умножение по модулю k.

Как мы увидим дальше, именно свойства алгебраической структуры $\{k, +, *\}$ и в конечном итоге структуры числа k будут оказывать непосредственное влияние на способ представления функций $y = F(x)$ и на структуру отношения «первообразная – производная» на указанном множестве всех возможных, полностью определенных функций.

Задача состоит в исследовании влияния свойств алгебраической структуры $\{k, +, *\}$ на характер отношения «первообразная – производная», заданного на множестве дискретных k-значных, полностью определенных функций.

Дифференцирование и интегрирование k-значных функций

В работах [5, 6] предложен метод дифференцирования логических функций, учитывающий направление изменения аргумента и значения исследуемой функции.

Введем понятие направления в порядке изменения значений k-значной переменной.

Пусть x – переменная k-значной логики, где k – некоторое натуральное число, $k \geq 2$.

Очевидно, что любое значение переменной x может быть получено при помощи выполнения конечного числа сложений единицы по модулю k.

Отметим на числовой прямой все возможные значения переменной x в порядке их возрастания.

Тогда, положив начальное значение x, равное некоторому x^*, и последовательно прибавляя к x единицу (по правилам сложения по модулю k), мы вернемся в исходную точку x^*, обойдя все точки в определенном направлении в сторону возрастания значений x.

Такое направление изменения значений переменной x мы будем считать положительным. Очевидно, что прибавляя к x значение k-1, мы обойдем все значения x в обратном порядке, в сторону убывания значений x, считая это направление отрицательным.

Таким образом, мы определили два направления (положительное и отрицательное) обхода всех значений переменной x. Условившись об однозначном выборе положительного направления изменения k-значной величины, рассмотрим дискретный аналог предельного перехода [5, 6].

В качестве аналога предельного перехода для дискретных k-значных функций рассмотрим приращение значения функции $F(x)$, отсчитываемого в положительном направлении, между двумя соседними (ближайшими) точками x_0 и $x_0 + 1$, также выбранными в положительном направлении.

Очевидно, что указание для любой точки x^* из множества X такой соседней точки x^*+1 с учетом введенного положительного направления будет однозначным.

Определение. Производной $F'(x_0)$ функции $F(x)$ в точке x_0 называется величина положительного приращения функции при изменении значения аргумента x_0 на единицу в положительном направлении, такое, что:

$$F(x_0 + 1) = F(x_0) + F'(x_0).$$

Интегральный базис

В работах [5, 6] были исследованы свойства операторов дифференцирования и интегрирования.

Построение и исследование дискретных аналогов формул Маклорена и Тейлора позволили получить универсальное представление любой полностью определенной функции $y = F(x)$: $y = 0, 1, \dots, k-1, x = 0, \dots, k-1$.

Было показано, что коэффициенты этих формул являются последовательно вычисляемыми определенными интегралами следующего вида:

$$I_0(x) == 1 - \text{ единичная константа},$$

$$I_1(x) = \int_0^x I_0(t)dt - \text{ линейная функция},$$

$$\ldots,$$

$$I_{k-1}(x) = \int_0^x I_{k-2}(t)dt.$$

При этом для $I_i(0) = 0, i = 1, \ldots, k-1$.

На основе полученных соотношений найдено универсальное представление любой из k^k полностью определенных k-значных функций $y=F(x)$ в виде линейной комбинации k интегральных функций.

В силу чего найденная совокупность базисных функций получила название интегрального базиса и была доказана теорема о его полноте:

Теорема 1. Любая из произвольных k^k полностью определенных k-значных логических функций $F(x)$ представима виде линейной комбинации системы интегральных функций: $I_0(x), I_1(x), \ldots, I_{k-1}(x)$ вместе с операциями +, * и константой 0.

Полученное представление имеет следующий вид:

$$F(x) = \sum_{j=0}^{k-1} F^{(j)}(0) I_j(x).$$

Заметим, что все константы, участвующие в линейной комбинации приведенного интегрального представления, являющиеся значениями производных функции $F(x)$ до порядка $k-1$ включительно, в некоторой фиксированной точке разложения x_0 всегда могут быть получены путем выполнения соответствующего количества суммирований функции $I_0(x)$, которая тождественно равна единице.

Строго говоря, нулевая константа также может быть получена аналогичным образом как результат выполнения действия $0 = k * I_0(x)$.

Способ представления функций интегрального базиса

Рассмотрим вопрос о возможности аналитического представления и реализации функций интегрального базиса.

Численный алгоритм построения функций интегрального базиса $I_0(x), I_1(x), \ldots, I_{k-1}(x)$ вытекает из способа доказательства их существования и состоит в последовательном вычислении приведенных выше определенных интегралов, начиная с единичной константы, в границах от 0 до $k-1$.

Таким образом, эти функции могут считаться известными, фактически однократно вычисленными для определенного значения k и вследствие этого таблично заданными для конкретного числа k.

Однако практический интерес представляет получение общей формы k интегральных функций для целей выявления общих свойств множества k^k k-значных функций.

Каждая из $k-1$ интегральных функций $I_i(x), i = 1, \ldots, k-1$ обращается в ноль в i подряд идущих точках области определения, так что:

$I_1(x)$ обращается в 0 в точке $x=0$;

$I_2(x)$ обращается в 0 в двух точках: $x=0$ и $x=1$ и т.д.;

$I_{k-1}(x)$ обращается в 0 в $k-1$ точках: от $x=0$ и до $x=k-2$.

Данное свойство вытекает из способа построения функций интегрального базиса как значений коэффициентов формулы Тейлора (Маклорена).

При этом все k функций являются целочисленными и принимают значения в диапазоне от 0 до k-1.

С учетом изложенных свойств можем записать:

$$I_0(x) = 1 / 0!,$$

$$I_1(x) = x / 1!,$$

$$I_2(x) = x * (x + k - 1) / 2! \mid k,$$

...

$$I_{k-1}(x) = x(x + k - 1) \dots (x + k + 2) / k - 1! \mid k.$$

В данном представлении интегральных функций «+» – это сложение по модулю k, которое в силу скобок выполняется первым.

Далее последовательно выполняются операции арифметического умножения «*» как в числителе, так и в знаменателе для нахождения значения факториала. При этом учитывается известное соотношение $0! = 1$.

После этого отыскивается результат арифметического деления числителя на знаменатель «/», который в силу структуры числителя и знаменателя при любых значениях $x=0, 1, \dots, k-1$ является целым числом.

После этого выполняется операция приведения результата вычисления дроби в область значений алгебраической структуры $\{k, +, *\}$ путем нахождения остатка от деления полученного числа на k, так как «|» – это известный в алгебре оператор получения остатка от деления на k.

Заметим, что методом математической индукции нетрудно показать, что при любых значениях $x = 0,1, \dots, k-1$ результатом деления числителя на факториал в знаменателе всегда будет являться целое (натуральное, включая ноль) число.

Мы видим, что предложенный общий вид полиномиального представления k функций интегрального базиса для любого заданного $k \geq 2$ наряду с операциями, принадлежащими кольцу (или полю) $\{k, +, *\}$ сложения и умножения по модулю k, включает в себя также не принадлежащие данной алгебраической структуре операции арифметического умножения, арифметического деления и взятия остатка при делении числа на целое.

В силу этого предложенный выше способ представления функций интегрального базиса мы будем называть метаполиномиальным представлением. А сами эти функции в предложенном представлении – метаполиномами.

При этом нетрудно заметить, что функции интегрального базиса имеют явную степенную природу и характер метаполиномиального усложнения с ростом индекса i внутри интегрального базиса, $i = 0, 1, \dots, k-1$, начиная с ненулевой (единичной) константы $I_0(x) == 1$.

Выявленное свойство было бы не очевидно только при использовании табличного способа задания функций интегрального базиса.

Однако произвести более точную оценку сложности как метаполиномов между собой, так и всей совокупности k^k k-значных функций, причем в зависимости от значения k, позволяет дифференциальный критерий сложности.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ СЛОЖНОСТИ

Располагая теоремой о полноте представления *k*-значных функций, учтем следствия.

Следствие 1. Для получения производной функции *f(x)*, представленной в виде интегрального разложения, необходимо продифференцировать интегральные коэффициенты:

$$F'(x) = \sum_{j=0}^{k-1} F^{(j)}(0) I_j'(x).$$

Отсюда видно, что для нахождения высших производных функции *F(x)* необходимо получить значения высших производных функций интегрального базиса $I_0(x), I_1(x), \dots, I_{k-1}(x)$.

Следствие 2. Для нахождения производной функции *F(x)*, заданной своим интегральным представлением, необходимо все коэффициенты при функциях интегрального базиса сдвинуть на один влево, а для нахождения первообразной – вправо. При сдвиге влево коэффициент при $i_0(x)$ теряется как неинформативный, а при сдвиге вправо заполняется заданной константой *c*, определяя одну из *k* первообразных $c = 0, \dots, k-1$.

Следствие 3. Если хотя бы одна из производных высшего порядка функции *F(x)* обращается в нулевую константу, то с ростом порядка производной это приводит к последовательному обнулению всех коэффициентов в интегральном разложении, начиная с самого правого, а следовательно, и к последовательному упрощению интегрального представления функции *F(x)* до нулевой константы.

Например, для системы функций $k^k = 3^3 = 27$ при k=3 квадратичные полиномы при дифференцировании обращаются в линейные функции, которые в свою очередь упрощаются при дифференцировании до ненулевых констант, при дальнейшем дифференцировании любая ненулевая константа обращается в нулевую.

Отметим, что в этом случае каждая из функций интегрального базиса $I_0(x)$, $I_1(x)$, $I_2(x)$ переходит в предыдущую функцию за однократное дифференцирование (один шаг дифференцирования).

А максимально сложная в данной системе функция, т.е. полином второго порядка, обращается в нулевую константу за три шага дифференцирования.

Для тех случаев, когда $\{k, +, *\}$ является полем (при простом *k*), метаполиномы, а следовательно, и все функции, представимы в явном (полиномиальном) виде. При этом сложность k^k функций соотносится со степенью рассматриваемых полиномов.

Ниже приведены функции интегрального базиса в табличной форме задания, по которым можно убедиться в сделанных выводах.

Таблица 1. Функции интегрального базиса

Table 1. Integral basis functions

X	$I_0(x)$	$I_1(x)$	$I_2(x)$
0	1	0	0
1	1	1	0
2	1	2	1

$$I_0(x) = 1,$$

$$I_1(x) = x,$$

$$I_2(x) = 2x^2 + x.$$

Таким образом, мы можем в качестве критерия сложности предложить количество последовательных дифференцирований, обращающих заданную *k*-значную функцию *F(x)* в нулевую константу.

Тогда нулевая константа имеет нулевую степень сложности.

Ненулевые константы имеют степень сложности, равную единице.

Линейные функции вида $F(x)=a*x+b$ имеют степень сложности, равную двум, где a – ненулевая *k*-значная константа.

Таким образом, можно вычислить сложность любой из k^k полностью определенных функций при заданном значении *k*.

А поскольку интегральный базис отвечает свойству полноты, то анализ всей совокупности k-значных функций можно свести к анализу функций интегрального базиса.

При этом на всей совокупности k^k полностью определенных функций можно ввести отношение «первообразная – производная», в рамках которого две функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ являются принадлежащими данному отношению, если функция $f_1(x)$ является первообразной функции $f_2(x)$. А функция $F_2(x)$ является производной функции $F_1(x)$.

Представление в виде орграфа

Так как функции полностью определенные, то согласно свойству существования собственных первообразных не каждая из них имеет собственную первообразную, но каждая из них имеет собственную, однозначным образом определяемую производную согласно приведенному выше определению производной.

Для каждой из k^k функций существует однозначным образом вычисляемая производная, также принадлежащая множеству k^k функций.

Таким образом, для любого заданного k, $k \geq 2$, и k^k полностью определенных функций одной переменной мы можем говорить о существовании и процедуре построения ориентированного орграфа $G^F = \{V(k^k), D\}$, где носителем ориентированного графа G^F являются множество *V* вершин, взвешенных k^k функциями, например, однозначным образом перенумерованными при помощи вычисления десятичного эквивалента совокупности принимаемых ими значений. *D* – множество дуг, соединяющих каждую вершину (определенную функцию) с однозначным образом соответствующей ей производной.

Как мы увидим дальше, некоторые вершины будут обладать еще и петлями. Например, производная нулевой константы сама является нулевой константой.

В качестве тривиального примера рассмотрим систему функций при $k=2$.

Функции перенумерованы в соответствии с десятичным эквивалентом их значений.

Таблица 2. Функции двузначной логики

Table 2. Two-valued logic functions

X	$F_0(x)$	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$F_3(x)$
0	0	0	1	1
1	0	1	0	1

В этом случае мы располагаем пространством из $2^2 = 4$ функций:

$F_0(x)$ – Константа 0;

$F_1(x)$ – Переменная x;

$F^2(x)$ – Отрицание x;

$F_3(x)$ – Единичная константа.

Производные $F_1(x)=x$- и $F_2(x)=-x$ при дифференцировании дают единичную константу $F_3(x)==1$.

Единичная константа при окончательном дифференцировании дает нулевую константу $f_0(x)==0$.

Как отмечалось выше, константа 0 имеет петлю.

Соединив дугами вершины, в которых расположены соответствующие пары функций, одна из которых является непосредственной производной другой, мы выстраиваем орграф отношения «первообразная – производная».

Изменив направление дуг на противоположные и удалив петлю при нулевой константе, мы получим совокупность последовательных интегрирований.

В данном случае все множество функций получается при помощи последовательного применения оператора интегрирования к нулевой константе с учетом всех возможных для первообразных.

Таким образом, мы построили древовидную иерархическую модель 2^2 функций при $k=2$.

Очевидно, что, пользуясь аналогичным алгоритмом, можно выстроить такое же отношение для любого заданного k, $k \geq 2$.

Были проведены вычислительные эксперименты для некоторых различных по свойствам значений k.

Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Операции сложения и умножения по модулю k вместе с совокупностью чисел $0, 1, \ldots, k-1$ образуют алгебраические структуры двух типов: кольцо и поле в зависимости от свойств самого числа k.

2. Вводится множество k-значных, полностью определенных функций F: X → Y, множества X, Y состоят из k элементов.

3. На множестве всех k^k функций определяются операторы дифференцирования и интегрирования.

4. Вся совокупность функций k^k связывается отношением «первообразная – производная».

Удалось определить 3 случая.

Случай 1. k является простым числом $k = p, p \geq 2$.

Алгебраическая структура $\{k, +, *\}$ является полем.

Все k^k функций представимы в виде полиномов до степени p-1 включительно.

Соответствующие k функциям интегрального базиса метаполиномы представимы в явном виде при помощи операций «+» и «*» по модулю k.

Отношение «первообразная – производная» образует единственное односвязное дерево с нулевой константой в корне. Общее направление дуг происходит от листьев к нулевой константе, расположенной в корне дерева.

Случай 2.

Значение k является числом вида $k = p^l$, где p – простое число, $p \geq 2$, а l – натуральное число, $l \geq 2$.

Алгебраическая структура $\{k, +, *\}$ является кольцом с делителями нуля.

Совокупность k^k функций по свойствам дифференцирования является полиномиальной, т.е. последовательное дифференцирование любой из этих функций приводит к нулевой константе.

Однако не все они представимы в виде соответствующих полиномов при помощи операций «+» и «*» по модулю k, что также относится и к метаполиномам.

В этом случае такие квазиполиномиальные функций задаются таблично или через другие аналогичные функции.

Однако отношение «первообразная – производная», как и в первом случае, образует односвязное дерево с нулевой константой в корне.

Случай 3. Число k является составным числом, в структуре которого содержатся два и более простых числа, возможно, в степенях больше единицы.

Алгебраическая структура $\{k, +, *\}$ является кольцом с делителями нуля.

Множество k^k функций образуют самую богатую по свойствам систему. Наряду с полиномиальными и квазиполиномиальными, т.е. не представимыми при помощи полиномов функциями, содержатся квазитригонометрические функции.

Последовательное дифференцирование таких функций через конечное число шагов приводит к исходной функции, что напоминает известное свойство некоторых тригонометрических функций.

При этом имеются также аналоги экспоненциальных функций (квазиэкспоненциальные функции), результат однократного дифференцирования которых тождественно равен самим исходным функциям.

В этом случае отношение «первообразная – производная» разбивается на несколько связных областей, распадающихся на три типа:

1. Древовидные структуры объединяют полиномиальные и квазиполиномиальные функции, последовательное дифференцирование которых приводит к нулевой константе.

2. Контуры, объединяющие классы связанных квазитригонометрических функций вместе с их соответствующими последовательными первообразными.

3. Односвязные, одновершинные области, вершины которых взвешены квазиэкспоненциальными функциями с петлей. Функции последних двух типов характеризуют системы с неупрощаемой сложностью. К таким системам относятся живые организмы и сложные технические системы, упрощение структуры которых на определенном шаге не приводит к более простой системе, а оборачивается потерей функциональности.

Однако вопрос о количестве перечисленных подпространств и количестве функций в каждом из них при заданном составном k остается открытым и является темой дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горбатов В. А.* Фундаментальные основы дискретной математики. Москва: Наука, 2000. 544 с.

2. *Пантелеев В. И.* Полиномиальное разложение K-значных функций по операторам дифференцирования и нормализации // Известия высших учебных заведений: Математика. 1998. № 1. С. 82–103.

3. *Lyutikova L.A.* Using a Boolean derivative to evaluate the significance of properties of recognized objects // E3S Web of Conferences 224. 2020. 01021.

4. *Кострыкин А. И.* Введение в алгебру. Москва: Наука, 1977. 320 с.

5. *Димитриченко Д. П.* Об одном способе дифференцирования логических функций // Материалы международной конференции молодых ученых «Математическое моделирование фрактальных процессов, родственные проблемы анализа и информатики». Нальчик, 2011. С. 103–105.

6. *Димитриченко Д. П.* К вопросу о представлении логической функции через ее производные // Материалы II международного российско-узбекского симпозиума «Уравнения смешанного типа и смежные проблемы анализа и информатики». Нальчик, 2012. С. 92–94.

REFERENCES

1. Gorbatov V.A. *Fundamental'nyye osnovy diskretnoy matematiki* [Fundamental foundations of discrete mathematics]. Moscow: Nauka, 2000. 544 p. (In Russian)

2. Panteleev V.I. Polynomial decomposition of K-valued functions by Differentiation and normalization operators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy: Matematika* [News of higher educational institutions: Mathematics]. 1998. No. 1. Pp. 82–103. (In Russian)

3. Lyutikova L.A. Using a Boolean derivative to evaluate the significance of properties of recognized objects. E3S Web of Conferences 224. 01021 (2020).

4. Kostrykin A.I. *Vvedeniye v algebru* [Introduction to algebra]. Moskow: Nauka, 1977. 320 p. (In Russian)

5. Dimitrichenko D.P. On one way of differentiating logical functions. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh "Matematicheskoye modelirovaniye fraktal'nykh protsessov, rodstvennyye problemy analiza i informatiki"* [Proceedings of the international conference of young scientists "Mathematical modeling of fractal processes, related problems of analysis and computer science"]. Nalchik, 2011. Pp. 103–105. (In Russian)

6. Dimitrichenko D.P. On the representation of a logical function through its derivatives. *Materialy II mezhdunarodnogo rossiysko-uzbekskogo simpoziuma «Uravneniya smeshannogo tipa i smezhnyye problemy analiza i informatiki»* [Materials of the II International Russian-Uzbek Symposium "Equations of mixed type and related problems of analysis and computer science"] Nalchik, 2012. Pp. 92–94. (In Russian)

Информация об авторе

Димитриченко Дмитрий Петрович, канд. техн. наук, ст. 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;

dimdp@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2399-3538

Information about the author

Dimitrichenko Dmitry Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Senior 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;

dimdp@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2399-3538

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.7 Обзорная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-152-159
EDN: LBDSYZ

Интеллектуальные методы кластеризации данных

Р. А. Жилов

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 рассматриваются интеллектуальные методы кластеризации данных. В последние годы наблюдается увеличение количества данных, которые подлежат анализу в различных областях. В связи с этим возрастает потребность в более эффективных методах кластеризации данных. Методы кластеризации данных можно разделить на две основные категории: иерархические и неиерархические. Иерархические методы кластеризации строят дерево кластеров, начиная с каждого объекта в отдельном кластере, а затем объединяют близкие кластеры, пока не останется один кластер, содержащий все объекты. Неиерархические методы кластеризации определяют число кластеров заранее и группируют объекты в соответствии с их сходством и различиями. Методы кластеризации данных – это одна из важнейших областей машинного обучения, которая позволяет группировать данные в соответствии с их признаками и характеристиками. Кластеризация данных является одним из основных методов анализа данных и находит широкое применение во многих областях, включая биологию, медицину, экономику, социологию и другие.

Ключевые слова: кластеризация данных, метод k-средних, метод DBSCAN, методы кластеризации на основе плотности, метод SOM

Поступила 24.10.2023, одобрена после рецензирования 02.11.2023, принята к публикации 09.11.2023

Для цитирования. Жилов Р. А. Интеллектуальные методы кластеризации данных // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 152–159. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-152-159

MSC: 68T09 Review article

Intelligent data clustering methods

R.A. Zhilov

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 intelligent methods of data clustering. In recent years there has been an increase in the amount of data to be analyzed in various fields. As a result, there is a growing need for more efficient data clustering methods. Data clustering methods can be divided into two main categories: hierarchical and non-hierarchical. Hierarchical clustering methods build a tree of clusters, starting with each feature in a separate cluster and then merging close clusters until there is one cluster containing all the features. Non-hierarchical clustering methods determine the number of clusters in advance and group objects according to their similarities and differences. Data clustering methods is one of the most important areas of machine learning, which allows you to group data according to their features and characteristics.

© Жилов Р. А., 2023

Data clustering is one of the main methods of data analysis and is widely used in many fields, including biology, medicine, economics, sociology, and others.

Keywords: data clustering, k-means method, DBSCAN method, density-based clustering methods, SOM method

Submitted 24.10.2023, approved after reviewing 02.11.2023, accepted for publication 09.11.2023

For citation. Zhilov R.A. Intelligent data clustering methods. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 152–159. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-152-159

Введение

Одним из наиболее популярных методов кластеризации данных является метод k-средних. Он относится к неиерархическим методам и представляет собой алгоритм, который разделяет данные на кластеры, основываясь на сходстве объектов друг с другом. Метод k-средних используется для анализа различных типов данных, включая числовые и категориальные.

Еще одним популярным методом кластеризации данных является метод DBSCAN. Он также относится к неиерархическим методам и используется для кластеризации данных, основываясь на плотности объектов в пространстве признаков. Метод DBSCAN может обнаруживать кластеры любой формы и размера, а также распознавать шумовые точки и выбросы.

Кроме того, существуют и другие методы кластеризации данных, такие как методы иерархической кластеризации (например, метод Ward или метод евклидовой агломерации), методы на основе иерархических байесовских моделей (например, Dirichlet Process Gaussian Mixture Models), методы кластеризации на основе плотности (например, Mean Shift) и многие другие [1, 2].

Однако независимо от выбранного метода кластеризации необходимо учитывать ограничения и особенности данных, которые подвергаются анализу. Важно также выбирать правильные параметры и метрики для оценки качества кластеризации, чтобы получить оптимальный результат.

Таким образом, методы кластеризации данных имеют большую важность и ценность в области анализа данных, позволяя находить закономерности и структуры в больших объемах данных. Развитие новых методов кластеризации данных является активной областью исследований, что позволяет получать более точные и эффективные результаты.

Метод k-средних

Метод k-средних (k-means) является одним из самых распространенных методов кластеризации данных. Он позволяет разбить набор данных на заранее определенное число кластеров (групп), где каждый кластер содержит объекты, близкие по своим характеристикам [3].

Алгоритм k-средних работает следующим образом:

Начальное состояние. Определяется число кластеров k, а затем выбираются случайным образом k точек из набора данных. Эти точки становятся начальными центроидами (центрами) кластеров.

Присвоение кластера. Каждый объект данных присваивается к кластеру, чей центройд находится ближе всего к данному объекту.

Обновление центройдов. Для каждого кластера вычисляется новый центроид, который представляет собой среднее значение всех объектов в данном кластере.

Повторение шагов 2 и 3. Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока центройды не перестанут изменяться или пока не будет достигнуто максимальное число итераций.

Результат. Полученные кластеры могут быть использованы для анализа данных, классификации объектов и других приложений.

Метод k-средних имеет несколько преимуществ, таких как простота реализации и высокая скорость работы. Однако он также имеет недостатки, например, чувствительность к начальному выбору центройдов и неспособность работать с нелинейно разделимыми данными.

В целом метод является эффективным и широко используемым при кластеризации данных, он может быть применен в различных областях, включая машинное обучение, анализ данных, геоинформатику, биоинформатику и другие.

Метод k-средних широко применяется в различных областях, где требуется кластеризация данных. Например, может использоваться для анализа социальных сетей, обработки и анализа медицинских данных, классификации текстовых документов и других задач.

Одним из примеров использования метода k-средних является задача сегментации клиентов. В этой задаче требуется разбить клиентов на группы схожих по своим характеристикам (например, возраст, доход, предпочтения и т.д.). Это может быть полезно для разработки более эффективных маркетинговых стратегий и улучшения обслуживания клиентов.

Также метод k-средних может быть использован в области обработки изображений, например, для сегментации изображений на отдельные части или объекты. В этом случае каждый пиксель изображения может быть рассмотрен как отдельный объект, а кластеризация данных позволит определить сходство пикселей и разделить изображение на соответствующие кластеры.

Метод также может использоваться в задачах машинного обучения, например, для кластеризации признаковых описаний объектов в задачах классификации и кластеризации. В этом случае метод k-средних может быть использован для построения скрытых представлений данных, которые могут применяться в дальнейшем для обучения модели.

Как правило, метод k-средних работает лучше всего в случаях, когда данные являются числовыми и имеют простую структуру. Метод k-средних может быть менее эффективным в случае, когда данные имеют сложную структуру или являются нечисловыми (например, текстовые данные). Также метод k-средних может быть менее эффективным в случаях, когда имеется большое количество выбросов или когда кластеры имеют неравную дисперсию.

Метод DBSCAN

Метод DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) – это алгоритм кластеризации, который находит плотные области в пространстве данных и определяет выбросы. Он может быть использован для кластеризации как числовых, так и категориальных данных [4].

Принцип работы метода DBSCAN заключается в поиске областей с высокой плотностью точек, которые являются кластерами. Для этого алгоритм использует два параметра: радиус ε и минимальное количество точек, необходимое для образования кластера (minPts).

Алгоритм начинается с выбора произвольной нерассмотренной точки в данных. Затем алгоритм находит все точки, которые находятся в радиусе ε от этой точки. Если количество точек в этой области больше или равно minPts, то эта область считается кластером. Если же количество точек меньше minPts, то эта точка считается выбросом. Если же количество точек больше minPts, но они не находятся в области с радиусом ε от выбранной точки, то алгоритм переходит к следующей нерассмотренной точке и повторяет процедуру.

После обнаружения первого кластера алгоритм находит все точки в данных, которые находятся в радиусе ε от этого кластера, и повторяет процедуру поиска кластеров для этих точек.

Одним из основных преимуществ метода DBSCAN является то, что он не требует заранее заданного числа кластеров и может определять их число на основе данных. Также метод DBSCAN может обрабатывать данные с шумом и выбросами, так как он может отличать их от настоящих кластеров.

Однако метод DBSCAN имеет некоторые недостатки. Например, если данные имеют разную плотность в разных областях, то параметры радиуса ε и minPts могут не подходить для всех кластеров. Также метод DBSCAN может иметь проблемы в случае, когда кластеры имеют сложную форму или пересекаются.

Метод DBSCAN широко используется в различных областях, таких как обработка и анализ данных, компьютерное зрение, биоинформатика и другие. Он может быть использован для кластеризации объектов, сегментации изображений, выявления аномалий и других задач.

Также данный метод применяется во многих областях, где требуется кластеризация данных, особенно в тех случаях, когда число кластеров заранее неизвестно. Вот некоторые задачи, где метод DBSCAN используется чаще всего:

Обработка изображений. Метод DBSCAN может использоваться для сегментации изображений, то есть разделения изображения на различные сегменты в зависимости от цвета, яркости или других характеристик. Например, для выделения объектов на изображении.

Биоинформатика. В биоинформатике метод DBSCAN может использоваться для кластеризации геномных данных, анализа белковых структур, выявления паттернов в биологических данных и многих других задач.

Маркетинг и реклама. Метод DBSCAN может использоваться для кластеризации покупателей на основе их покупательского поведения или для определения сегментов рынка.

Финансы. Метод DBSCAN может использоваться для кластеризации финансовых данных, таких как торговля на фондовых рынках, прогнозирование рисков и т.д.

Геоданные. В геоинформатике метод DBSCAN может использоваться для кластеризации пространственных данных, например, для выделения кластеров точек на карте.

Анализ социальных сетей. Метод DBSCAN может использоваться для кластеризации пользователей социальных сетей на основе их профилей или поведения.

Метод DBSCAN может использоваться во многих задачах, где требуется выявление структуры в данных и разделение их на кластеры.

Хотя метод DBSCAN имеет много преимуществ, таких как возможность определения количества кластеров и обнаружение шума, он также имеет некоторые недостатки, которые следует учитывать:

1. *Вычислительная сложность*. Метод DBSCAN имеет квадратичную сложность по отношению к количеству объектов данных. Это может стать проблемой для больших наборов данных или для задач, где требуется быстрый анализ в реальном времени.

2. *Чувствительность к параметрам*. Метод DBSCAN имеет два основных параметра – радиус epsilon и минимальное количество точек в кластере. Выбор правильных параметров может быть сложной задачей и зависеть от характеристик конкретного набора данных.

3. *Проблемы с выделением кластеров различных плотностей*. Метод DBSCAN не всегда хорошо работает с наборами данных, в которых кластеры имеют различные уровни плотности. В некоторых случаях он может выделить один большой кластер вместо нескольких меньших.

4. *Неэффективность на высокоразмерных данных*. Метод DBSCAN может столкнуться с проблемой «проклятия размерности», то есть снижения эффективности при работе с данными высокой размерности. Это может привести к тому, что метод DBSCAN не сможет найти кластеры в таких данных или даст неточный результат.

В целом метод DBSCAN является мощным инструментом для кластеризации данных, но его применение должно быть осознанным и учитывать особенности конкретной задачи и набора данных.

Методы кластеризации на основе плотности используются для идентификации кластеров в данных, основываясь на плотности распределения точек. Основная идея заключается в том, что кластеры представляют собой области с высокой плотностью точек, отделенные от других областей с низкой плотностью. В этом разделе мы рассмотрим два наиболее распространенных метода кластеризации на основе плотности: DBSCAN и OPTICS.

Метод кластеризации SOM и сеть Кохонена

Методы, основанные на многократном самоорганизующемся отображении (SOM), являются одним из методов кластеризации на основе нейронных сетей. SOM – это метод, в котором каждый элемент данных представляется точкой в многомерном пространстве и проецируется на двумерную сетку нейронов, которые формируют топологическую карту [5].

Процесс SOM начинается с инициализации случайных весов для каждого нейрона в сетке. Затем выбирается случайный элемент данных и определяется ближайший нейрон (winner neuron), т.е. нейрон, веса которого находятся ближе всего к данному элементу. Затем веса всех нейронов в окрестности победителя корректируются, чтобы они стали ближе к этому элементу данных. Этот процесс называется обучением.

Процесс обучения продолжается для каждого элемента данных в выборке. При этом размер окрестности нейронов, которые должны быть обновлены, постепенно уменьшается. В результате обучения происходит формирование топологической карты, где каждый нейрон соответствует определенному кластеру в данных.

Одним из основных преимуществ метода SOM является возможность визуализации кластерной структуры данных в двумерном пространстве, что позволяет более наглядно представить результаты кластеризации и проводить дальнейший анализ данных.

Методы, основанные на SOM, широко применяются в области обработки изображений и анализа данных, включая:

1. *Классификацию изображений*: SOM могут использоваться для классификации изображений по различным признакам, таким как цвет, текстура, форма и т.д.
2. *Рекомендательные системы*: SOM могут использоваться для кластеризации пользователей и товаров в рекомендательных системах, что позволяет предлагать пользователям наиболее подходящие товары.
3. *Анализ данных*: SOM могут использоваться для кластеризации больших наборов данных в различных областях, таких как финансы, медицина, биология и т.д.
4. *Обработка естественного языка*: SOM могут использоваться для кластеризации текстовых данных, таких как новости, статьи, отзывы и т.д.

Сеть Кохонена, также известная как карты Кохонена, или SOM (Self-Organizing Maps), является одним из методов кластеризации на основе нейронных сетей. Этот метод был разработан финским ученым Теуво Кохоненом в 1982 году и с тех пор получил широкое применение в различных областях, таких как обработка изображений, распознавание образов, биоинформатика и др.

Сеть Кохонена использует нейроны, расположенные в двумерной сетке, для представления многомерных данных. Каждый нейрон связан с определенным участком входного пространства, и каждый нейрон имеет свое значение веса, которое настраивается в процессе обучения. Обучение сети Кохонена происходит путем присвоения входных данных случайным весам нейронов и последующей корректировки этих весов в процессе обучения.

Основная идея метода заключается в том, чтобы сжать многомерное пространство входных данных в двумерную карту нейронов таким образом, чтобы близкие входные данные оказались в близких друг к другу нейронах на карте. Таким образом, каждый нейрон представляет определенный кластер данных.

Процесс кластеризации в сети Кохонена начинается с инициализации весов каждого нейрона случайными значениями, затем на каждом шаге происходит выбор случайного входного вектора и определение ближайшего нейрона на карте. Выбранный нейрон и его ближайшие соседи затем корректируют свои веса, чтобы стать ближе к выбранному входному вектору. Этот процесс повторяется многократно до тех пор, пока не будет достигнуто определенное количество эпох обучения.

Сеть Кохонена часто используется для визуализации данных в двумерном пространстве, где каждый нейрон представляет определенный кластер данных. Это позволяет легче интерпретировать результаты кластеризации и понимать структуру данных. Также сеть Кохонена может использоваться для классификации и прогнозирования, особенно в задачах, связанных с обработкой изображений и сигналов.

Кластеризация с помощью нейронных сетей

Методы кластеризации, использующие нейронные сети, представляют собой разновидность методов машинного обучения, которые основываются на алгоритмах нейронных сетей. Нейронные сети представляют собой математические модели, которые имитируют работу мозга и способны обрабатывать сложные данные. Кластеризация с помощью нейронных сетей обычно выполняется в два этапа: обучение и классификация [6].

Обучение нейронной сети заключается в том, чтобы настроить ее параметры, чтобы она могла определить структуру данных и выделить кластеры. Это можно сделать, например, путем обучения с учителем, где данные размечены заранее известными метками кластеров, или с помощью обучения без учителя, где нейронная сеть сама ищет закономерности в данных.

Классификация с помощью нейронных сетей заключается в том, чтобы использовать обученную нейронную сеть для определения принадлежности точек кластерам. Для этого данные передаются через обученную нейронную сеть, которая выдает вероятности принадлежности точек кластерам. Затем можно использовать пороговое значение вероятности для определения, к какому кластеру относится каждая точка.

Существует несколько методов кластеризации, использующих нейронные сети, включая методы, основанные на многократном самоорганизующемся отображении (SOM), нейронных сетях Кохонена, глубоком обучении и других. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки и может быть эффективным в различных задачах кластеризации.

Одним из преимуществ методов кластеризации, использующих нейронные сети, является их способность обнаруживать сложные зависимости в данных и работать с высокоразмерными данными. Кроме того, нейронные сети могут обучаться на больших объемах данных и обрабатывать информацию в режиме реального времени [7].

Однако методы кластеризации, использующие нейронные сети, могут быть вычислительно сложными и требовать большого объема вычислительных ресурсов. Кроме того, обучение нейронных сетей может требовать большого количества данных и времени на обучение. Также при использовании нейронных сетей для кластеризации могут возникать проблемы с интерпретируемостью результатов, что затрудняет понимание структуры данных и интерпретацию полученных результатов.

Стоит отметить, что выбор метода кластеризации, включая методы на основе нейронных сетей, зависит от специфики данных и задачи, которую необходимо решить. В некоторых случаях лучше могут работать методы на основе плотности, в других – методы на основе расстояний, а в третьих – методы на основе нейронных сетей.

Несмотря на ограничения и проблемы, методы кластеризации, использующие нейронные сети, являются мощным инструментом для обработки и анализа данных. Они могут помочь выделить скрытые закономерности и структуры в данных, что может быть полезным в различных областях, включая медицину, финансы, науку о материалах и другие. Кроме того, с развитием технологий и возможностей вычислительной техники методы кластеризации, использующие нейронные сети, становятся все более доступными и применимыми в реальных приложениях.

Методы кластеризации на основе нейронных сетей широко применяются во многих областях:

1. *Обработка изображений:* нейронные сети могут использоваться для выделения объектов на изображениях и их классификации по кластерам в зависимости от различных признаков, таких как цвет, форма, текстура и т.д.

2. *Обработка звука:* нейронные сети могут использоваться для классификации и кластеризации звуковых сигналов, таких как речь, музыка, звуки окружающей среды и т.д.

3. *Анализ данных:* нейронные сети могут использоваться для кластеризации больших наборов данных в различных областях, таких как финансы, медицина, биология и т.д.

4. *Обработка естественного языка:* нейронные сети могут использоваться для кластеризации текстовых данных, таких как новости, статьи, отзывы и т.д.

5. *Рекомендательные системы:* нейронные сети могут использоваться для кластеризации пользователей и товаров в рекомендательных системах, что позволяет предлагать пользователям наиболее подходящие товары.

6. *Биоинформатика:* нейронные сети могут использоваться для кластеризации биологических данных, таких как геномы, протеомы и т.д.

Это лишь несколько примеров того, где и как могут быть использованы методы кластеризации на основе нейронных сетей. В целом они могут быть полезны в любой области, где необходимо выявить скрытые закономерности и структуры в данных.

Использование нейронных сетей для кластеризации данных имеет свои преимущества и недостатки.

Одним из главных преимуществ является возможность обработки больших объемов данных с высокой точностью. Нейронные сети могут обрабатывать сложные данные, которые не могут быть решены с помощью традиционных методов кластеризации. Кроме того, нейронные сети могут выделять скрытые зависимости между данными, что поможет в создании более качественных кластеров.

Однако недостатки тоже есть. Например, настройка параметров нейронной сети может быть сложной и требует опыта. Также нейронные сети часто требуют большого количества данных для обучения, что может быть проблематично в некоторых приложениях.

Заключение

В целом использование нейронных сетей для кластеризации данных является эффективным подходом, который может помочь в создании качественных кластеров, особенно в случаях, когда объемы данных большие и данные сложны для анализа традиционными методами кластеризации. Однако выбор конкретного метода кластеризации должен зависеть от конкретной задачи и требований к точности и скорости работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. Москва: Финансы и статистика, 2016.

2. *Мандель И. Д.* Кластерный анализ. Москва: Финансы и статистика, 1988. 176 с.

3. *Raghavan R.* A fast and scalable hardware architecture for K-means clustering for big data analysis : University of Colorado Colorado Springs. Kraemer Family Library, 2016.

4. *Kriegel H.-P., Schubert E., Zimek A.* The (black) art of runtime evaluation: Are we comparing algorithms or implementations? Knowledge and Information Systems. 2016. Vol. 52. No. 2. P. 341.

5. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps (Third Extended Edition). New York, 2001. 501 p.

6. *Вятченин Д. А.* Нечеткие методы автоматической классификации. Минск: Технопринт, 2004. 219 с.

7. *Жилов Р. А.* Применение нейронных сетей при кластеризации данных // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 1(99). С. 15–19.

REFERENCES

1. Osovsky S. *Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow: Finansy i statistika, 2016. (In Russian)

2. Mandel I.D. *Klasternyy analiz* [Cluster analysis]. Moscow: Finansy i statistika, 1988. 176 p. (In Russian)

3. Raghavan R. A fast and scalable hardware architecture for K-means clustering for big data analysis : *University of Colorado Colorado Springs.* Kraemer Family Library, 2016.

4. Kriegel H.-P., Schubert E., Zimek A. The (black) art of runtime evaluation: Are we comparing algorithms or implementations? *Knowledge and Information Systems*. 2016. Vol. 52. No. 2. P. 341.

5. Kohonen T. Self-Organizing Maps (Third Extended Edition). New York, 2001. 501 p.

6. Vyatchenin D.A. *Nechotkiye metody avtomaticheskoy klassifikatsii* [Fuzzy methods of automatic classification]. Minsk: Technoprint, 2004. 219 p. (In Russian)

7. Zhilov R.A. Application of neural networks in data clustering. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2021. No. 1(99). Pp. 15–19. (In Russian)

Информация об авторе

Жилов Руслан Альбердович, 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;

zhilov91@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3552-4854

Information about the author

Zhilov Ruslan Alberdovich, 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;

zhilov91@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3552-4854

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-160-166
EDN: MFQMMZ

Комбинированный метод выравнивания гистограммы изображений с высоким динамическим диапазоном

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 работе с сырыми изображениями, полученными непосредственно с матрицы оборудования, возникают специфические проблемы, связанные с большим динамическим диапазоном. В работе предлагается комбинированный метод исправления гистограммы, позволяющий существенно улучшить контрастность таких сырых изображений с большим динамическим диапазоном. В комбинированном методе производится мягкое отсечение засветов на гистограмме при помощи алгоритма кластеризации, основанного на разбиении пространства признаков и гамма-коррекции отсекаемой области. Используемый алгоритм кластеризации хорошо справляется с выявлением точки отсечения как при наличии засветов на изображении, так и при их отсутствии. В методе также производится слабое подчеркивание границ на основе фильтров Собеля. Для улучшения гистограммы используется хорошо известный метод Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. При этом применяется комбинация преобразований с различными размерами сетки, что позволяет добиться гораздо лучших результатов, чем при подборе одного оптимального преобразования. Указанные алгоритмы подробно описаны и приведены иллюстрации для сравнения.

Ключевые слова: гистограмма, выравнивание гистограммы, рентгеновские изображения, обработка изображений, повышение контраста, кластеризация

Поступила 30.10.2023, одобрена после рецензирования 21.11.2023, принята к публикации 28.11.2023

Для цитирования. 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

MSC: 68U10 Original article

A combined method for histogram equalization of high dynamic range images

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 working with raw images obtained directly from the equipment matrix, specific problems arise associated with a large dynamic range. The paper proposes a combined histogram correction method that can significantly improve the contrast of such raw images with a large dynamic range. In the combined method, soft clipping of highlights in the histogram is performed using a clustering algorithm based on partitioning the feature space and gamma correction of the clipped area. The clustering algorithm used manages to identify the cutoff point, both in the presence and absence of highlights in the image. The

© Казаков М. А., 2023

method also produces weak edge accentuation based on Sobel filters. To improve the histogram, the well-known Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization method is used. In this case, a combination of transformations with different mesh sizes is used, which allows one to achieve much better results than when selecting one optimal transformation. These algorithms are described in detail and illustrations for comparison are provided.

Keywords: histogram, histogram equalization, x-ray images, image processing, contrast enhancement, clustering

Submitted 30.10.2023, approved after reviewing 21.11.2023, accepted for publication 28.11.2023

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

Введение

При работе с сырыми изображениями, получаемыми непосредственно с матрицы оборудования (например, рентгеновского), возникают задачи исправления гистограммы и улучшения контрастности. В частности, области засвета, которым соответствует очень высокая интенсивность пикселей, делают информативную область очень тусклой. В информативной области изображения интенсивности пикселей могут лежать близко друг к другу в сравнении с динамическим диапазоном, что делает изображение неразборчивым. Для решения этих проблем и улучшения представления изображения разработано множество методов [1, 2]. В данной работе предлагается комбинированный метод обработки сырого изображения, позволяющий произвести редукции засвеченной области, выравнивание гистограммы, улучшение контрастности и детализации.

Подобная обработка изображения важна не только для улучшения восприятия изображения человеком, но также необходима при работе с автоматизированным анализом данных. Для этих целей могут быть использованы более специфические методы [4–8].

В основе метода лежат Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) и алгоритм кластеризации на основе разбиения пространства признаков.

Формализация задачи

Изображение может быть определено как двумерная функция $f(x, y)$, где x и y представляют собой пространственные координаты, а значение функции для каждой пары координат характеризует интенсивность или уровень серого изображения в точке. Для цифрового изображения интенсивность и значения координат являются дискретными и ограниченными. Интенсивность при этом должна быть также неотрицательной. Число дискретных уровней интенсивности L определяется как 2^k, где k – целое положительное число, соответствующее количеству бит, отведенному для хранения значения интенсивности.

Преобразование изображения в общем случае может быть представлено выражением

$$g(x, y) = T[f(x, y)],$$

где $f(x, y)$ – входное изображение, $g(x, y)$ – выходное изображение, T представляет собой оператор, действующий на значения f, определенные в некоторой окрестности точки (x, y). Минимально возможная окрестность имеет размер 1×1. В этом случае g зависит только от значения f в единственной точке (x, y) и оператора T и представляет собой функцию преобразования интенсивности:

$$s = T(r),$$

где для упрощения обозначений используются символы s и r, соответствующие интенсивностям g и f для каждой точки (x, y).

Обозначим через r_k, где $k = 0,1,2, \dots, L-1$, значения интенсивности L-уровневого цифрового изображения $f(x, y)$. Ненормализованная гистограмма изображения f определяется как $h(r_k) = n_k$, где n_k – число пикселей в изображении с интенсивностью r_k. Нормализованная гистограмма определяется как

$$p(r_k) = \frac{h(r_k)}{MN} = \frac{n_k}{MN},$$

где M и N – высота и ширина изображения. Сумма $p(r_k)$ для всех k равна 1. Компоненты $p(r_k)$ представляют собой оценки вероятностей обнаружения уровней интенсивности на изображении.

Выравнивание гистограммы

Предположим, что значения интенсивности r лежат в диапазоне $[0, L-1]$, где $r = 0$ соответствует черному цвету, а $r = 1$ – белому. Рассмотрим преобразование интенсивности T, удовлетворяющее условиям:

1) $T(r)$ – строго монотонная возрастающая функция в диапазоне $0 \le r \le L-1$;

2) $0 \le T(r) \le L-1$ для $0 \le r \le L-1$.

Данные условия гарантируют, что выходное значение интенсивности не будет меньше входного и не выйдет за пределы диапазона входных значений.

Интенсивность изображения может быть рассмотрена как случайная величина в интервале $[0, L-1]$. Обозначим $p_r(r)$ и $p_s(s)$ – плотности вероятности интенсивности значений r и s в двух различных изображениях. Индексы при p введены для обозначения того, что p_r и p_s – разные функции. Тогда в соответствии с методом замены переменной (change-of-variable technique), если $T(r)$ является непрерывной и дифференцируемой во всем диапазоне функцией, то плотность вероятности интенсивности s может быть выражена

$$p_s(s) = p_r\left(T^{-1}(s)\right)\left|\frac{d}{ds}\left(T^{-1}(s)\right)\right| = p_r(r)\left|\frac{dr}{ds}\right|.$$

Рассмотрим следующую функцию преобразования:

$$s = T(r) = (L-1)\int_0^r p_r(x)dx.$$

Интеграл в правой части представляет функцию распределения (cumulative distribution function – CDF) случайной величины r. По правилу Лейбница можно записать

$$\frac{ds}{dx} = (L-1)p_r(r).$$

В результате для плотности вероятности случайной величины s на всем диапазоне $0 \le s \le L-1$ получим

$$p_s(s) = \frac{1}{L-1}.$$

Таким образом, в результате преобразования $T(r)$ мы получаем равномерное распределение плотности вероятности $p_s(s)$ на всем диапазоне интенсивностей. Из этого следует, что CDF, который выражается как интеграл от плотности вероятности, будет представлять собой прямую.

Если переменные r и s принимают только дискретные значения $0,1,2,\dots,L-1$, то функцию преобразования $T(r)$ можно записать так:

$$T(r) = \text{floor}\left((L-1)\sum_{k=0}^{r} p_r(k)\right),$$

где оператор floor округляет вещественное число, оставляя целую часть.

На рисунке 1 изображены гистограммы и CDF исходного изображения и результирующего изображения с выровненной гистограммой:

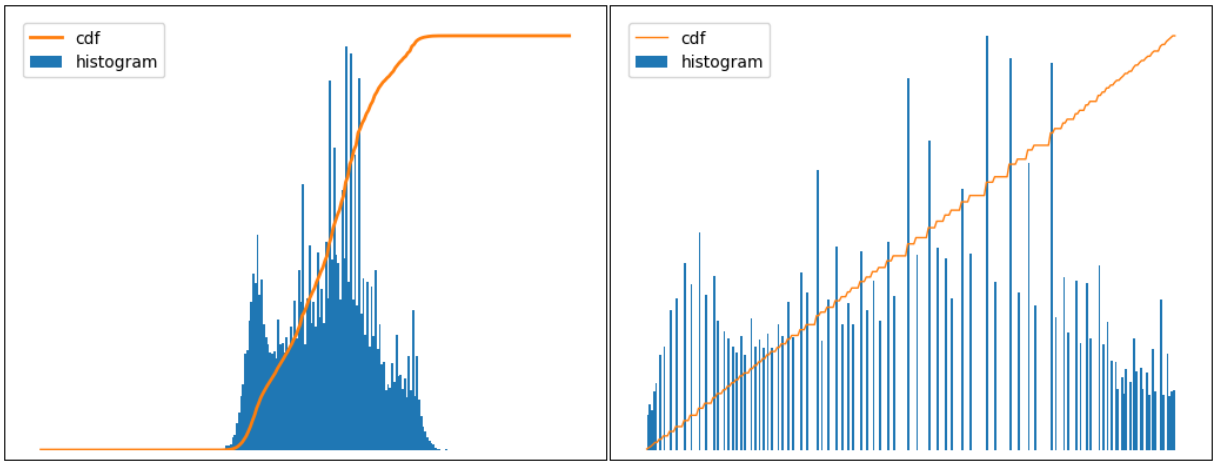


Рис. 1. *Гистограммы*

Fig. 1. *Histograms*

CLAHE

Описанный способ производит глобальное выравнивание гистограммы для всего изображения, что в некоторых случаях работает вполне хорошо. Однако в большинстве случаев такое выравнивание приводит к улучшению результата в отдельных областях изображения и ухудшению в других. Для более деликатного результата используется адаптивное выравнивание гистограммы (adaptive histogram equalization – AHE) [9]. В этом методе изображение разбивается на контекстуальные блоки, внутри которых по отдельности производится выравнивание гистограммы. Изображение разбивается сеткой контекстуальных областей, в которых вычисляется оптимальное значение контраста. В результате такого выравнивания на границах блоков могут образоваться перепады интенсивности [10]. Во избежание этого применяется билинейная интерполяция.

AHE позволяет получить существенно более качественный результат, однако побочным эффектом на изображении усиливается фоновый шум, присутствующий на однородных участках. Для решения этой проблемы был предложен метод Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), который является модификацией метода AHE. Проблему с шумом, проявляющимся в AHE, можно побороть за счет ограничения усиления контраста, в частности, на однородных участках изображения. Эти участки характеризуются высоким пиком на гистограмме блока, так как много пикселей однородной области попадают в узкую область гистограммы. На диаграмме CDF такие участки характеризуются наиболее крутым склоном. В методе CLAHE производится отсечение гистограммы на некоторой высоте, а пиксели, попавшие в область отсечения, перераспределяются по оставшейся области гистограммы. В результате такой трансформации угол максимального наклона на диа-

грамме CDF будет ограничен. После такой предобработки в результате выравнивания гистограммы шумы будут контрастированными в значительно меньшей степени. Уровень отсечения задается коэффициентом контрастирования [11].

Мягкое отсечение flare

Специфика проблемы заключается в том, что, во-первых, область засвета не всегда присутствует на изображении, а во-вторых, его расположение на гистограмме может быть произвольным для разных изображений, даже если они получены на одном и том же оборудовании. Поэтому алгоритм должен уметь эффективно определять наличие либо отсутствие засвета, а также, при его наличии, уметь достаточно точно оценить его расположение на гистограмме.

Для отсечения областей засвета используется упрощенный алгоритм кластеризации на основе разбиения пространства признаков [12]. В общем случае алгоритм работает для произвольной размерности пространства признаков. В данном случае работа ведется над одномерным пространством гистограммы, что позволяет оставить в стороне некоторые элементы общего алгоритма. Идея заключается в следующем. Области засвета характеризуются высоким пиком в правой области гистограммы, слева от которого располагается пустая зона с низкими значениями. Содержательная часть изображения сконцентрирована слева от пустой зоны. Рассматриваемый метод кластеризации, основанный на анализе плотности, позволяет объединить в кластер содержательную часть изображения и довольно уверенно оценить его правую границу. Далее можно произвести мягкое отсечение, которое уберет области засвета и при этом сохранит информативность, которая может оставаться правее границы.

Вот пошаговое описание алгоритма редукции областей засвета:

1. Гистограмма разбивается на N интервалов (24 является довольно оптимальным выбором).

2. Выбирается первый интервал путем перебора интервалов, начиная с индекса 0. Первым будет интервал, значение которого превышает заданный порог плотности. Этот интервал инициализирует кластер.

3. Начиная с первого интервала, по гистограмме перемещается рамка, охватывающая 3 интервала. На каждой позиции вычисляется среднее от значений интервалов. Рамка смещается вправо, расширяя кластер, до тех пор, пока среднее значение интервалов не станет меньше заданного порога плотности.

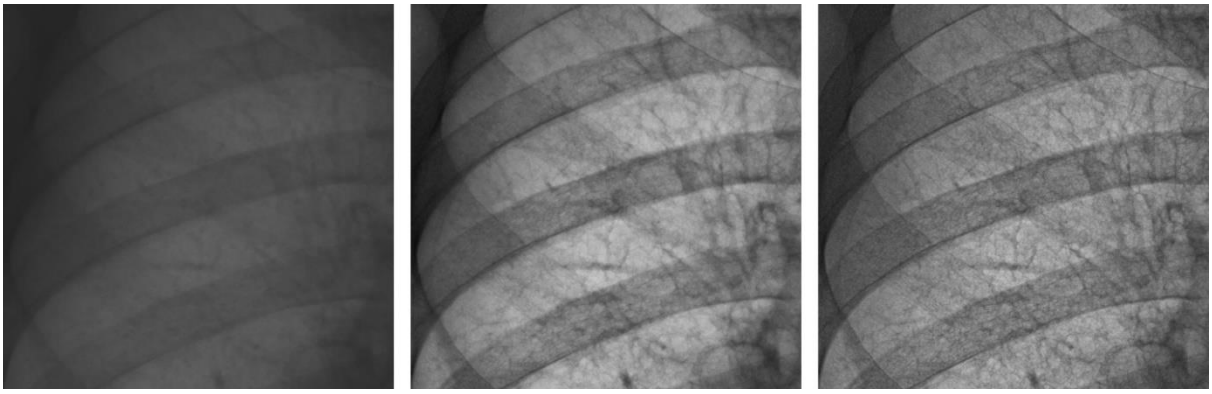
4. Правая граница сформированного кластера принимается за точку отсечения t. Производится мягкое отсечение правой части гистограммы. Это осуществляется путем гамма-коррекции всех пикселей, интенсивность которых превышает точку отсечения (т.е. для $r > t$):

$$s = (r - t)^{\gamma} + t.$$

Комбинированный алгоритм

Для эффективного исправления гистограммы и улучшения качества изображений предлагается комбинированный алгоритм. На первом этапе производится мягкое отсечение засветов. На втором этапе вычисляются свертки, полученные оператором Sobel [13], и накладываются с дисконтирующим коэффициентом на результат, полученный на первом этапе. Такое слабое подчеркивание границ позволяет добиться лучшего результата на третьем этапе. На третьем этапе производится выравнивание гистограммы путем комбинирования нескольких преобразований CLAHE с различными размерами сетки разбиения и контрастирующего коэффициента. Количество преобразований CLAHE задается параметром depth. Эмпирическим путем было получено, что лучшие результаты достигаются при выборе базового преобразования CLAHE с размером сетки, равным 6 (depth = 1), при котором на каждом шаге глубины размер сетки удваивается. Оптимальный результат получается при depth, равном 4. Увеличение глубины сопровождается повышением детализации изображения, но

при этом сопровождается увеличением времени работы алгоритма и усилением шумов. Образец обработки изображения можно увидеть на рисунке 2: здесь представлены исходное изображение, полученное от рентгеновского оборудования, результаты обработки при depth = 4 и depth = 8.



а) б) в)

Рис. 2. *а) Исходное изображение; б) depth=4; в) depth=8*

Fig. 2. *a) Original image; b) depth=4; c) depth=8*

Заключение

Предлагаемый комбинированный метод позволяет эффективно улучшить контраст raw изображения, получаемого на матрице оборудования, и добиться высокой детализации за счет редукции областей засвета и комбинации преобразований CLAHE. Метод подходит для обработки 8bit изображений, однако более значимых результатов можно достичь на изображениях, динамический диапазон которых гораздо шире (e.g. 14bit or 16bit). Регулируя глубину, можно добиться различных уровней детализации. Следует, однако, иметь в виду, что высокая детализация требует больше вычислительных ресурсов и сопровождается некоторым усилением шумов.

REFERENCES

1. Vijayalakshmi D., Nath M.K., Acharya O.P. A comprehensive survey on image contrast enhancement techniques in spatial domain. *Sensing and Imaging*. 2020. Vol. 21. No. 1. P. 40. DOI: 10.1007/s11220-020-00305-3

2. Woods R.E., Gonzalez R.C. Digital Image Processing. England: Pearson, 2021. 1022 c.

3. Jain A.K. Fundamentals of digital image processing. England: Pearson, 1989. 569 c.

4. 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*. Tashkent, 2021. Pp. 115–120. DOI: 10.1109/ICTAI53825.2021.9673317

5. Ishigami R., Zin T.T., Shinkawa N., Nishii R. Human identifi cation using X-Ray image matching. *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*. Hong Kong. 2017.

6. Rajpurkar P., Irvin J., Zhu K. et al. Chexnet: Radiologist-level pneumonia detection on chest x-rays with deep learning. 2017. arXiv URL preprint arXiv:1711.05225.

7. Costa M.V.L., Aguiar E.J. A Deep Learning-based Radiomics Approach for COVID-19 Detection from CXR Images using Ensemble Learning Model. *XXXVI International Symposium on Computer-Based Medical Systems*. L'Aquila, Italy, 2023. Pp. 517–522. DOI: 10.1109/CBMS58004.2023.00272

8. Radvansky M., Kudelka M., Kriegova E. Process of finding human knee in image based on multiple weighted thresholding and histograms of gradients. *XXIV International Carpathian Control Conference*. Miskolc-Szilv´asv´arad, Hungary, 2023. Pp. 358–363. DOI: 10.1109/ 10.1109/ICCC57093.2023.10178913

9. Pizer S.M., Amburn E.P., Austin J.D. Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1987. Vol. 39. Pp. 355–368. DOI: 10.1016/S0734-189X(87)80186-X

10. Cromartie R., Pizer S.M. Edge-affected context for adaptive contrast enhancement. *Proceedings of the XLLTH International Meeting on Information Processing in Medical Imaging: Lecture Notes in Computer Scienc*e. Berlin: Springer-Verlag. 1991. Pp. 474–485. DOI: 10.1007/BFb00337

11. Zuiderveld K.J. Contrast limited adaptive histogram equalization. *Graphics gems.* 1994. Pp. 474–485. DOI: 10.1016/B978-0-12-336156-1.50061-6

12. Kazakov M.A. Clustering Algorithm Based on Feature Space Partitioning. International *Russian Automation Conference*. 2022. Pp. 399–403. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896314

13. Sobel I. An Isotropic 3x3 Image Gradient Operator. Presentation at Stanford A.I. Project 1968. 2014.

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

Information about the author

Kazakov Mukhamed Anatolievich, 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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК: 629.127 Обзорная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178
EDN: NCBFQL

Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде

В. Н. Ле[1], А. Л. Ронжин[2]

[1]ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1
[2]Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук
199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39

Аннотация. Обсуждаются проблемы позиционирования и навигации роботов в водной среде с применением традиционных инерциальных систем, гидроакустических подходов, поверхностных GPS-буев, систем технического зрения, позволяющих получить относительные координаты положения робота в водоеме и спланировать маршрут к цели. Сложная и изменчивая окружающая среда накладывает дополнительные ограничения, требующие применения альтернативных методов SLAM, взаимодействия нескольких роботов. Комплексирование информации с нескольких датчиков различного типа или роботов повышает точность и надежность их позиционирования, позволяет избежать столкновений и коллизий на маршрутах. Рассмотренные подходы, применяемые технические средства, методы обработки информации представлены в виде оригинальных классификаций.

Ключевые слова: робототехника, навигация, позиционирование, SLAM, техническое зрение, гидроакустика, групповое управление роботами

Поступила 24.11.2023, одобрена после рецензирования 27.11.2023, принята к публикации 29.11.2023

Для цитирования. Ле В. Н., Ронжин А. Л. Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178

MSC: 68T40; 93C85 Review article

Methods and technical means of positioning and navigation of robots in the aquatic environment

V.N. Le[1], A.L. Ronzhin[2]

[1]Military Research and Educational Center of the Navy "Naval Academy"
197045, Russia, St. Petersburg, 17/1 Ushakovskaya embankment
[2]St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
199178, Russia, St. Petersburg, 39, 14th line of Vasilyevsky Island

Abstract. The issues of positioning and navigation of robots in the aquatic environment are discussed using traditional inertial and acoustic approaches, surface GPS buoys, technical vision systems allowing for obtaining relative coordinates of the robot's position in the reservoir and planning a route to the target. The complex and changing environment imposes additional constraints, necessitating the use of alternative SLAM methods and the interaction of multiple robots. Fusion of information from multiple sensors of

© Ле В. Н., Ронжин А. Л., 2023

different types or robots enhances the accuracy and reliability of positioning, allowing avoidance of collisions and conflicts on routes. The discussed approaches, applied technical means, and information processing methods are presented in the form of classifications.

Keywords: robotics, navigation, positioning, SLAM, underwater vision, hydroacoustic, group control of robots

Submitted 24.11.2023, approved after reviewing 27.11.2023, accepted for publication 29.11.2023

For citation. Le V.N, Ronzhin A.L. Methods and technical means of positioning and navigation of robots in the aquatic environment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178

Введение

Новые сенсорные системы и технологии искусственного интеллекта постепенно находят свое применение в области робототехники при решении задач наблюдения, обнаружения, отбора проб, ремонта технических сооружений, подъема объектов с глубины, в эвакуационных работах. Роботы могут не только решать опасные задачи, которые ранее выполнялись людьми, но и проводить всесторонние исследования на глубинах, которые невозможно изучить другими технологиями, например дистанционного зондирования. Роботы становятся важным инструментом для исследований мирового океана и внутренних пресных водоемов [1].

Задачи позиционирования и навигации являются ключевыми для роботов любой среды базирования. От точности их реализации зависит скорость движения и манипулирования предметами, а также сохранность как робота, так и внешних объектов. Для навигации робота необходимо решить четыре основные задачи: локализация робота, создание карты местности, планирование маршрута, управление движением робота. Локализация или позиционирование связаны с определением координат робота в глобальных или локальных системах посредством доступных бортовых сенсорных, инерциальных систем или внешних данных. Для создания карт могут применяться различные сенсоры, в том числе для уточнения карт и разметки положений новых статических и возникающих динамических препятствий. На основе доступной карты, координат текущего и целевого местоположения строится маршрут движения робота, оптимальный с точки зрения потребляемых временных, энергетических ресурсов или других критериев. Сформированный маршрут используется далее системой управления робота для осуществления движения, анализа окружающей среды и уточнения карты.

Решение перечисленных задач в водной среде затрудняется рядом факторов (рис. 1): высокая плотность среды и как следствие высокое давление на глубине, низкая освещенность, подводные течения и другие негативные факторы, влияющие на качество работы систем технического зрения, скорость беспроводной передачи данных, высокие риски протечек корпуса робота.

В настоящее время для позиционирования и навигации подводных транспортных средств применяются радиобуи на поверхности, подводные маяки, подводный видеомониторинг, комплексирование информации, поступающей от нескольких сенсоров. Каждый тип сенсора и технологий последующей обработки данных имеют свои преимущества и недостатки, поэтому в зависимости от прикладной задачи к роботу и его средствам предъявляются конкретные функциональные требования, влияющие на выбор аппаратных и программных средств позиционирования и навигации.



Рис. 1. *Негативные факторы водной среды и способы противодействия им*

Fig. 1. *Negative factors of the aquatic environment and ways to counter them*

Одним из основных преимуществ визуальной навигации является ее относительная простота реализации и значительный объем полезной информации для определения местоположения. Видеокамеры доступны в разных ценовых категориях и могут регистрировать детальные данные об окружающей среде в различных спектральных диапазонах. Современные технологии обеспечивают высокое качество изображений и небольшие габаритные размеры видеокамер, что делает их привлекательными для применения на роботах в водной среде.

Визуальная навигация также имеет преимущество в том, что она не подвержена проблемам, характерным для акустических и электромагнитных методов, таких как регистрация отраженных волн от ложных объектов. Однако для успешной визуальной навигации необходимо иметь прямую видимость между камерой и объектом, который нужно обнаружить или отследить, поэтому в подводной среде основными затруднениями являются низкая освещенность и повышенная мутность, которые необходимо учитывать при проектировании системы визуального позиционирования и навигации. Кроме того, изображения, сделанные в подводной среде, не обладают ярко выраженными признаками и текстурой, что делает визуальную сегментацию и классификацию объектов сложной задачей. Тем не менее это остается одним из наиболее перспективных подходов для роботов в благоприятных условиях видимости.

Развитие электромагнитного позиционирования сдерживает отсутствие достаточного объема имеющейся топографической информации. По мере создания соответствующих карт данный метод получит большее распространение в подводной навигации.

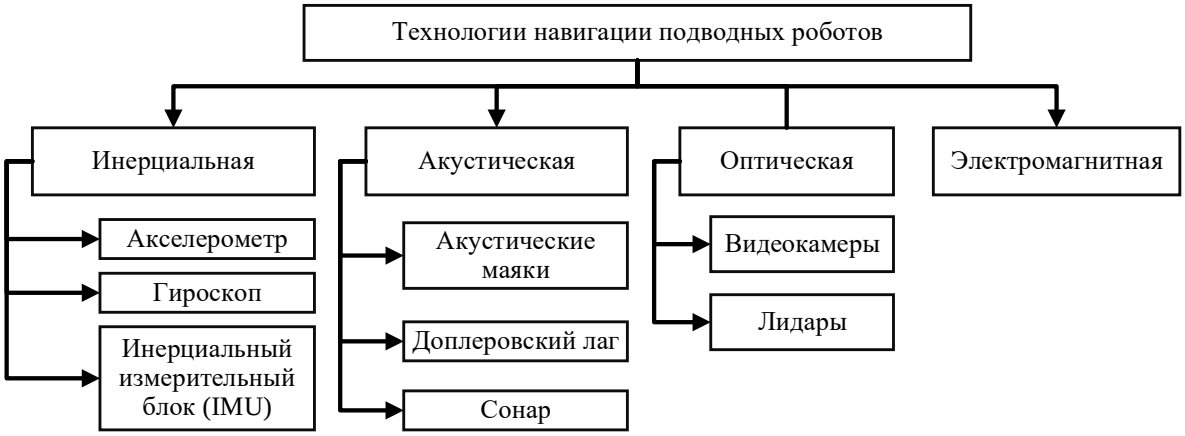


Рис. 2. *Классификация технологий позиционирования и навигации роботов в водной среде*

Fig. 2. *Classification of technologies for positioning and navigation of robots in the aquatic environment*

На практике если применяется только один метод, это приводит к погрешностям при определении положения робота под водой. Для повышения точности и надежности позиционировании на практике применяются методы комплексирования информации с применением разных типов технологий и датчиков. Далее в данной статье рассматриваются различные технологии и аппаратные средства навигации роботов, обсуждаются их недостатки и достоинства. Проанализированы существующие методы определения местоположения роботов под водой. Обсуждаются современные технологии навигации роботов и предложена их оригинальная классификация.

Анализ существующих методов позиционирования роботов в водной среде

Разработка полностью автономных средств навигации роботов в водной среде представляет собой сложную задачу прежде всего из-за отсутствия фиксированной структуры дна и низкой точности систем глобального позиционирования, поэтому необходимо максимально использовать доступные подводные датчики для сбора локальной информации. Однако на практике одиночные датчики не обеспечивают в подводной среде надежные сведения для навигации, поэтому применяются одновременно несколько гетерогенных датчиков. Интеграция информации от различных типов датчиков позволяет создать карту маркеров и использовать ее для навигации робота [2, 3].

На подводных устройствах есть два основных типа датчиков (рис. 3): 1) для измерения внутренних параметров изменения состояния робота во время его движения; 2) для анализа информации об окружающей среде. К датчикам первого типа относятся инерциальные навигационные устройства, Допплеровские скоростомеры, гироскопы, акселерометры, одометры и другие средства измерения движения устройства (например, скорость, угол, ускорение, пройденное расстояние). Датчики второго типа – инфракрасные датчики, сонары, ультразвуковые датчики, системы технического зрения – применяются для сбора характеристической информации об окружающей среде, например, расстояние до препятствий, их форма и взаимное расположение [4].

При использовании внутренних инерциальных средств их погрешность накапливается в процессе движения, поэтому на длительном временном интервале их точность о местопо-

ложении значительно падает и требуется корректировка на основе данных внешних систем [5]. В то же время применение локальных сенсорных систем в неопределенной среде позволяет оценить положение препятствий и избежать столкновения с ними в процессе навигации [6].

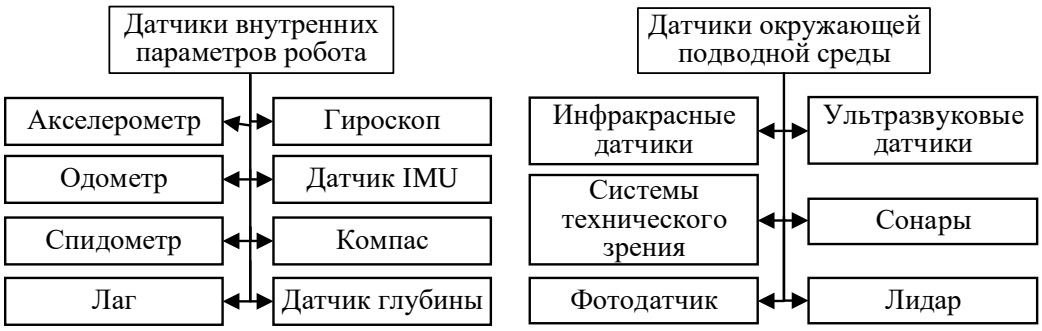


Рис. 3. *Тип датчика на подводных устройствах*

Fig. 3. *Type of sensor on underwater devices*

При объединении информации от множества гетерогенных датчиков могут быть применены различные способы комплексирования на разных этапах обработки. Наиболее распространенные методы включают в себя фильтры Калмана, сети Байеса, метод К-средних, статистическую обработку, методы теории Демпстера–Шейфера, кластерный анализ, метод голосования, нейронные сети и теорию нечетких множеств. За счет применения данных методов исключается сбой всей системы вследствие ошибки в работе отдельного датчика, что позволяет при нестабильности входных данных поддерживать стабильность и надежность системы управления роботом. Методы объединения информации разных сред с различными типами датчиков могут быть разделены на три типа: централизованные, децентрализованные и гибридные [7]. В централизованных методах данные, собранные каждым датчиком, направляются непосредственно к центральному вычислителю без какой-либо обработки и объединяются при завершении процесса комплексирования. В децентрализованных методах данные от датчиков собираются через определенные локальные вычислители, выполняющие предобработку, сжатие, а затем передаются на центральный вычислитель, где происходит окончательный процесс принятия решений. В гибридных методах часть данных, собранных датчиками, направляется к центральному вычислителю без обработки, а часть данных проходит предобработку [8].

Технологии гидроакустической навигации

Гидроакустическое позиционирование – метод, основанный на оценивании параметров звука, распространяемого в водной среде [9], является востребованным на практике при определении местоположения под водой, поскольку звуковые сигналы под водой распространяются на большие расстояния по сравнению с электромагнитными волнами. Определение местоположения и навигация под водой могут быть разделены на три типа: фиксированные, подвижные и переносные в зависимости от способа установки [10]. В фиксированной навигации устройства обычно закреплены на дне моря. Этот тип навигации дорог и имеет ограниченное применение только в фиксированных зонах. В подвижной навигации все устройства устанавливаются на материнский корабль, и область испытаний может быть легко изменена. Переносная навигация легкая, относительно небольшая по размеру и весу, готова к развертыванию и переработке, ее можно перемещать из одной экспериментальной области в другую с помощью самолета или автомобиля [11]. Типы подводных акустических

систем позиционирования и навигации различаются по структуре, но все они основаны на геометрической акустической локализации в водной среде. Фиксированная подводная акустическая локализация представляет собой высокоточное позиционирование и навигацию без накопления ошибок, что делает ее широко используемой технологией для определения местоположения под водой. Существуют три типа триангуляционных технологий водного звукового позиционирования, основанных на длине приемной антенны (рис 4): длиннобазисные (LBL), короткобазисные (SBL) и ультракороткобазисные (USBL).

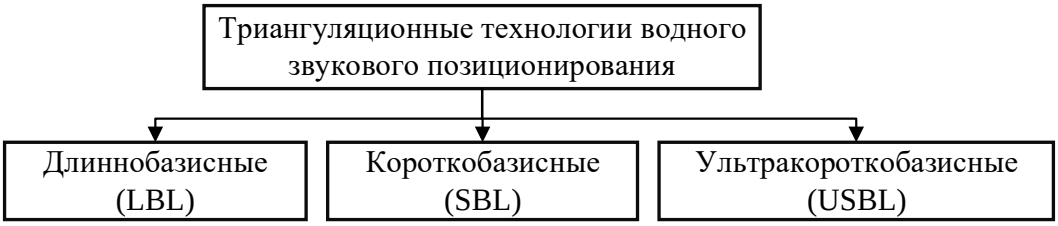


Рис. 4. *Типы технологий водного звукового позиционирования*

Fig. 4. *Types of waterborne sound positioning technologies*

Ультракороткобазисное гидроакустическое позиционирование используется в различных областях, таких как разработка месторождений нефти и газа, установка и обслуживание подводных кабелей и исследование морских минеральных ресурсов. Они обеспечивают точное позиционирование для оборудования, такого как телеуправляемые роботы и автономные роботы без кабелей. Высокоточная подводная микротопография также требует использования ультракороткобазисного позиционирования. Однако при использовании таких систем возникает множество источников ошибок, таких как ошибки измерения скорости звука, угла, расстояния, а также ошибки при установке и измерении температуры воды. Для минимизации этих ошибок необходимо использовать алгоритмы и функции коррекции или компенсации ошибок.

Гидроакустическое короткобазисное позиционирование (SBL) обладает высокой точностью и простой структурой системы, что делает ее удобной для перемещения и эксплуатации. Короткобазисная система может быть установлена на базовом судне, не требует коррекции ошибок при калибровке и подходит для позиционирования и выполнения высокоточных задач. Также широко используется на антиторпедных полигонах. Однако она не подходит для позиционирования объектов на дальних расстояниях.

Проектирование и развертывание подводного массива технических средств длиннобазисных систем гидроакустического позиционирования требует значительных усилий. Количество базовых маяков, расстояние между ними должны быть оптимизированы с учетом конкретных требований, разницы в глубине морского дна и других особенностей подводной топографии. Это необходимо для точной настройки системы гидроакустического позиционирования [12].

Технология позиционирования на основе надводных буев GPS

Технология подводного гидроакустического позиционирования и навигации решает проблемы кратковременного позиционирования и навигации роботов. Однако она недостаточно эффективна при долгосрочных подводных операциях. В таких случаях применение технологии GPS (глобальной системы позиционирования) играет важную роль, позволяя осуществлять позиционирование и навигацию с высокой точностью и на больших расстояниях. GPS обладает высокой точностью, гибкостью и простотой в эксплуатации, что делает его популярным среди потребителей и широко используемым в повседневной жизни. Однако из-за невозможности передачи сигнала через водную среду GPS не может быть непосредственно применен в подводных приложениях. Для выполнения функции подводной

навигации необходимо использовать другие устройства, такие как буи, которые передают данные GPS далее через водную среду с помощью акустических волн [13].

Для применения гидроакустической системы позиционирования под водой на роботе устанавливаются приемный преобразователь и дополнительные датчики для получения угловых параметров и вычисления расстояния с использованием акустических принципов. Методы позиционирования с тремя или четырьмя точками, также известные как «подводная GPS-система позиционирования», могут быть применены для определения местоположения робота [14]. Это позволяет достичь точного позиционирования и навигации под водой в режиме реального времени [15].

GPS-буй может фиксироваться на роботе, в этом случае данные получаются периодически при всплытии робота на поверхность. Также GPS-буй может иметь положительную плавучесть и закреплен кабелем таким образом, чтобы постоянно оставаться на поверхности воды. В этом случае точные навигационные данные принимаются роботом. Но натяжение кабеля создает определенное сопротивление, что увеличивает потребление энергии роботом и снижает его дальность действия и маскировку. Также может применяться один или несколько буев для увеличения точности и надежности позиционирования.

Технология позиционирования и навигации на основе технического зрения

Методы технического зрении определяют маркерные точки на изображении для определения местоположения видеокамеры, встроенной в робота. Визуальная информация дает более полное описание внешнего подводного мира по сравнению с другими датчиками, не накапливает ошибки со временем, поэтому может обеспечить стабильную работу и измерения в течение длительного времени [16].

Технология позиционирования и навигации на основе технического зрения имеет два типа на основе: монокулярного зрения и бинокулярного зрения с применением двух или более камер [17]. Позиционирование на основе монокулярного зрения осуществляется на основе анализа геометрических параметров или сопоставления характерных признаков. Изображение, обрабатываемое при монокулярном зрении, представляет собой проекцию целевого объекта в трехмерном пространстве на двумерную плоскость. Информация о дальности объекта восстанавливается в реальном времени при анализе информации о движении самого робота и изменении размеров объекта на изображении. Размеры робота, место установки, фокусное расстояние и другие параметры видеокамеры являются основными источниками собственной ошибки позиционирования робота на основе монокулярного зрения [18].

Бинокулярное стереозрение имитирует способ, которым глаза человека воспринимают сцену, наблюдая за одной и той же меткой с двух точек зрения [19]. Оригинальное изображение получается бинокулярной камерой, после его сегментации и извлечения признаков выполняется распознавание объектов и определение их местоположения. По сравнению с монокулярной системой технического зрения бинокулярная увеличивает зону обзора и снижает слепые зоны [20]. Обработка изображений в бинокулярной стереосистеме робота включает в себя захват изображения, калибровку камеры, извлечение признаков, стереосопоставление, восстановление трехмерной информации и другие компоненты.

Технология одновременной локализации и картографирования (SLAM)

Популярной технологией навигации роботов является одновременная локализация и построение карты (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM), позволяющая в процессе движения определять свое местоположение в неизвестной среде и строить карту этой среды [21]. Для достижения полностью автономного позиционирования и навигации

роботов необходимо перемещение робота по всей территории функционирования. Водная среда является изменчивой, поэтому использование заранее составленных карт окружающей среды не всегда эффективно для роботов, так как подводные течения меняют рельеф донных отложений. При решении задачи SLAM используются различные датчики, такие как видеокамеры, лидары, гироскопы и акселерометры, необходимые для регистрации данных о среде и движении робота (рис. 5).

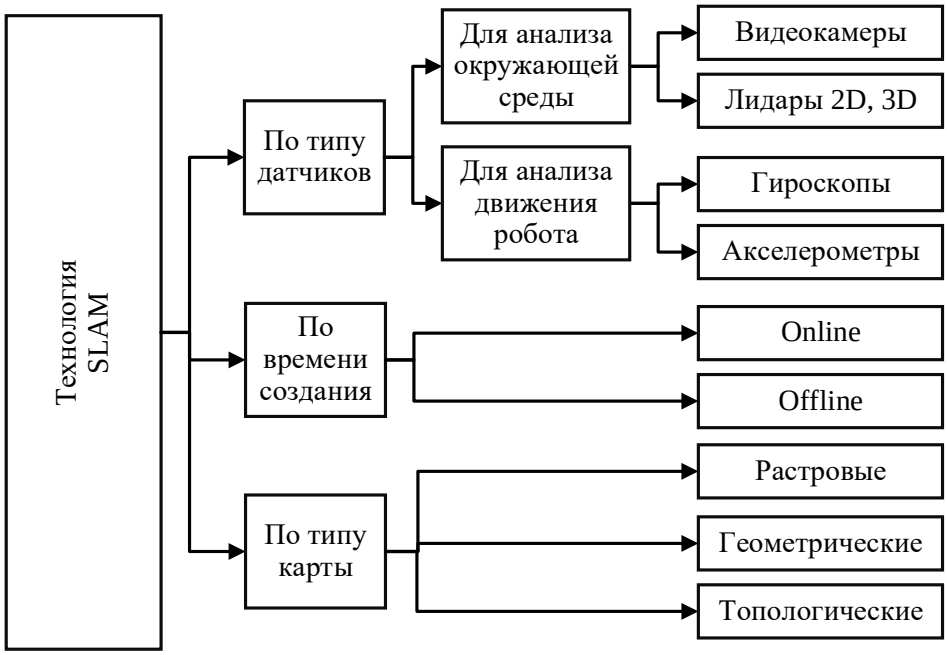


Рис. 5. *Классификация средств и карт SLAM*

Fig. 5. *Classification of SLAM tools and maps*

При онлайн-решении задачи SLAM на каждом шаге обновляются только текущее состояние робота и карта, при отсутствии достаточных вычислительных ресурсов или доступа к ним роботом производится запись со всех датчиков в процессе прохождения всей траектории и затем формируется карта [22]. В зависимости от типа данных, собранных сенсорами, карты создаются различных типов: растровые, геометрические и топологические [23].

При создании двумерных растровых карт используют 2D лидары и 3D лидары для пространственных сред [24]. Лидары обладают высокой точностью измерений, обеспечивая точные угловые данные и расстояния в широком диапазоне сканирования, что особенно полезно при планировании маршрутов роботов. Недостатками являются их высокая стоимость, особенности установки и низкая устойчивость к механическим повреждениям [25].

С развитием технологии SLAM на основе технического зрения роботы могут использовать свои собственные видеокамеры в качестве датчиков для создания геометрических карт. Применение видеокамер является более экономичным по сравнению с лидаром. Изображения, получаемые с видеокамер, более информативны и позволяют высоко дифференцировать объекты, что обеспечивает более точное позиционирование робота. Однако для обработки информации в режиме реального времени с видеокамеры требуется мощное вычислительное устройство.

Топологические карты, формируемые при SLAM, представляют собой графоподобное описание окружающей среды, а не точную геометрическую карту. В таком подходе узлы карты соответствуют значимым, легко распознаваемым местам, основываясь на биоинспирированной идее, заключающейся в том, что люди и животные не создают точные карты

окружающей среды, в которой они находятся, а строят упрощенные графические модели, позволяющие им эффективно перемещаться. Топологические карты обычно применяются для навигации в простых средах на небольшой территории [26].

Позиционирование и навигация при функционировании группы роботов

Совместное позиционирование и навигация нескольких роботов позволяет им обмениваться информацией через подводную акустическую связь и улучшать точность своего позиционирования с помощью технологий комплексирования информации, повышая устойчивость к сбоям и обеспечивая возможность реконфигурации сенсорной системы [27]. При групповом управлении в децентрализованном подходе все роботы оснащены одинаковыми датчиками и могут получать информацию от любого другого участника группы. При централизованном подходе роботы-лидеры оснащены датчиками высокой производительности, а остальные оснащены недорогими датчиками для получения информации о своем местоположении от лидера по гидроакустическому каналу через определенные промежутки времени [28]. По сравнению с навигацией одиночного АНПА совместное позиционирование и навигация группы роботов повышают точность, устойчивость системы, позволяют избежать столкновений с препятствиями и между собой [29].

Заключение

В данной статье представлено несколько классических методов и перспективных направлений в области позиционирования и навигации роботов в водной среде. Каждый метод имеет свои особенности, и выбор подходящего зависит от условий среды и целевого назначения робота. Триангуляционные гидроакустические методы являются наиболее распространенными. Инерциальные системы самые простые и высокоточные, но накапливают ошибку со временем движения. Применение лидаров, видеокамер и методов технического зрения требует наличия значительных вычислительных ресурсов. Комбинирование инерциальных технологий подводного позиционирования и навигации на основе надводных буев GPS позволяет избежать накопления ошибок. Использование группы роботов повышает стабильность и надежность всей системы путем нивелирования сбоев и погрешностей показаний отдельных датчиков.

REFERENCES

1. *Морозов Р. О., Горелый А. Е., Рыжов В. А.* Интеллектуальные системы навигации и планирования МРТК // Морские информационно-управляющие системы. 2021. С. 34–43.

Morozov R.O., Gorely A.E., Ryzhov V.A. Intelligent navigation and planning systems for AUVs. *Morskiye informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Marine information management systems]. 2021. Pp. 34–43. (In Russian)

2. Nicosevici T., Garcia R., Carreras M., Villanueva M. A review of sensor fusion techniques for underwater vehicle navigation. *Oceans'-04*. MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No. 04CH37600). 2004. Vol. 3. Pp. 1600–1605. DOI: 10.1109/OCEANS.2004.1406361.

3. Borkowski P. The ship movement trajectory prediction algorithm using navigational data fusion. *Sensors*. 2017. 17(6). P. 1432. DOI: https://doi.org/10.3390/s17061432.

4. Yuan K., Wang H., Zhang H. Robot position realization based on multi-sensor information fusion algorithm. *Fourth International Symposium on Computational Intelligence and Design*. 2011. Pp. 294–297. DOI: 10.1109/ISCID.2011.81.

5. Yang Q., Sun J. An underwater autonomous robot based on multi-sensor data fusion. *In 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Vol. 2. Pp. 9139–9143. DOI: 10.1109/WCICA.2006.1713768

6. Kamil F., Hong T. S., Khaksar W. et al. New robot navigation algorithm for arbitrary unknown dynamic environments based on future prediction and priority behavior. *Expert Systems with Applications.* 2017. Vol. 86. Pp. 274–291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.059S

7. Gravina R., Afinia P., Ghasemzadeh H., Fortino G. Multi-sensor fusion in body sensor networks: state-of-the-art and research challenges. *Information Fusion.* 2017. Vol. 35. Pp. 68–80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.09.005

8. Majumder S., Scheding S., Durrant-Whyte H. F. Multisensor data fusion for underwater navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. Vol. 35. Pp. 97–108. DOI: https://doi.org/ 10.1016/S0921-8890(00)00126-3

9. Alcocer A., Oliveira P., Pascoal A. Study and implementation of an EKF GIB-based underwater positioning system. *Control Engineering Practice*. 2007. Vol. 15. Pp. 689–701. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.04.001

10. McManus S.J. A method of Navigation using a Modified Ultra Short BaseLine Directional Acoustic Transponder. *Oceans 2007 – Europe*. 2007. DOI: 10.1109/OCEANSE.2007.4302343

11. Thomson D., Elson S. New generation acoustic positioning systems. *Oceans '02 MTS/IEEE*. 2002. Vol. 3. Pp. 1312–1318. DOI: 10.1109/OCEANS.2002.1191828

12. *Крестовников К. Д., Ершов А. А., Савельев А. И.* Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4–1(58). С. 144–155. DOI: https://doi.org/10.37220/ MIT.2022.58.4.036

Krestovnikov K.D., Ershov A.A., Savelyev A.I. Approach to wireless charging of the battery for autonomous unmanned underwater vehicles. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii* [Maritime intelligent technologies]. 2022. № 4–1(58). Pp. 144–155. DOI: https://doi.org/ 10.37220/MIT.2022.58.4.036. (In Russian)

13. *Саватеев Н. Н.* Использование спутниковых навигационных систем для определения местоположения объекта под водой // Информационные технологии в образовании. 2021. С. 214–219.

Savateev N.N. Utilization of satellite navigation systems for determining the location of underwater objects. *Informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii* [Information technologies in education]. 2021. Pp. 214–219. (In Russian)

14. Spiess F.N., Chadwell C.D., Hildebrand J.A. et al. Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1998. Vol. 108. Pp. 101–112. DOI: https://doi.org/ 10.1016/S0031-9201(98)00089-2

15. Thomas H.G. New advanced underwater navigation techniques based on surface relay buoys. *Proceedings of Oceans'94*. 1994. Vol. 3. Pp. 111–395. DOI: 10.1109/ OCEANS.1994.364231

16. Aider O.A., Hoppenot P., Colle E. A model-based method for indoor mobile robot localization using monocular vision and straight-line correspondences. *Robotics and Autonomous Systems*. 2005. Vol. 52. Pp. 229–246. DOI: https://doi.org/10.1016/j.robot.2005.03.002

17. Carreras M., Ridao P., Garcia R., Nicosevici T. Vision-based localization of an underwater robot in a structured environment. 2003 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422).* 2003. Vol. 1. Pp. 971–976. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241718

18. Liu T., Wan L., Liang X.W. A monocular vision measurement algorithm based on the underwater robot. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 532. Pp. 165–169. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.532.165

19. Mingjun Z., Shupeng L., Xuan L. Research on technologies of underwater feature extraction and target location based on binocular vision. *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC). IEEE*. 2015. Pp. 5778–5784. DOI: 10.1109/CCDC.2015.7161837

20. Jian X., Xiaoyuan C., Xiaoping S., Hang L. Target recognition and location based on binocular vision system of UUV. *2015 34th Chinese Control Conference (CCC). IEEE*. 2015. Pp. 3959–3963. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7260249

21. *Вялков И. К., Тимош П. С.* Использование SLAM метода для внутренней навигации с применением AR технологий // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. С. 331–333.

Vyalkov I.K., Timosh P.S. Utilization of SLAM method for indoor navigation using AR technologies. *Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific-Technical and Economic Cooperation of ATR Countries in the 21st Century]. 2023. Pp. 331–333. (In Russian)

22. *Луговской В. В.* SLAM как передовой метод навигации и его виды // Инновационная наука. 2023. № 4–2. С. 46–49.

Lugovskoy V.V. SLAM as an Advanced Navigation Method and Its Types. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Science]. 2023. № 4–2. Pp. 46–49. (In Russian)

23. Zhao W., He T., Sani A. Y. M., Yao T. Review of SLAM Techniques For Autonomous Underwater Vehicles. *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics. Intelligent Control and Artificial Intelligence*. 2019. Pp. 384–389. DOI: https://doi.org/10.1145/3366194.3366262

24. Hess W., Kohler D., Rapp H., Andor D. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. 2016 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA*). 2016. Pp. 1271–1278. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487258

25. Dubé R., Gawel A., Sommer H. et al. An online multi-robot SLAM system for 3D LiDARs. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS*). IEEE, 2017. Pp. 1004–1011. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202268

26. De Freitas C.M. Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor. *CMS de Freitas*. 2020.

27. Paul L., Sot M., Leonard J.J. Decentralized cooperative trajectory estimation for autonomous underwater vehicles. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2014. Pp. 184–191. DOI:10.1109/IROS.2014.6942559

28. Li Z., Jiang C., Gu X. et al. Collaborative positioning for swarms: A brief survey of vision, LiDAR and wireless sensors based methods. *Defence Technology*. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.05.013

29. Pan X., Kang F., Wang Y. Cooperative navigation for multi-UUV using relative observations. *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*. 2010. Vol. 7. Pp. 3191–3194. DOI:10.1109/CISP.2010.5647971

30. Watson S., Duecker D. A., Groves K. Localization of Unmanned Underwater Vehicles (UUVs) in Complex and Confused Environments: A Review. Sensors, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/s20216203

31. Barsha B., Durant-Whyte H.F. Inertial navigation system for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*. 1995. Vol. 11. Pp. 328–342. DOI: 10.1109/70.388775

32. Tan H.P., Diamant R., Seah W.K., Waldmeyer M. A survey of techniques and challenges in underwater localization. *Ocean Engineering*. 2011. Vol. 38. Pp. 1663–1676. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.017

33. Wu Y., Ta X., Xiao R. et al. Survey of underwater robot positioning navigation. *Applied Ocean Research*. 2019. Vol. 90. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.apor.2019.06.002

Информация об авторах

Ле Ван Нгиа, специалитет, Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия»;
197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1;
lenghia18071999@gmail.com
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, директор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук;
199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39;
ronzhin@iias.spb.su, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8903-3508

Information about the authors

Le Van Nghia, Specialist's Degree, Military Research and Educational Center of the Navy “Naval Academy”;
197045, Russia, St. Petersburg, 17/1, Ushakovskaya embankment;
lenghia18071999@gmail.com
Ronzhin Andrey Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences;
199178, Russia, St. Petersburg, 39, 14th line of Vasilyevsky Island;
ronzhin@iias.spb.su, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8903-3508

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.89 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-179-192
EDN: RZZICI

Алгоритм нейрокогнитивного обучения мультиагентной системы эволюционного моделирования экспрессии генов по данным ПЦР-анализа растений

З. В. Нагоев, М. И. Анчёков, Ж. Х. Курашев, А. А. Хамов

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Работа нацелена на создание методологии применения систем общего искусственного интеллекта для управления процессом создания новых гибридов растений с заданным набором хозяйственно полезных признаков. Разработаны основные принципы создания имитационных моделей растений на основе мультиагентного моделирования на базе укрупненных условных агентов-клеток, синтез поведения которых выполняется управляющей нейрокогнитивной архитектурой. Разработаны основные принципы создания системы автоматического сбора данных для эволюционного машинного обучения интеллектуальных экспертных систем селекции и семеноводства на основе роботизированного цифрового фенотипирования и генетических данных. Разработан алгоритм обучения децентрализованной системы управления ростом и развитием имитационных моделей растений на основе идентификации феногенотипических характеристик процессов роста и развития, детерминированных экспрессией генов растения.

Ключевые слова: общий искусственный интеллект, мультиагентные системы, нейрокогнитивные архитектуры, селекция растений, экспрессия генов, машинное обучение, цифровое фенотипирование

Поступила 04.12.2023, одобрена после рецензирования 08.12.2023, принята к публикации 10.12.2023

Для цитирования. Нагоев З. В., Анчёков М. И., Курашев Ж. Х., Хамов А. А. Алгоритм нейрокогнитивного обучения мультиагентной системы эволюционного моделирования экспрессии генов по данным ПЦР-анализа растений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 179–192. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-179-192

MSC: 68T42 Original article

Neurocognitive learning algorithm for a multi-agent system for evolutionary modeling of gene expression according to PCR analysis of plants

Z.V. Nagoev, M.I. Anchekov, Zh.Kh. Kurashev, A.A. Khamov

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The work is aimed at creating a methodology for using general artificial intelligence systems to manage the process of creating new plant hybrids with a given set of economically useful traits. The basic principles for creating plant simulation models based on multi-agent modeling based on enlarged conditional cell agents, the synthesis of whose behavior is carried out by the controling neurocognitive architecture, have been developed. The basic principles for creating an automatic data collection system

© Нагоев З. В., Анчёков М. И., Курашев Ж. Х., Хамов А. А., 2023

for evolutionary machine learning of intelligent expert systems for breeding and seed production based on robotic digital phenotyping and genetic data have been developed. An algorithm has been developed for training a decentralized system for controlling the growth and development of plant simulation models based on the identification of phenogenotypic characteristics of growth and development processes determined by the expression of plant genes.

Keywords: artificial general intelligence, multi-agent systems, neurocognitive architectures, plant breeding, gene expression, machine learning, digital phenotyping

Submitted 04.12.2023, approved after reviewing 08.12.2023, accepted for publication 10.12.2023

For citation. Nagoev Z.V., Anchekov M.I., Kurashev Zh.Kh., Khamov A.A. Neurocognitive learning algorithm for a multi-agent system for evolutionary modeling of gene expression according to PCR analysis of plants. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 179–192. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-179-192

Введение

Задача создания интеллектуальных экспертных информационных систем селекции и семеноводства, основанных на моделях биологических процессов, актуализируется в связи с необходимостью повышения эффективности соответствующего производственного цикла с целью создания новых сортов полезных растений. Основу такого роста в данном случае может составить существенная экономия времени и ресурсов на формирование и реализацию плана гибридизации, составляемого с учетом результатов работы интеллектуальных моделей прогнозирования состава и свойств хозяйственно полезных признаков новых гибридов.

В [1] была предложена концепция коллаборативной селекционной системы на основе консорциума интеллектуальных агентов, реализующих управление селекционными, семеноводческими, технологическими и логистическими процессами в интересах комплексной автоматизации.

В [2] рассмотрены возможности применения для создания таких интеллектуальных агентов подхода на основе использования эволюционного моделирования для организации процесса многопоколенной оптимизации управляющих мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

Данное исследование представляет собой дальнейшее развитие идей, сформулированных в процитированных выше работах, в части, касающейся непосредственно интеллектуализации самого процесса вегетации растения. Его ***целью*** *является разработка методологии применения систем общего искусственного интеллекта для управления процессом создания новых гибридов растений с заданным набором хозяйственно полезных признаков.*

Как известно, рост и формирование растения происходят на основе фундаментальных процессов образования, развития и дифференциации новых клеток в его составе. Эти процессы в основе своей детерминированы экспрессией различных генов из состава генотипа этого растения. На уровне абстрактного рассмотрения этот процесс подобен выполнению мультиагентного алгоритма, в котором агенты-клетки выполняют программы, закодированные в их геномах, взаимодействуя друг с другом и с внешней окружающей средой.

В идеале задача селекционера состоит в том, чтобы научиться управлять процессами экспрессии таких генов в интересах создания условий для формирования целевых показателей параметров, определяющих ценность хозяйственно полезных признаков растения, как правило, являющихся предельно достижимыми или ранее к моменту планирования селекционного цикла никогда не достигавшимися. Сегодня возможности такого управле-

ния крайне ограничены. В основном это управление структурой генотипа, выполняемое в рамках традиционного процесса гибридизации [3, 4, 5, 6].

Активно развиваются генно-инженерные подходы, позволяющие интенсифицировать процесс гибридизации за счет геномного редактирования [7].

В глобальном методологическом аспекте можно выделить две ключевые проблемы эффективного управления генетическими процессами с целью достижения высоких фенотипических показателей – проблема понимания и проблема реализации.

Первая проблема состоит в том, что процессы экспрессии генов крайне сложны, разнообразны, многочисленны, синхронны, децентрализованы и взаимозависимы, что препятствует построению их моделей и затрудняет понимание характера, определение ключевых параметров, идентификаторов и переменных управления.

Вторая проблема вытекает из первой и состоит в том, что управление этими процессами даже при достижении высокого уровня их понимания требует разработки методик влияния на генетические процессы, параметры управления которых актуализируются на молекулярном уровне.

Данная работа направлена на решение первой из обозначенных проблем. Средством, которое мы избрали для продвижения на пути к пониманию процессов экспрессии генов, является компьютерное моделирование. В перспективе мы планируем разработать полнофункциональную имитационную модель генотипа кукурузы, состоящую из имитационных моделей геномов клеток различных специализаций в составе полнофункциональной мультиклеточной модели растения. В этой модели будут реализованы алгоритмы деления, специализации, роста и развития клеток на основе интерпретации генетической программы, закодированной в модели ДНК. Мы надеемся разработать мультиагентные алгоритмы взаимодействия имитационных моделей клеток в составе мультиклеточного организма, согласованные в рамках представления макроскопических онтофилогенетических процессов. Такие алгоритмы будут основаны на модели поведения живой клетки, построенной на основе концепции синтеза поведения под управлением *мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры* [8].

Имитационная модель процесса гибридизации будет построена на основе эволюционного алгоритма над хромосомными наборами, кодирующими структуру и состав таких управляющих мультиагентных нейрокогнитивных архитектур для всех агентов в составе компьютерной симуляции растения.

*Основной **задачей** данной работы является разработка алгоритма нейрокогнитивного обучения мультиагентной системы эволюционного моделирования экспрессии генов по данным лабораторных исследований.*

1. Интеллектуальная система эволюционного моделирования экспрессии генов растений

В данной работе в целях создания и обучения вышеописанной системы имитационного моделирования мы ориентируемся на метод контроля экспрессии генов, основанный на анализе клеточного материала частей растения, подверженных интенсивному росту. Исходя из того, что такой рост является генно-детерминированным процессом, его проявление служит точным маркером наличия подлежащих процессов экспрессии комплексов генов, содержащихся в геномах клеток именно тех тканей организма растения, которые и претерпевают такой интенсивный рост.

В [9] описаны стратегические перспективы применения роботов для выполнения некоторых ключевых операций селекционно-семеноводческого цикла. В перспективе операцию забора биологического материала в различных частях растения, в которых наблюдается интенсивный рост тканей, смогут выполнять те же роботы, которые осуществляют ежедневное цифровое фенотипирование растений.

Интеллектуальная система имитационного моделирования процессов роста и развития растений должна быть построена как открытая система. Необходимо обеспечить входные потоки данных из всех доступных источников данных. В основу способности концептуализируемой имитационной модели аппроксимировать процессы генно-детерминированного роста и развития растения будут положены такие свойства моделирующей мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, как децентрализованность и распределенность, коммуникативная связность, гетеромасштабность, обучаемость на всех уровнях идентификации исследуемых процессов, архитектурное соответствие им и другие.

Такая имитационная модель будет включать в себя от нескольких миллионов до нескольких миллиардов программных агентов, что вполне соотносится как с возможностями современных вычислительных систем, так и с открытым характером системы, основанной на методах аппроксимации законов взаимодействия структурно-функциональных элементов моделируемых объектов, построенных на применении самоорганизующихся мультиагентных рекурсивных нейрокогнитивных архитектур.

Свойство гетеромасштабности проявляется в том, что программные агенты могут моделировать поведение «естественных» «природных» агентов, существующих и функционирующих в составе объекта моделирования (например, растения) на уровнях различных масштабов – от наноскопического до макроскопического – и при этом взаимодействовать не только с программными агентами, равными по масштабу, но и с агентами, действующими на уровнях как меньшего, так и большего масштабов. Например, нуклеотиды, кодоны, управляющие последовательности, открытые рамки считывания, гены, ДНК, хромосомы, аминокислоты, белки, части растений, сами растения, объекты окружающей растение среды и т.д.

При этом основным инструментом абстрагирования, позволяющим выделить ключевые для целей моделирования свойства частей объекта на любом уровне масштаба, является возможность построения агента как субъекта синтеза своего поведения, выполняемого под управлением локальной автономной системы управления. Такая система управления в общем случае представляет собой мультиагентную нейрокогнитивную архитектуру, реализующую процедуры синтеза поведения программного агента с использованием мультиагентных баз знаний, содержащихся во внутренних агентах нейрокогнитивной архитектуры (акторах) в узлах различной функциональной специализации в составе этой когнитивной архитектуры.

Как уже указывалось, и сегодня многое о поведении таких «природных» агентов, как макромолекулы, клетки и клеточные комплексы, ткани и органы, отдельные организмы, еще не известно науке и является предметом научного исследования. Поэтому такая гетеромасштабная мультиагентная модель должна по определению носить фрагментарный, открытый характер и достраиваться на основе обучения функций систем управления отдельных агентов путем анализа прецедентов и модификации мультиагентных знаний на их основе.

Предлагается строить имитационную мультиагентную модель растения как систему взаимодействующих между собой имитационных моделей отдельных программных агентов – укрупненных (условных) клеток различной функциональной специализации. Каждая

такая клетка в свою очередь моделируется мультиагентной системой искусственной жизни (Artificial Life), представляющей собой рационального программного агента, максимизирующего многокритериальную целевую функцию.

С учетом оценки количества клеток в сформировавшемся растении кукурузы порядка 10^{11} теоретически можно с применением современных параллельных вычислительных систем построить имитационную модель такого растения, которой вычислительный агент будут соответствовать каждой клетке растения. Однако на практике, конечно, в этом нет необходимости, так как, во-первых, клетки в различных структурно и функционально значимых частях растений достаточно однородны, а, во-вторых, для оценки исследуемых феногенетических закономерностей совершенно не требуется такая точность, так как все оценки хозяйственно полезных признаков связаны с макроскопическими параметрами.

Поэтому под агентом-клеткой мы понимаем имитационную модель множества клеток (кластер клеток) растения, демонстрирующих структурную и функциональную однородность в некотором заданном диапазоне существенных параметров. Соответственно, такой условной «клетке» мы приписываем мезомасштабные свойства, количественная оценка значений которых коррелирует с оценкой совокупности клеток реального растения, относимых к данному кластеру на основе классифицирующего признака структурно-функциональной однородности. К таким свойствам можно отнести, например, пространственные размеры, массу, соотношение содержания тех или иных веществ, скорость роста и т.п. мезомасштабные характеристики.

В то же время такая мезомасштабная структурно-функциональная единица – условная «клетка» – может стать и основой для моделирования генетических процессов, так как эти процессы даже в большей степени, чем макроскопические, характеризуются структурной и функциональной однородностью.

Таким образом, мезомасштабный агент-клетка рассматривается нами как основной элемент имитационной феногенетической модели растения. Выбор конкретных значений масштаба зависит от целей моделирования, доступных вычислительных ресурсов, применяемых конкретных имитационных алгоритмов и вычислительных моделей и, в общем случае, должен быть одним из результатов машинного обучения по итогам выполнения серий вычислительных экспериментов на конкретных имитационных моделях растений.

В перспективе по мере накопления знаний в системе, роста вычислительной производительности, развития методов имитационного моделирования, идентификации и машинного обучения масштаб кластера клеток может стремиться к реальному.

2. Основные принципы имитационного моделирования агентов-клеток растений

Агент-клетка, будучи системой искусственной жизни, синтезирует свое поведение в дискретном времени. В данном случае под поведением мы понимаем смену состояний системы «агент – среда», в которой определен такой агент-клетка. Синтез поведения агента направлен на максимизацию целевой функции путем разрешения т.н. *проблемных ситуаций* – последовательностей событий, идентифицируемых управляющей нейрокогнитивной архитектурой агента-клетки, в составе которой есть события, ведущие к существенным приобретениям или к уменьшению значений целевой функции.

В результате реализации процесса идентификации и решения проблем агент-клетка переходит через определенную последовательность состояний системы «агент – среда». В

конечном счете агент-клетка, набрав определенное количество энергии, делится на двух новых агентов-клеток, прекращая тем самым свое существование как таковое, но опосредованно продолжая его в этих двух агентах-клетках.

Примем, что для обозначения отправки порции энергии (выражает значения целевой функции агента-клетки) Δe будем использовать оператор $' \to '$. Например, факт отправки интеллектуальным агентом $\aleph_i^{\gimel}$ (многоклеточное растение) порции энергии Δe агенту-клетке $\beth_k^{ij(\gimel-1)}$ запишем:

$$\aleph_i^{\gimel} \to \beth_k^{ij(\gimel-1)} : \Delta e.$$

Агент-клетка $\beth_{kT_j}^{ij(\gimel-1)}$ типа T_j, расположенный в k-й позиции j-го функционального узла интеллектуального агента, представляет собой оптимизационную машину, максимизирующую свою локальную *целевую функцию* энергии:

$$z_{\tau_b}^{\tau_c}\left(\beth_{kT_j}^{ij(\gimel-1)}\right) = \Delta\nu_{kT_jb}^{ij} - \Delta\nu_{kL}^{ij} * \Delta\tau_b^c - \mathrm{N}\left(\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}\right) - \Delta\mathrm{N}_{ijk}^{ixy} +$$

$$+\Delta\mathrm{N}_{ixy}^{ijk} + \Delta\mathrm{N}^r\left(\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}\right),$$

где $\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c} = \left\{\delta_{h\tau_u}^{ijk\tau_q}, b \le u \le q \le c\right\}$ – множество h-х действий (операций, функций, планов) $\delta_{h\tau_u}^{ijk\tau_q}$, которые клетка $\beth_{kT_j}^{ij(\gimel-1)}$ выполняет на отрезке времени (на протяжении своей «жизни») $[\tau_b \dots \tau_c]$, а $\mathrm{N}\left(\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}\right)$ – количество энергии, которое он соответственно на это затрачивает:

$$\mathrm{N}\left(\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}\right) = \sum_{h=1}^{\left|\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}\right|} \Delta\nu_h^{ijk}, \beth_k^{ij(\gimel-1)} \to W : \Delta\nu_h^{ijk},$$

рассеивая его в среду W и выполняя, таким образом, некоторое поведение, состоящее из действий, входящих в $\Delta_{k\tau_b}^{ijh\tau_c}$;

$$\Delta\mathrm{N}_{ijk}^{ixy} = \sum_{\tau=\tau_b}^{\tau_c} \sum_{x=1}^{n\left(\aleph_i^{\gimel}, \beth_{yT_x}^{ix(\gimel-1)}\right)} \Delta\nu_{ijk}^{ixy}$$

– общее количество энергии, которое агент-клетка $\beth_{kT_j}^{ij(\gimel-1)}$ отправил в качестве вознаграждения другим агнейронам $\beth_{yT_x}^{ix(\gimel-1)} \in \aleph_i^{\gimel}$ в обмен на предоставляемую ими информацию или на обязательства, в соответствии с которыми эти агнейроны должны выполнить некоторые действия, $n\left(\aleph_i^{\gimel}, \beth_{yT_x}^{ix(\gimel-1)}\right)$ – функция, возвращающая количество таких агнейронов;

$$\Delta\mathrm{N}_{ixy}^{ijk} = \sum_{\tau=\tau_b}^{\tau_c} \sum_{x=1}^{n\left(\aleph_i^{\gimel}, \beth_{yT_x}^{ix(\gimel-1)}\right)} \Delta\nu_{ixy}^{ijk}$$

– общее количество ноотропа, которое агент-клетка $\beth_{kT_j}^{ij(\gimel-1)}$ получил в качестве вознаграждения от других агнейронов $\beth_{yT_x}^{ix(\gimel-1)} \in \aleph_i^{\gimel}$ в обмен на предоставляемую им информа-

цию, или на обязательства, в соответствии с которыми этот агент-клетка должен выполнить некоторые действия;

$$\Delta \mathrm{N}^{r}\left(\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}\right)=\sum_{h=1}^{\left|\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}\right|}\Delta v_h^{ijkr},\ ב_k^{ij(ך-1)}\rightarrow W\colon \Delta v_h^{ijkr}$$

– общее количество ноотропа, которое агент-клетка получает в результате выполнения некоторого поведения, состоящего из действий, входящих в $\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}$, от интеллектуального агента $א_i^{ך}$ за выполнение действий $\Delta_{h\tau_b}^{ijk\tau_c}$. Предполагается, что действия агнейрона $ב_{kT_j}^{ij(ך-1)}$ выгодны интеллектуальному агенту $א_i^{ך}$, направлены на достижение некоторых общесистемных результатов.

Таким образом, агент-клетка расходует энергию на поддержание своей жизни, выполнение действий (дополнительных), отправку энергии другим агентам-клеткам в оплату услуг по контрактам, а также в результате перехода в определенные (негативные) состояния, в связи выполнением определенных действий. В свою очередь он получает энергию от других агентов-клеток в оплату услуг, которые в соответствии с контрактами он оказывает им, а также от самого интеллектуального агента в связи с переходами в некоторые состояния в результате выполнения агентом-клеткой определенного поведения.

Агент-клетка так же, как и интеллектуальный агент, является проактивным агентом, синтезирующим свое поведение в системе «агент – среда», только в качестве «агента» выступает он сам, а в качестве внешней по отношению к нему среды рассматривается не окружающий мир W, а интеллектуальный агент $א_i^{ך}$, т.е. все растение. Поэтому агент-клетка в свою очередь состоит из внутренних структурных агентов – *акторов*, обеспечивающих синтез необходимых для построения своего локального графа решений состояний и действий.

Так как мультиагентная нейрокогнитивная архитектура рекурсивная, а основная функция агента-клетки – обнаружение и решение проблем в системе «агент – среда» на основе синтеза своего поведения – аналогична основной функции интеллектуального агента, в качестве организационного паттерна когнитивной архитектуры агента-клетки также избран инвариант мультиагентной когнитивной архитектуры. На рисунке 1 приведена когнитивная архитектура агента-клетки, включающая в себя акторов (изображены объемными геометрическими фигурами в квадратных рамках) в составе инварианта его когнитивной архитектуры.

На рисунке 1 видно, что подобно агентам-клеткам в составе когнитивной архитектуры интеллектуального агента акторы в составе когнитивной архитектуры агента-клетки располагаются на определенных уровнях, соответствующих когнитивным узлам инварианта мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры. Эти уровни для когнитивной архитектуры агента-клетки мы называем *акторкогнитонами*. Актор $\alpha_{hT_l}^{ijkl}$ типа T_l, располагается в l-м акторкогнитоне когнитивной архитектуры агента-клетки $ב_{kT_j}^{ij(ך-1)}$. Индекс h обозначает номер актора.

Таким образом, агент-клетка $ב_{kT_j}^{ij(ך-1)}$ содержит в себе акторкогнитоны $K_{lT_l}^{ijk}$, которые также подразделяются на типы T_l, но в отличие от функциональных узлов интеллектуального агента $ק_{jT_j}^{i}$ в их состав входят не агнейроны $ב_{kT_j}^{ij(ך-1)}$, а акторы $\alpha_{hT_l'}^{ijkl}$.

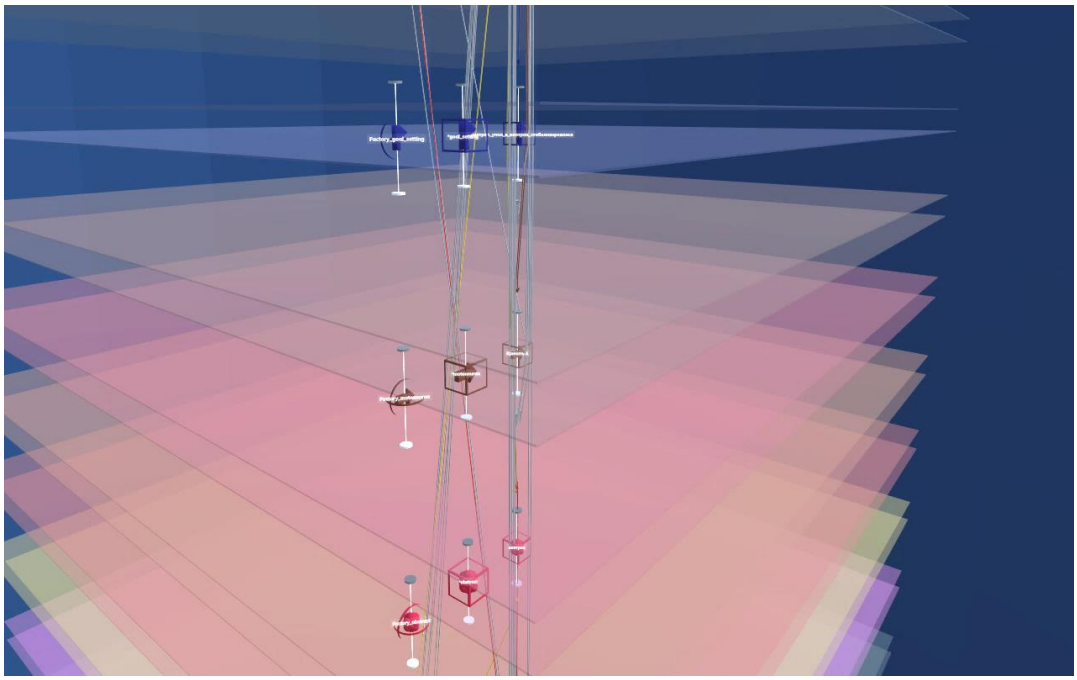


Рис. 1. *Изображение когнитивной архитектуры агента-клетки в разрабатываемой программе автоматизированного проектирования*

Fig. 1. *Image of the cognitive architecture of the cell agent in the developed computer-aided design program*

Основное различие между агентами-клетками и акторами состоит в том, что актор является минимальным агентом, на уровне которого рекурсия мультиагентной когнитивной архитектуры заканчивается.

Таким образом, агент-клетка синтезирует свое поведение, решая оптимизационную задачу максимизации вышеуказанной целевой функции.

Источником пополнения энергии служит внешняя по отношению к этому агенту-клетке среда – имитационная модель всего растения.

В агенте-клетке можно выделить две основные функциональные подсистемы – тело и систему управления. В свою очередь, как было показано в [3], система управления состоит из мультиагентной когнитивной архитектуры и *генома*.

Все внутренние функциональные элементы агента-клетки также имеют возможность взаимодействовать друг с другом, однако они сами по себе уже не являются агентами искусственной жизни. Условно можно считать, что они представляют собой функциональные аналоги комплексов некоторых органелл в составе клетки.

Таким образом, в нашей модели агент-клетка содержит в себе мультиагентную систему имитационных моделей некоторых условных органелл живой клетки – т.н. акторов, которые также представляют собой программных агентов с более примитивным внутренним устройством и более простыми целевыми функциями. К основным элементам тела агента-клетки относятся: распределенное устройство управления – децентрализованная мультиагентная нейрокогнитивная архитектура (включающая в себя сенсоры и эффекторы), полезные «агреганты» – имитационные модели макромолекулярных комплексов, представляющих на внутриклеточном уровне макроскопические параметры растений, характеризующие их хозяйственно-полезные признаки (хлорофилл, крахмал, клетчатка, вода и т.п.), а также геном агента-клетки.

Управляющая мультиагентная нейрокогнитивная архитектура синтезирует поведение агента-клетки на основе алгоритмов, описанных в [8]. Имитационная модель генома агента-клетки представляет собой структурированную мультиагентную систему, описанную в [3]. В общем случае каждый такой агент также является рациональным и имеет возможность взаимодействовать с другими агентами-клетками с помощью обмена сообщениями.

3. Мультиагентный алгоритм обучения нейрокогнитивных систем интеллектуального управления по филогенетическим данным

Связь генетической программы, заложенной в геноме клетки, и интерпретатора этой программы реализуется на основе алгоритмов машинного обучения по данным измерений наблюдаемых онтофилогенетических процессов.

Для идентификации этих процессов с целью извлечения и накопления данных для обучения интеллектуальной нейрокогнитивной архитектуры планируется использовать непрерывное цифровое фенотипирование и доступную генетическую информацию, в том числе результаты генетических анализов.

Кроме того, в перспективе планируется также применить для развития и обучения мультиагентных онтофилогенетических моделей методологию приобретения и интерпретации знаний, полученных интеллектуальным программным агентом, обеспечивающим управление имитационными экспериментами, с использованием системы понимания высказываний на естественном языке. Применение этого механизма позволит, в частности, организовать высокопроизводительный процесс накопления знаний, выраженных в абстрактной знаковой форме посредством таких мощных инструментальных средств, как диалоговые и читающие системы [10].

Цель обучения системы состоит в развитии мультиагентной базы знаний о поведении отдельных агентов-клеток в интересах достижения продуктивной полноты знаний, достаточной для того, чтобы выполнять имитационное моделирование процессов экспрессии генов с точностью, необходимой для применения селекционером в процессе разработки нового гибрида растения.

Интеллектуальная система будет строить мультиагентные модели роста и развития растений по данным геномов, аппроксимируя соответствующие функции на основе измерений. Для обучения управляющих мультиагентных нейрокогнитивных архитектур будет применяться обучающая выборка, состоящая из результатов цифрового фенотипирования и данных генетических анализов (в том числе ПЦР-анализа). Цикл обучения будет выполняться в непрерывном режиме. Укрупненная блок-схема алгоритма обучения приведена на рисунке 2.

Неотъемлемой частью алгоритма обучения является идентификация режимов развития растений с помощью роботизированной системы цифрового фенотипирования растений. Автономный мобильный робот проводит ежедневное сканирование посадок с помощью системы распознавания и идентификации изменений в фенотипе растений. Далее интеллектуальная экспертная система определяет изменения и их интенсивность. По команде от нее робот выполняет забор биологического материала в тех частях растений, которые продемонстрировали активный рост. Транспортный робот доставляет материалы в лабораторию.



Рис. 2. *Алгоритм непрерывного обучения имитационной мультиагентной нейрокогнитивной модели растения*

Fig. 2. *Algorithm for continuous training of simulation multi-agent neurocognitive plant model*

Далее выполняется генетический анализ с применением заданного набора праймеров – определяются локусы, сайты, аллели, ответственные за активизацию роста, проводится анализ белков и аминокислот. Интеллектуальная экспертная система идентифицирует процессы экспрессии генов по выявленным молекулярным маркерам.

Полученные данные о зафиксированных фенотипических изменениях и соответствующих процессах экспрессии генов добавляются в обучающую выборку – мультиагентные нейрокогнитивные системы управления агентов-клеток выполняют процедуру аппроксимации функций роста анализируемой части растений. На основе полученных функций строятся и уточняются имитационные модели экспрессии генов и генно-детерминированного роста заданной части растения. Выполняется идентификация полученной модели на доступных дополнительных экспериментальных данных и переобучение системы – модель достраивается по принципу открытой системы, непрерывно повышая свою прогностическую силу.

Интеллектуальные системы управления агентов-клеток стремятся достичь таких состояний системы «агент – среда», в которых наблюдается минимальное рассогласование между фактическими и ожидаемыми значениями комплекса целевых параметров, характеризующих на клеточном уровне макроскопические свойства, описывающие хозяйственно полезные признаки растения. Соответственно, значения их целевых функций увеличиваются при переходе такой системы в состояние, в котором это рассогласование минимально, и, наоборот, уменьшаются при переходе в состояние, в котором рассогласование увеличивается.

Множество действий, которые такие агенты-клетки могут выполнить для того, чтобы перейти в лучшие состояния, характеризующиеся меньшими значениями рассогласования и, соответственно, большими значениями вознаграждения, включает в себя инкремент и декремент значений соответствующих параметров и возможность варьирования шага таких изменений. Фактически такой агент будет решать многокритериальную оптимизационную задачу, направленную на минимизацию комплексной ошибки на основе аппроксимации функционала, состоящего из функций, описывающих изменение значений целевых параметров в зависимости от времени, с помощью обучения на наборах экспериментальных данных.

Так как процессы роста и развития растения хорошо наблюдаемы по достаточно широкому спектру параметров и масштабов (геномный, внутриклеточный, клеточный, макроскопический уровень), формирование обучающих выборок для решения задач такой аппроксимации представляется сложной технически, но принципиально понятной и реализуемой задачей. Для ее решения необходимо задействовать все доступные организационно-технические средства, включая визуальное наблюдение и измерение макропараметров, применение робототехнических комплексов цифрового фенотипирования [9], системы распознавания образов, интеллектуальные экспертные системы [3], лабораторные исследования внутриклеточного состава, ПЦР-анализ, полногеномное секвенирование и др.

Заключение

Разработана концепция создания имитационных моделей растений на основе мультиагентного моделирования на базе укрупненных условных агентов-клеток, синтез поведения которых выполняется управляющей нейрокогнитивной архитектурой.

Разработаны основные принципы создания системы автоматического сбора данных для эволюционного машинного обучения интеллектуальных экспертных систем селекции и семеноводства на основе роботизированного цифрового фенотипирования и генетических данных.

Разработан алгоритм обучения децентрализованной системы управления ростом и развитием имитационных моделей растений на основе идентификации феногенотипических характеристик процессов роста и развития, детерминированных экспрессией генов растения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анчёков М. И., Боготова З. И., Пшенокова И. А. и др.* Коллаборативная селекционная система на основе консорциума гетерогенных интеллектуальных агентов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5(109). С. 25–37. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-25-37.

2. *Анчёков М. И., Бжихатлов К. Ч., Нагоев З. В. и др.* Онтоэписоциофилогенетическое развитие систем общего искусственного интеллекта на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 61–75. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-61-75.

3. *Анчёков М. И., Апшев А. З., Бжихатлов К. Ч. и др.* Формальная модель генома агента общего искусственного интеллекта на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 5(115). С. 11–24.

4. *Doursat R.* Organically grown architectures: Creating decentralized, autonomous systems by embryomorphic engineering. Organic Computing. Ed. R.P. Würtz, Springer-Verlag. 2008. Pp. 167–200.

5. *Fedor A., Zachar I., Szilágyi A. et al.* Cognitive Architecture with Evolutionary Dynamics Solves Insight Problem // Front. Psychol. 2017. Vol. 8.

6. *Werfel J., Nagpal R.* Extended stigmergy in collective construction // IEEE Intelligent Systems. 2006. No. 21(2). Pp. 20–28.

7. *Jinek M., Chilynksi K., Fonfara I. et al.* A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity // Science. 2012. Vol. 337. No. 6069. Pp. 816–821. DOI: 10.1126/science.1225829.

8. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 232 с.

9. *Анчёков М.И., Бжихатлов К.Ч., Лешкенов А.М.* Высокопроизводительные системы фенотипирования сельскохозяйственных культур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5(109). С. 19–24.

10. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2022. 150 с.

REFERENCES

1. Anchekov M.I., Bogotova Z.I., Pshenokova I.A. et al. Collaborative breeding system based on a consortium of heterogeneous intelligent agents. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2022. No. 5(109). Pp. 25–37. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-25-37. (In Russian)

2. Anchekov M.I., Bzhikhatlov K.Ch., Nagoev Z.V. et al. 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. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-61-75. (In Russian)

3. Anchekov M.I., Apshev A.Z., Bzhikhatlov K.Ch. et al. Formal genome model of a general artificial intelligence agent based on multi-agent neurocognitive architectures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 5(115). Pp. 11–24. (In Russian)

4. Doursat R. Organically grown architectures: Creating decentralized, autonomous systems by embryomorphic engineering. *Organic Computing.* Ed. R.P. Würtz, Springer-Verlag. 2008. Pp. 167–200.

5. Fedor A., Zachar I., Szilágyi A. et al. Cognitive Architecture with Evolutionary Dynamics Solves Insight Problem. Front. Psychol. 2017. Vol. 8.

6. Werfel J., Nagpal R. Extended stigmergy in collective construction. IEEE Intelligent Systems. 2006. No. 21(2). Pp. 20–28.

7. Jinek M., Chilynksi K., Fonfara I. et al. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. Science. 2012. Vol. 337. No. 6069. Pp. 816–821. DOI: 10.1126/science.1225829.

8. Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p. (In Russian)

9. Anchekov M.I., Bzhikhatlov K.Ch., Leshkenov A.M. High-throughput crop phenotyping systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2022. No. 5(109). Pp. 19–24. (In Russian)

10. 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)

Информация об авторах

Нагоев Залимхан Вячеславович, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823

Анчёков Мурат Инусович, науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X

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

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

Nagoev Zalimkhan Vyacheslavovich, Candidate of Technical 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

Anchekov Murat Inusovich, Researcher of the Laboratory "Molecular Breeding and Biotechnology", Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X

Kurashev Zhiraslan Hautievich, Head of the Laboratory "Molecular Breeding and Biotechnology", Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 224 Kirova street;

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9442-6122

Khamov Anzor Azamatgerievich, Junior Researcher of the Laboratory "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

УДК 004.89 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-193-209
EDN: RXSQVI

Мультиагентный нейрокогнитивный алгоритм управления референцией речевых событий коммуникации агента общего искусственного интеллекта в ситуации синхронных множественных диалогов

З. В. Нагоев, О. В. Нагоева, Д. Г. Макоева, И. А. Гуртуева

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Разработаны основные принципы, модели и алгоритмы управления референцией речевых сообщений на основе создания двухконтурной модели мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры – суперинтеллектона, реализующего взаимодействие интеллектона подсознания и интеллектона сознания. Сформированы требования к онтологиям агента общего искусственного интеллекта, условия их формирования и обозначены функциональные узлы нейрокогнитивных архитектур, необходимые для их эффективного формирования в режиме обучения. Полученные результаты могут быть применены при создании систем распознавания и понимания речи, работоспособных при применении в зашумленных средах и ситуациях множественных синхронных диалогов для повышения качества распознавания с использованием понимания контекста ситуаций.

Ключевые слова: общий искусственный интеллект, мультиагентные системы, нейрокогнитивные архитектуры, распознавание речи, понимание речи

Поступила 02.12.2023, одобрена после рецензирования 07.12.2023, принята к публикации 09.12.2023

Для цитирования. Нагоев З. В., Нагоева О. В., Макоева Д. Г., Гуртуева И. А. Мультиагентный нейрокогнитивный алгоритм управления референцией речевых событий коммуникации агента общего искусственного интеллекта в ситуации синхронных множественных диалогов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 193–209. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-193-209

MSC: 68T42 Original article

Multi-agent neurocognitive algorithm for controlling the reference of speech events of communication of a general artificial intelligence agent in a situation of synchronous multiple dialogues

Z.V. Nagoev, O.V. Nagoeva, D.G. Makoeva, I.A. Gurtueva

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. Basic principles, models and algorithms for controlling the reference of speech messages have been developed based on the creation of a two-circuit model of multi-agent neurocognitive architecture – a superintellecton, which implements the interaction of the subconscious intellecton and the conscious intellecton. Requirements for ontologies of a general artificial intelligence agent, the conditions for their formation, and the functional units of neurocognitive architectures necessary for their effective formation in the training mode are outlined. The results obtained can be used to create speech recognition and understanding systems that are operational when used in noisy environments and

© Нагоев З. В., Нагоева О. В., Макоева Д. Г., Гуртуева И. А., 2023

situations of multiple synchronous dialogues to improve the quality of recognition using an understanding of the context of situations.

Keywords: artificial general intelligence, multi-agent systems, neurocognitive architectures, speech recognition, speech understanding

Submitted 02.12.2023, approved after reviewing 07.12.2023, accepted for publication 09.12.2023

For citation. Nagoev Z.V., Nagoeva O.V., Makoeva D.G., Gurtueva I.A. Multi-agent neurocognitive algorithm for controlling the reference of speech events of communication of a general artificial intelligence agent in a situation of synchronous multiple dialogues. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 193–209. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-193-209

Введение

Проблема управления референцией речевых событий, распознаваемых программным агентом общего искусственного интеллекта при коммуникативном взаимодействии в социальном окружении, возникает в связи с необходимостью решения задачи понимания высказываний, в форме которых разворачивается такое взаимодействие, в условиях множественных синхронных диалогов. Эта ситуация, когда множество собеседников одновременно коммуницируют друг с другом, настолько интересна, что даже получила в компьютерной лингвистике специальное название – «коктейльная вечеринка» (cocktail party). Если собеседники одновременно разговаривают в одной, достаточно небольшой комнате в полный голос, человек, находящийся в этой комнате, в норме справляется с тем, чтобы, прислушавшись к одному конкретному диалогу, распознать и понять все, что говорят собеседники. Для компьютерной же системы, несмотря на значительные успехи в распознавании речи, эта задача пока остается в общем случае неразрешимой.

Решая эту задачу, человек, помимо способности непосредственно распознавать речевые сообщения, представленные в материальной форме акустических волн, использует еще и способность понимать содержание высказываний, что позволяет ему активно управлять ольфакторным аппаратом для настройки на усиление частот, на которых участники интересующего его диалога генерируют свои высказывания, и в свою очередь подавлять частоты, на которых разворачивается коммуникация во всех других диалогах.

Основная рабочая гипотеза данного исследования состоит в том, что для достижения подобного эффекта необходимым условием является реализация системы распознавания на базе программного агента общего искусственного интеллекта. Это убеждение связано с тем, что понимание смысла произвольного диалога относится к неформальному классу т.н. AI-полных задач. Основные требования и подходы к созданию таких агентов изложены в [1–3]. Для реализации этой, в науке пока не решенной задачи, в частности, требуется, чтобы этот агент был способен к выполнению рациональных рассуждений и саморазвитию.

В частности, необходимо, чтобы такой агент имел возможность самостоятельно обучаться, онтологизируя свое пространство состояний (систему «агент – реальная среда») с помощью тех же способов, которые применяют естественные агенты общего искусственного интеллекта, – обучение на основе опыта (*экспериментальный* способ), обучение на основе размышлений (*аналитический* способ) и обучение на основе прямой или опосредованной коммуникации с другими интеллектуальными агентами (*коммуникативный* способ).

Способность самостоятельно развивать онтологическую базу и усиливать эффективность мыслительного аппарата (аппарата, обеспечивающего выполнение рассуждений) на основе приобретаемых знаний откроет программному агенту общего искусственного интеллекта возможности социализации в тех же эпистемологических контекстах, которые использует активно развивающийся растущий ребенок. Ключевым фактором перехода интеллекта искусственной системы в статус «общего», по нашему мнению, является способность

к саморазвитию на основе коммуникативного способа, при котором интеллектуальный агент приобретает знания «в чистом виде» от других интеллектуальных агентов, без необходимости самостоятельного исследования среды или интенсивного мыслительного моделирования. Источником такого обмена может быть как диалог с таким более опытным (знающим) интеллектуальным агентом, так и носители информации, в которые такими агентами эта информация была записана ранее (книги, видеофайлы, аудиозаписи и т.п.). В [4] даются подходы к решению многочисленных проблем, лежащих на пути создания подобных систем, а также раскрываются связанные с такой возможностью перспективы (создание рипортинговых, читающих и диалоговых систем).

В данной работе мы фокусируемся на разработке основных принципов создания системы управления программного агента общего искусственного интеллекта, позволяющей ему распознавать речевые сообщения в зашумленных средах (в том числе в условиях «коктейльной вечеринки»), используя механизм референции таких сообщений, основанный на алгоритмах машинного понимания высказываний. Под *референцией* речевых сообщений мы понимаем процесс распределения внутренних функциональных репрезентаций событий, описываемых этими речевыми сообщениями, выполненных управляющей мультиагентной нейрокогнитивной архитектурой интеллектуального агента, между так называемыми проблемными *ситуациями* – основными формами отражения контекстов системы «агент – среда», в которые вовлечен интеллектуальный агент, в такой когнитивной архитектуре.

Так как фокусировка внимания для настройки ольфакторного аппарата с целью фильтрации и достройки содержания выказывания по фрагментарному или зашумленному звуковому сигналу требует реализации интеллектуального управления, основанного на многочисленных смысловых обратных связях, разработка основных принципов и алгоритмов референции речевых сообщений в процессе множественной устной диалоговой коммуникации является ***актуальной*** научной проблемой.

Целью *настоящей работы является создание системы распознавания и синтеза речи на основе имитационного моделирования процессов понимания высказываний агентом общего искусственного интеллекта.*

Объект *исследования – процессы референции речевых событий в управляющей когнитивной архитектуре интеллектуального агента.*

Предмет *исследования – основные принципы и алгоритмы управления референцией речевых событий в ситуации множественного синхронного диалога.*

Задача *исследования – разработка мультиагентного алгоритма управления референцией речевых событий в управляющей мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре агента общего искусственного интеллекта.*

1. Концептуальная модель сознания агента общего искусственного интеллекта

В работах [1, 4–8] предложена и разработана концепция агента общего искусственного интеллекта под управлением т.н. *мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры*. Такой агент в общем случае представляет собой имитационную модель системы искусственной жизни (Artificial Life System), реализующую синтез мета-алгоритмов построения специализированных алгоритмов идентификации и решения проблем универсального спектра на основе перемещения в пространстве состояний «агент – реальная среда» с целью максимизации целевой функции энергии на основе проактивного рационального выбора с использованием абстрактных знаковых систем. Под *проблемой* в данном случае понимается состояние интеллектуального устройства управления агентом, предписывающее этому агенту изменить настоящее или будущее состояние в системе «агент – среда».

Такой агент может быть реализован в формате как виртуального (полностью программного) агента, так и в формате программного агента, управляющего поведением робота (интеллектуального робота), погруженного в реальную среду. Как программный интеллектуальный агент, так и робот взаимодействуют со средой с помощью сенсоров и эффекторов. Некоторые из этих сенсоров (сенсор клавиатуры, аудиосенсор, видеокамеры, тактильные сенсоры) могут быть использованы интеллектуальным роботом для приема сообщений (соответственно символьных, аудио-, видео-, тактильных) от людей, которые окружают роботов в среде. Аналогично некоторые из его эффекторов (дисплей, аудиосинтезатор, манипуляторы и др.) могут использоваться для передачи сообщений этим людям.

В [1] для описания интеллектуальной системы управления агента общего искусственного интеллекта вводится понятие и дается формальное описание т.н. «*интеллектона*», представляющего собой самоорганизующуюся *мультиагентную рекурсивную нейрокогнитивную архитектуру*. В частности, показано, что интеллектон, организованный в последовательность функциональных узлов, каждый из которых содержит программных агентов-нейронов (агнейронов), в составе т.н. инварианта мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры управляет синтезом имитационных моделей динамических функциональных систем (по Анохину), ситуативно детерминированным соотношением параметров системы «агент – среда» [9]. Он, в частности, обеспечивает условия для того, чтобы функциональные узлы инварианта нейрокогнитивной архитектуры (нейрокогнитоны) различной специализации – распознавания, оценки, целеполагания, синтеза действий, моделирования – росли и развивались «по требованию» путем добавления новых агнейронов, формирования и деградации связей между ними на основе т.н. алгоритма *онтонейроморфогенеза* [10], гипотетически задающего вычислительную абстракцию процессов ситуативно детерминированного роста и деградации аксо-дендрональных связей между нейронами головного мозга (рис. 1).

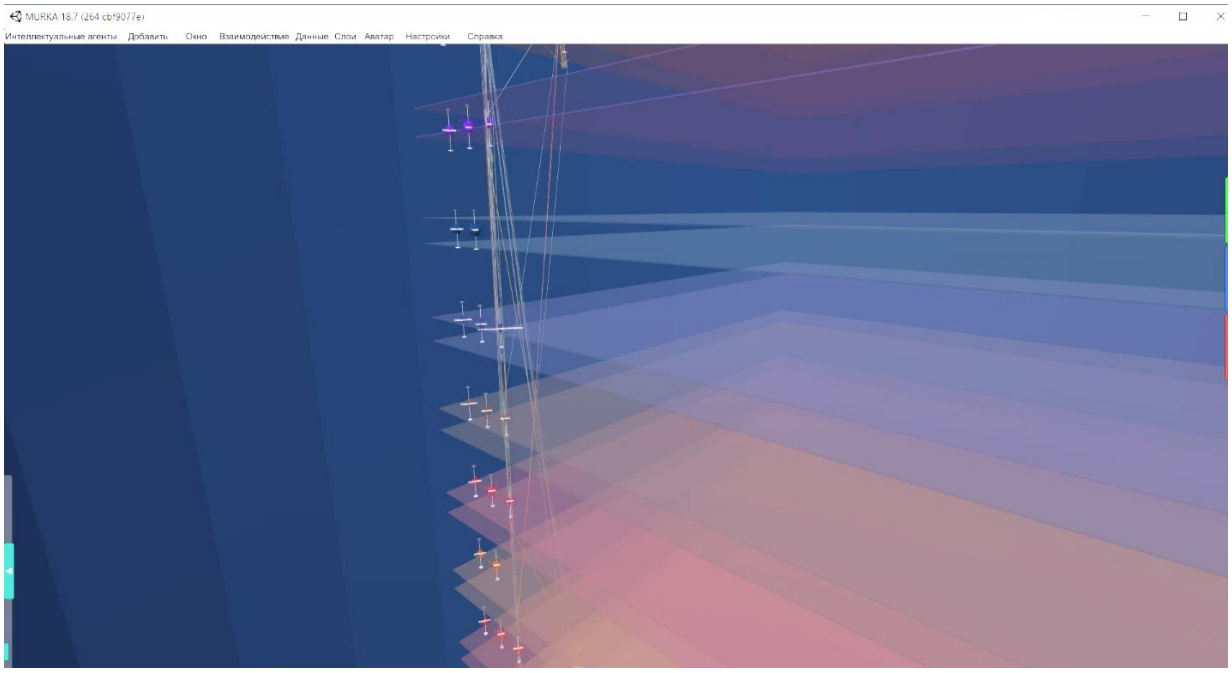


Рис. 1. *Трехмерная визуализация интеллектона в программе имитационного моделирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур*

Fig. 1. *Three-dimensional visualization of the intellect in a simulation program of multi-agent neurocognitive architectures*

Система управления самих агнейронов, которые также являются рациональными агентами нижнего по отношению к интеллектону ранга, в свою очередь сама представляет собой мультиагентную когнитивную архитектуру, организованную в составе такого же инварианта, в функциональных узлах которого, однако, представлены уже более простые рациональные агенты – акторы.

Акторы представляют собой логическое машины, основанные на продукционных правилах, содержащихся в их базах знаний. Принципиальное значение имеет то, что состав и структура продукционных правил, выражающих эти знания, могут меняться в соответствии с процедурой работы алгоритма онтонейроморфогенеза (рис. 2).

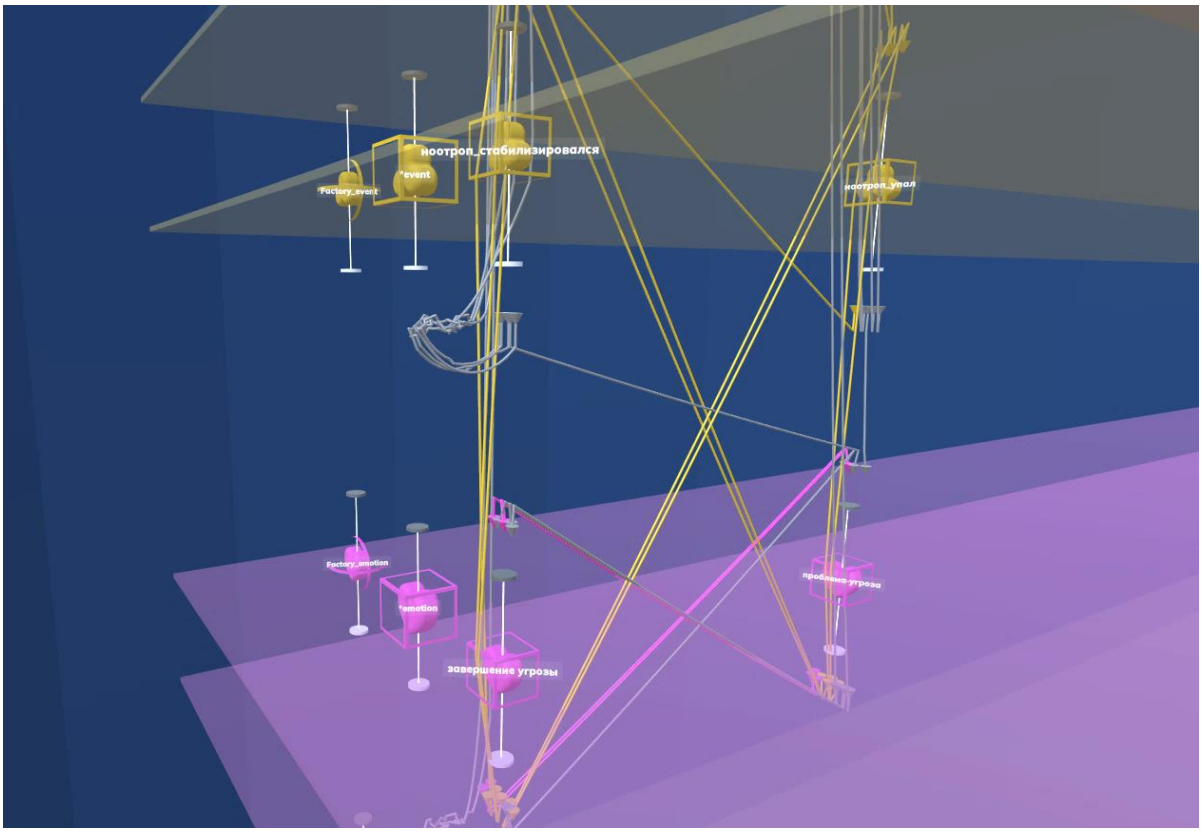


Рис. 2. *Мультиакторная архитектура агнейрона в программе имитационного моделирования интеллектонов*

Fig. 2. *Multiactor architecture of agneuron in the simulation program of intellecton*

Динамически сформированные функциональные системы, состоящие из специализированных агнейронов различных нейрокогнитонов, в свою очередь на основе самоорганизации, мотивированной необходимостью обмена информации на энергию, синтезируют специализированные алгоритмы построения путей между стартовыми и конечными состояниями проблемных ситуаций в системе «агент – среда».

Графически процесс синтеза такого пути можно представить динамическим графом решений проблемной ситуации (рис. 3), в узлах которого (круги на рисунке) находятся состояния системы «агент – среда», треугольниками на дугах обозначаются действия, совершаемые самим интеллектуальным агентом, а квадратами – действия, выполняемые средой (другими агентами в ее составе).

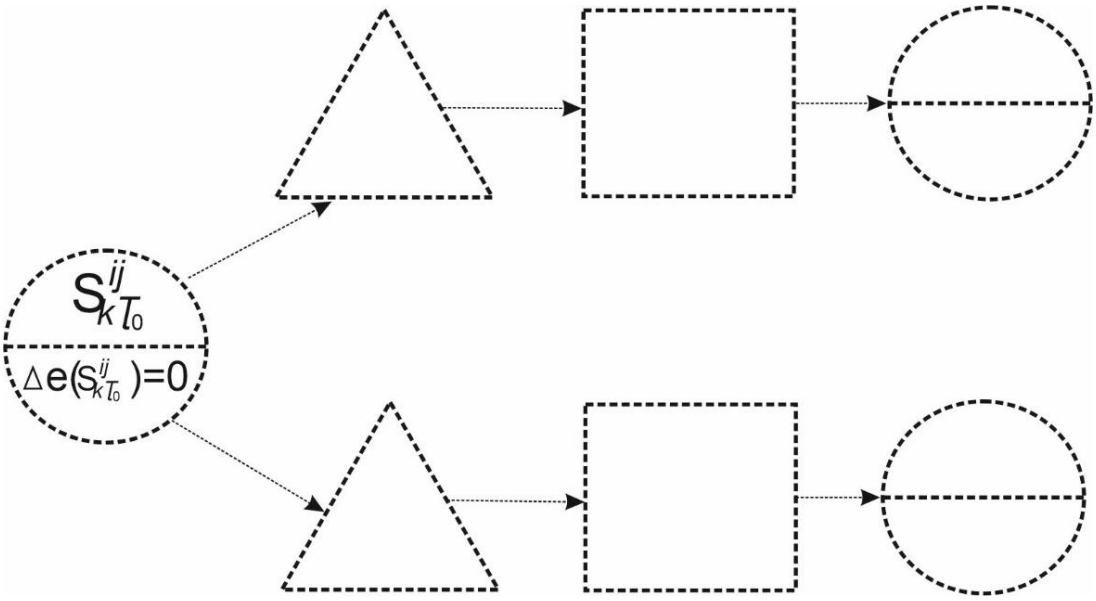


Рис. 3. *Динамический граф решений проблемной ситуации*

Fig. 3. *Dynamic graph of solutions to a problem situation*

В вышеприведенном определении агента общего искусственного интеллекта требование использования абстрактного языка для синтеза графа принятия решений в контексте темы настоящего исследования заслуживает отдельного рассмотрения. Прежде чем перейти к решению поставленной в данной работе проблемы, основанному на свойствах системы управления агентов общего искусственного интеллекта, обеспечивающих конструктивные манипуляции абстрактными символами в процессе коммуникации, рассмотрим аспект, в котором интеллектоны наиболее эффективно используют коммуникацию вообще и речевую коммуникацию в частности, – интеллектуальный синтез поведения, направленного на онтологизацию системы «агент – среда».

2. Основные требования к онтологиям в системе «агент общего искусственного интеллекта – реальная среда»

Одним из ключевых свойств системы «интеллектуальный агент – среда» является *частичная наблюдаемость*, в силу которой интеллектуальный агент, воспринимающий среду с помощью сенсоров, не способен одновременно регистрировать все значения всех параметров среды, которые могут быть измерены этими сенсорами. Агенту в каждый момент времени доступен для наблюдения на основе синтеза информации в сенсорной системе только некоторый фрагмент среды. Поэтому для принятия решений, учитывающих влияние всех частей среды, значимых для решения данной задачи, интеллектуальный агент должен иметь в некотором внутреннем представлении не только текущий наблюдаемый фрагмент среды, но и все такие части. Этого можно добиться только с помощью *внутренней модели среды*, отражающей существенные свойства этих ее частей. Для этого в нейрокогнитивной архитектуре предусматривается нейрокогнитон моделирующих агнейронов (изображены на рис. 4 пиктограммами в форме округлой буквы «М»).

Онтология должна поддерживать представление о том, что объекты существуют в среде вне зависимости от того, наблюдает их агент или нет. Иными словами, онтология как система закономерностей, описывающих реальную среду, должна *обеспечивать присутствие информации о ненаблюдаемых частях среды* в процессе принятия решений. С этой целью в

нейрокогнитивной архитектуре создаются нейрокогнитоны, содержащие агнейроны, обеспечивающие функциональную репрезентацию объектов (изображены на рис. 4 пиктограммами в форме круга), явлений (пиктограммы в форме шестиугольника), их свойств и отношений (МА-фактов – пиктограммы в форме округлого трилистника).

Другое свойство системы «интеллектуальный агент – среда», требующее наличия у агента модели среды, – *эпизодичность* наблюдения даже тех небольших фрагментов среды, которые доступны агенту в силу частичной наблюдаемости. Онтология, направленная на парирование этой трудности, проявляющейся при принятии решений интеллектуальным агентом в реальной среде, должна обеспечивать представление о том, что в периоды между наблюдениями фрагментов среды (объектов), которые агент выполняет с помощью сенсорной системы, эти объекты не только существуют, но и изменяются.

Принципиальную сложность для принятия решений создает такое свойство реальной среды, как априорная *неструктурированность* потоков данных, генерируемых сенсорами погруженного в эту среду агента. Это свойство определяет, в частности, необходимость *динамического формирования онтологий*, так как изначально процессы, протекающие в среде, не концептуализированы. На рисунке 4 сенсоры, генерирующие потоки входных данных интеллектуального агента, изображены треугольниками, острый угол которых ориентирован по направлению к мультиагентной когнитивной архитектуре, а эффекторы – треугольниками, ориентированными в противоположном направлении.

Следовательно, неструктурированность среды требует выбора некоторого семантического базиса концептуализации, который может быть использован интеллектуальным агентом в качестве множества внутренних параметров, на которое отображаются генерируемые сенсорной системой значения измерений параметров внешней среды. Это ставит вопрос о *необходимости наличия у онтологии семантических свойств*, определяющих связь наблюдаемой динамики реальной среды с изменениями значений целевой функции интеллектуального агента. С этой целью в интеллектон введен когнитон оценки, агнейроны которого (агнейроны оценки) выполняют функцию разбиения входных потоков данных на задачи и разметки состояний системы «агент – среда» значениями целевой функции.

Отсутствие у интеллектуального агента априорного представления о своей собственной структуре и структуре реальной среды вкупе с такими ее свойствами, как *динамичность* и *стохастичность,* определяют *эмпирический характер процесса динамического формирования онтологий*. В ходе этого процесса интеллектуальный агент, взаимодействуя со случайными фрагментами среды, в своем внутреннем представлении переводит систему «агент – среда» в состояния, характеризующиеся различными значениями целевой функции, что и позволяет ему формировать «семантически нагруженные» онтологии.

Так как задача синтеза программного агента, как правило, реализуется человеком с целью последующего решения этим агентом некоторых проблем интеллектуальной обработки информации в условиях реальной среды, семантические основания, на которых построены онтологии такого интеллектуального агента, должны быть сходны (совместимы) с семантикой мышления человека. Это свойство (*семантическая совместимость*) онтологий интеллектуального агента, как минимум, задает требование сходства целевых функций и способов структуризации потоков данных, описывающих систему «агент – среда».

Принципиальный характер для построения подобных онтологий имеет возможность их формирования в социальном контексте, связанная с восприятием интеллектуального агента в качестве члена некоторого гетерогенного (люди, программные агенты, автономные роботы)

сообщества интеллектуальных агентов, в котором открывается возможность использования каналов передачи информации от этого сообщества с помощью естественного языка.

Социализация на основе интерактивного взаимодействия с помощью языка существенным образом форсирует формирование онтологий, так как в коммуникативной ситуации одни и те же фрагменты реальности, синхронно наблюдаемые интеллектуальными агентами-коммуникантами, могут быть структурированы менее опытным агентом на основе информации, полученной от более опытного из агентов. С целью функциональной репрезентации абстрактных символьных единиц – элементов языка, на котором выполняется социализация, – в интеллектон введены агнейроны-существительные (изображены на рисунке 4 пиктограммами в форме окружностей, по контуру которых нанесены штрихи, направленные к центру), агнейроны-глаголы (шестиугольники со штрихами по контуру).

Ясно, что если все эти требования предъявляются к одной онтологической единице – структурно-функциональной единице, из которых состоит полная онтология, то формат этой единицы должен допускать логическое объединение некоторой суммы предикатов (фактов), каждый из которых описывает отношение этой онтологической единицы к феноменологии одной из предметных областей, в которых значимы вышеперечисленные свойства. Это требование определяет *синкретический характер онтологической единицы*, ее свойство моделировать и связывать друг с другом факты и причинно-следственные зависимости из этих феноменологических областей.

Причинно-следственная природа воспринимаемой реальности в условиях наличия в ней агентов, выполняющих действия, и объектов, пассивных по отношению к действиям, накладывает на онтологии требование отражения субъект-объектной картины мира, например, возможность моделирования *агенса и пациенса*, *каузативных отношений*. Моделирование субъекта требует интеграции процессов отражения, выполняемых различными нейронными группами, управления разделением времени и доступом к монопольным ресурсам интеллектуального агента (тело, эффекторы, функциональные подсистемы). Поэтому в данной работе мы рассматриваем третий уровень рекурсии, который условно называем уровень *сознания* агента общего искусственного интеллекта (инвариант когнитивной архитектуры, изображенный на рисунке 4 в горизонтально направлении).

Возвращаясь к проблеме функциональной целостности онтологий, необходимо вспомнить о том, что онтологии сами по себе не решают задачи моделирования интеллектуальных рассуждений. Они лишь обеспечивают некоторую *машину принятия решений* необходимыми данными. Эта «машина» в общем случае аппроксимирует некоторую идеальную функцию принятия решений, которая обеспечивает поиск в пространстве альтернатив и выбор тех состояний, которые доставляют максимум некоторой целевой функции. Вся совокупность вышеперечисленных факторов, затрудняющих такой поиск и выбор в условиях реальной среды, приводит к тому, что процесс принятия решений характеризуется *неопределенностью* на всех своих этапах. Эффективные онтологии как раз и предназначены для того, чтобы за счет построения модели системы «интеллектуальные агент – среда» и использования этой модели машиной принятия решений *снижать такую неопределенность*.

Эта простая по смыслу задача на практике сталкивается со значительными трудностями, главная из которых – *проблема сложности реальной среды*. Для того чтобы внутренняя онтологическая модель была точна настолько, чтобы существенным образом снизить неопределенность принятия решений, необходим значительный охват феноменологических

комплексов, наблюдаемых интеллектуальным агентом в этой среде. Минимальным необходимым требованием для построения такой онтологии является наличие у интеллектуального агента *многомодальной подсистемы восприятия*, работающей в *режиме реального времени*. При этом часть таких данных, описывающих процессы, протекающие в «теле» самого агента, генерируется интероцепторами (изображены на рисунке 4 берущими свое начало от графического представления этого «тела» – окружности с номером агента), вторая часть – интероцепторами, описывающими процессы, протекающие в нейрокогнитивной архитектуре нижнего ранга (изображены на рисунке 4 в составе нейрокогнитивной архитектуры верхнего ранга (сознание), и третья часть – экстероцепторами, описывающими процессы во внешней по отношению к агенту среде (все другие рецепторы на рисунке 4).

Как правило, потоки неструктурированных данных, генерируемые такой подсистемой, настолько интенсивны, что производительности современных систем интеллектуального принятия решений недостаточно для онтологизации всех объектов, событий и ситуаций, информацию о которых несут эти потоки, в режиме реального времени [11, 12].

Вторая, не менее важная проблема, связанная с дефицитом ресурсов, состоит в том, что онтологии, обеспечивающие высокий уровень эффективности снижения неопределенности даже для одной предметной области (домена), должны охватывать огромное количество феноменов, которые могут иметь как непосредственное, так и весьма отдаленное отношение к этому домену. Хорошая онтология должна «покрывать» значительное количество ситуаций, существенных для учета при принятии решений в данной предметной области.

Однако даже в случае, когда в вычислительных ресурсах нет ограничений и времени для построения онтологий достаточно, свойство стохастичности реальной среды может свести на нет ценность построенной онтологии, так как в ситуативном контексте, в котором интеллектуальный агент принимает решение, всегда может появиться новый фактор, не предусмотренный построенной онтологией. Если система принятия решений не снабжена алгоритмами, обеспечивающими толерантность к подобным ситуациям, такими, например, как *метаонтологии*, позволяющими адаптировать существующие онтологии к подобным ситуациям *на основе обучения*, то она в этом случае может оказаться *неустойчивой*, что приведет к резкому снижению эффективности.

Применение *перманентного обучения* для динамического пополнения онтологий с целью обеспечения устойчивости базы знаний должно быть нацелено на онтологизацию конкретного домена путем использования метаонтологий, позволяющих интеллектуальному агенту использовать для этого универсальные алгоритмы, не зависящие от конкретной предметной области.

Такой процесс также отягчен несколькими ключевыми проблемами. Во-первых, при перманентном обучении необходимо решить вопрос *избирательности прецедентов*, которые попадают в онтологию. Если этого не сделать, то быстро исчерпывается ресурс памяти системы.

Во-вторых, онтология должна сохранить *операционную применимость* даже при достижении значительного размера. Сложность поиска в базе знаний элементов онтологии, необходимых для применения в процессе рассуждения, должна быть такой, чтобы обеспечить принятие решений в условиях реального времени.

В-третьих, при значительном увеличении размера онтологии на основе перманентного обучения с помощью обработки случайных прецедентов в онтологии начинают появляться и накапливаться противоречивые знания. Для преодоления этой проблемы подсистема синтеза онтологий должна располагать *механизмом разрешения противоречий*.

Основой для реализации такого механизма должна быть некоторая процедура *внутреннего арбитража*, в соответствии с которой интеллектуальный агент сам должен принимать решение о внесении необходимых изменений в элементы онтологии, противоречащие друг другу. Такая процедура должна быть основана на алгоритме выбора, связанном с *функцией разметки состояний* системы «интеллектуальный агент – среда» значениями, учитываемыми целевой функцией агента.

Все вышеприведенные соображения фактически исключают возможность создания онтологий интеллектуального робота, действующего в условиях реальной среды, в ручном режиме. Как показывает практика, создание применимых онтологий вручную может быть эффективным только для крохотных доменов в узком диапазоне условий применения, который, по большому счету, нельзя отнести к условиям реальной среды.

Кроме того, принципиальное значение имеет множественность процессов, которые протекают в самом интеллектуальном агенте (его «теле») и в окружающей агента реальной среде. Вкупе с частичной наблюдаемостью и эпизодичностью это свойство среды предполагает, что онтологическая модель любого процесса должна быть доступна машине рассуждений интеллектуального агента в режиме псевдореального времени, быть открытой для пополнения, разделять ресурсы с онтологическими моделями других процессов.

Все эти качества достижимы на основе введенного выше понятия проблемной ситуации, состоящей из *событий* и *действий*. События есть мультиагентные факты, описывающие фрагменты системы «агент – среда» в формате предикативных конструкций. Объединения событий описывают состояния этой системы, которые и представляются вершинами графа решений проблемной ситуации. Действия в свою очередь также представляются мультиагентными фактами, с той лишь разницей, что в качестве субъекта действия выступает либо сам данный интеллектуальный агент, либо другие интеллектуальные агенты.

Под *речевым событием* будем понимать такое событие в системе «агент – среда», описание которого, сформулированное на некотором языке, содержится в речевом сообщении.

Исходя из вышеизложенного сделан вывод, что онтологии агента общего искусственного интеллекта в условиях реальной среды должны формироваться автоматически и быть функционально целостными, операционно применимыми, концептуально обоснованными, пригодными для построения моделей системы «агент – среда» и для парирования сложностей принятия решений в условиях реальной среды (неструктурированность, неопределенность, частичная наблюдаемость, эпизодичность, динамичность, стохастичность, активность), динамически формируемыми на основе эмпирического базиса избирательных прецедентов, ситуативно детерминированными, контекстно обусловленными, семантически и социально значимыми и совместимыми, синкретическими и многомодальными, коррелирующими с естественным языком, отражающими субъект-объектную картину мира, устойчивыми к стохастичности среды, пополняемыми в процессе перманентного обучения на основе метаонтологий, основанными на механизме разрешения противоречий в базе знаний.

Построить онтологии, обладающие вышеперечисленными свойствами, интеллектуальный агент может только с привлечением некоторого языка – абстрактной знаковой системы, применяющейся для обмена знаниями при коммуникации в процессе социализации.

Какой же должна быть организация интеллектона и какие алгоритмические модели должны быть заложены в его работу, чтобы обеспечить агенту общего искусственного интеллекта возможности построения онтологий, обладающих всеми вышеперечисленными свойствами, с применением речевых сообщений, содержащих абстрактные знаковые описания событий системы «агент – среда».

3. Мультиагентный алгоритм управления референцией речевых событий в двухуровневой схеме организации нейрокогнитивной архитектуры

С целью исследования способа онтологизации системы «агент – среда» с помощью абстрактной знаковой системы рассмотрим третий рекурсивный уровень управления – сознание программного агента, – являющийся, с нашей точки зрения, неотъемлемым компонентом общего искусственного интеллекта.

На рисунке 4 приведена совмещенная нейрокогнитивная архитектура агента общего искусственного интеллекта, состоящая из нейрокогнитивной архитектуры (интеллектона), выполняющей первичный анализ входных потоков данных, идентификацию проблемных ситуаций и синтез деревьев решения, которую мы условно будем называть *подсознанием*, и, соответственно, из интеллектона сознания, также представляющего собой инвариант нейрокогнитивной архитектуры. На рисунке интеллектон подсознания изображен в левой части и ориентирован сверху вниз, а интеллектон сознания – соответственно в правой части и ориентирован слева направо.

В [1] для обозначения такой когнитивной архитектуры, состоящей из двух и более интеллектонов, введено понятие *суперинтеллектона*. Принципиальное различие между интеллектоном подсознания и интеллектоном сознания в составе суперинтеллектона, изображенного на рисунке 4, состоит в том, что первый погружен с помощью своих сенсоров и эффекторов в окружающую интеллектуального агента реальную среду, а сенсоры и эффекторы второго взаимодействуют непосредственно с интеллектоном подсознания.

Таким образом, интеллектон подсознания идентифицирует и решает проблемы в системе «интеллектуальный агент – среда», а интеллектон сознания – в системе «интеллектон сознания – интеллектон подсознания». Все процессы, в которые вовлечен интеллектуальный агент, находят отражение сразу в обоих интеллектонах, которые строят сразу два графа решений. Назовем их соответственно *граф решений проблемной ситуации* (для интеллектона подсознания) и *граф решений контекста проблемной ситуации* (для интеллектона сознания).

В ситуации онтологизации некоторого фрагмента системы «интеллектуальный агент – среда» в соответствии с некоторым алгоритмом (экспериментальным, аналитическим, коммуникативным) интеллектон подсознания обеспечивает идентификацию и обработку событий в этой системе, а интеллектон сознания соответственно синхронно онтологизирует фрагмент системы «интеллектон подсознания – интеллектон сознания», за которым ведет непосредственное наблюдение с помощью сенсоров и на который воздействует с помощью эффекторов.

Проблемы, на разрешение которых направлена работа интеллектона сознания, связаны прежде всего с необходимостью управления распределением монопольных ресурсов организма («тела») интеллектуального агента при синхронном решении множества задач. Действительно, как правило, естественные системы общего искусственного интеллекта практически никогда не могут себе позволить синхронно идентифицировать и решать только одну-единственную проблему. Таких проблем, как правило, несколько. Каждая из них на уровне интеллектона подсознания обрабатывается агнейронами из различных нейрокогнитонов, образующими динамическую функциональную систему (ДФС). Причем один и тот же агнейрон может входить в различные синхронно активные ДФС. На рисунке 4 в интеллектоне подсознания показаны четыре одновременно активные ДФС, две из которых (выделены более темным тоном) выполняют идентификацию и решение проблем, связанных с процессами, протекающими во внешней по отношению к данному интеллектуальному

агенту среде, а две другие (более светлые на рисунке) – с процессами, имеющими место в «теле» самого интеллектуального агента.

Так как решением каждой из этих проблем является некоторый план действий, а действия, как правило, выполняются такими «монопольными» частями организма («тела»), как эффекторы (у человека, например, это руки, ноги и т.п. части тела), то в случае, если каждая из ДФС попытается перехватить управление такими эффекторами, наступит коллапс, для биологических организмов чреватый частичным разрушением или гибелью.

Помимо «физических» эффекторов монопольного доступа могут потребоваться также и «ментальные» комплексы – например, части интеллектонов, выполняющие моделирование в процессе рассуждений. Интроспективный анализ нашей способности к таким рассуждениям наглядно демонстрирует, что синхронное применение такой «машины моделирования» для различных ситуаций крайне затруднено.

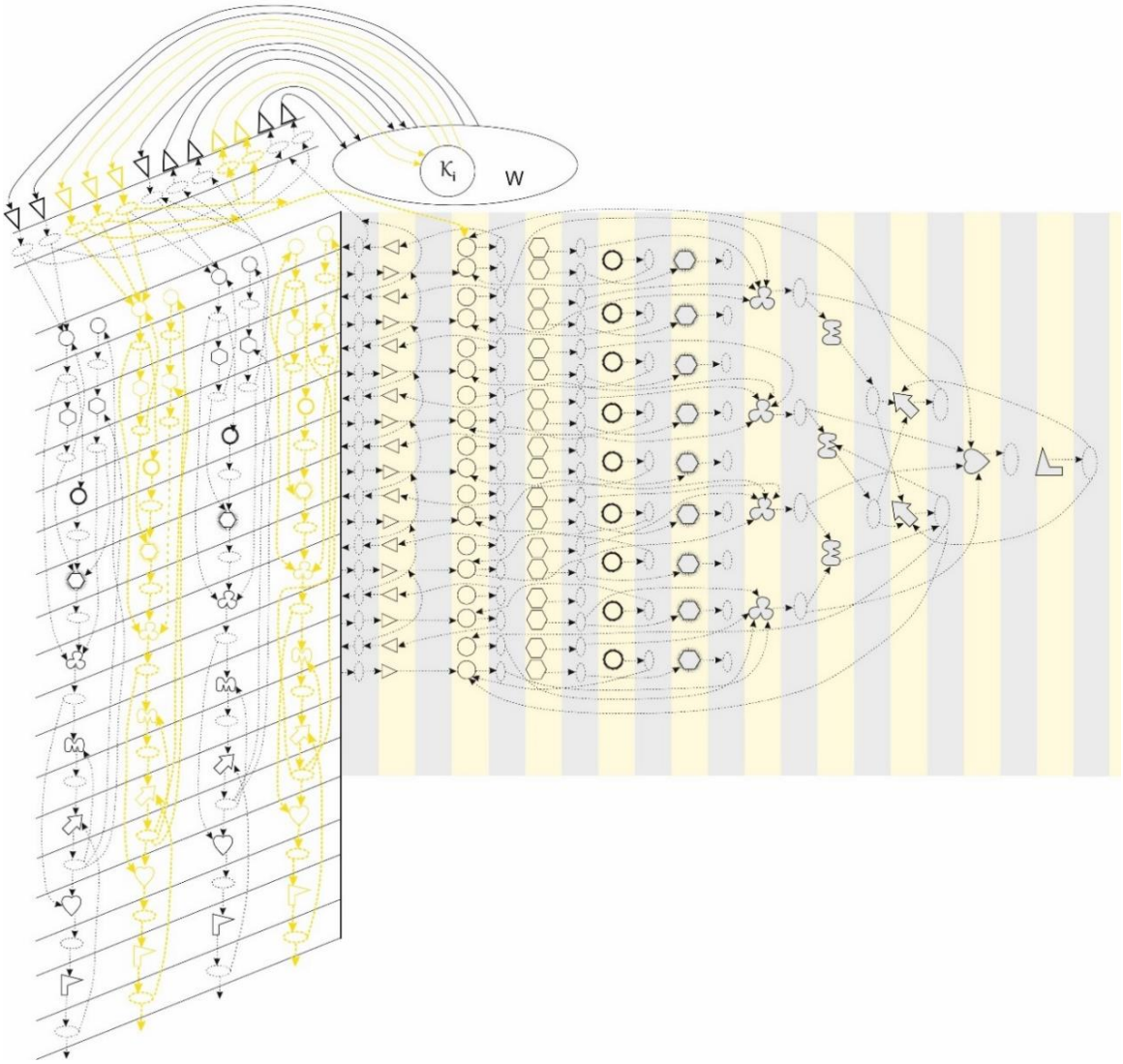


Рис. 4. *Схема строения двухуровневого суперинтеллектона*

Fig. 4. *Scheme of the structure of a two-level superintelligence*

Таким образом, в соответствии с нашей гипотезой двухуровневая структура суперинтеллектона эволюционно детерминирована, безусловно, необходимостью управления распределением ресурсов между задачами.

Однако, вероятнее всего, наиболее существенное системное значение этого эволюционного приобретения заключается в возможности реферировать части и элементы графов деревьев решений проблемных ситуаций между собой.

Вполне можно представить себе децентрализованные одноранговые алгоритмы управления распределением монопольных ресурсов, как и возможности моделирования воображаемого прошлого и будущего в противовес (или в дополнение) к реальному настоящему, реализуемые интеллектоном подсознания с помощью моделирующих агнейронов.

Можно даже предположить, что одноранговая система управления способна моделировать субъективно-объективную оппозицию, в том случае, если ДФС в составе интеллектона подсознания, обрабатывающие сигналы от интероцепторов, в этом смысле функционально отделены от ДФС этого же интеллектона, принимающих сигналы от внешней среды.

Однако организация процессов управления произвольным переносом частей одних функциональных систем для временного (тестового) или постоянного последующего функционирования в них с помощью децентрализованных алгоритмов в одноранговой системе априори представляется малоэффективной.

Для того чтобы управлять произвольной активностью различных агнейронов в составе ДФС, с целью встраивания ее результатов в работу другой ДФС, необходимо «удерживать» контекст работы обеих этих ДФС. Для этого необходимо иметь возможность наблюдать за работой всех частей интеллектона подсознания и оказывать управляющие воздействия на них. Поэтому на рисунке 4 показано, что сенсоры интеллектона сознания регистрируют выходные сообщения (изображены пустыми овалами, оконтуренными пунктирной линией) агнейронов, а его эффекторы оказывают влияние на сами эти агнейроны.

Способ, с помощью которого производится такой анализ и генерируются управляющие воздействия, аналогичен тому, который используется в самом инварианте когнитивной архитектуры подсознания: как мы уже указывали выше и как следует из рисунка 4, интеллектон сознания представляет собой точно такую же нейрокогнитивную архитектуру, в которой на основе тех же самых принципов формируются соответствующие динамические функциональные системы управления поведением интеллектона подсознания.

Интеллектон сознания, таким образом, имеет возможность не только управлять переключением фокуса внимания между активными ДФС интеллектона подсознания, но и переносить части графов решений проблемных ситуаций, моделируемых этими ДФС, друг в друга, объединять их между собой, создавая тем самым предпосылки для решения многокритериальных задач.

Подобные возможности, собственно, и обеспечивают взрывной рост эффективности процесса идентификации проблем и синтеза их решений. В основе ускорения здесь лежит качественное изменение, проявляющееся с добавлением в управляющую нейрокогнитивную архитектуру интеллектона сознания, обеспечивающего способность интеллектуального агента проецировать элементы одних проблемных ситуаций (события, оценки, действия) на другие.

Гипотетический механизм такого управления, по нашему мнению, состоит в том, что интеллектон сознания произвольно стимулирует отправку сообщений теми или иными агнейронами в составе некоторых ДФС интеллектона подсознания некоторым агнейронам других ДФС того же интеллектона. Эти сообщения могут быть поощряющими или запретительными: например, предписания на получение или лишение вознаграждения в виде порций энергии. Отправка такого сообщения вызывает запуск работы последующих и некоторых предыдущих агнейронов в составе определенных ДФС, имитируя их работу в «режиме воображения», когда в когнитивной архитектуре имитируется «искусственно

вызванная» мыслительная деятельность, в отличие от «реального режима», в котором такая же мыслительная деятельность (те же мысли) может быть вызвана только в результате отражения событий, реально происходящих в системе «агент – среда».

Этот механизм позволяет комбинировать между собой в воображении интеллектуального агента самые различные ситуации и, соответственно, моделировать результаты их объединения, что, вероятно, является видовым эволюционным преимуществом человека.

Если возможность синтеза произвольных ДФС на основе комбинации и объединения уже существующих ДФС позволяет строить в воображении произвольные графы решений проблемных ситуаций и у интеллектуального агента имеется коммуникационный канал к социальному окружению, основанный на возможности интерпретации знаков в смыслы, выраженные в терминах сообщений агнейронов в составе тех или иных ДФС, то это означает, что с использованием данных механизмов интеллектон сознания может обеспечить создание произвольной ДФС, состоящей частично из существующих ДФС, частично из ДФС, ранее произвольно синтезированной им в воображении, и частично – из ДФС, активность которых индуцирована в результате интерпретации знаковых сообщений.

Фактически двойной контур управления суперинтеллектона таким образом обеспечивает интеллектуальному агенту возможность использования абстрактных символьных систем для организации «размышлений по аналогии» с теми, которые были выполнены ранее другими интеллектуальными агентами, т.е. создает инфраструктурную основу обучения и обмена знаниями с использованием речевых и текстовых сообщений на естественном языке.

В сообществе исследователей систем общего искусственного интеллекта достаточно широко представлено мнение, что именно способность к автономному целенаправленному использованию рассуждений на основе абстрактных знаковых систем и является ключевым классифицирующим признаком таких систем [2].

В [1, 10] показано, что интеллектон подсознания способен структурировать входной поток данных путем использования предустановленных паттернов распознавания для идентификации событий в системе «агент – среда», их представления в нейрокогнитивной архитектуре в виде мультиагентных фактов и связи таких фактов между собой в формате причинно-следственных зависимостей.

Однако в речевых сообщениях описываются события, которые непосредственно не представлены в афферентном потоке интеллектуального агента, поэтому их интерпретация, выполняемая с помощью все того же интеллектона подсознания, с необходимостью порождает ситуацию, когда в условном «мыслительном рабочем пространстве» интеллектуального агента становятся активными сразу несколько ДФС.

Ситуация «коктейльной вечеринки» осложняется тем, что таких ДФС в этом рабочем пространстве одновременно возникает достаточно много, и, кроме того, распознаваемые речевые события относятся к различным из этих ДФС, причем большая часть последних в качестве своей основной темы имеют события, не связанные напрямую с данным интеллектуальным агентом (как субъектом восприятия).

В такой ситуации одноранговая система, такая как интеллектон подсознания, не способна справиться с обработкой потоков данных, так как ни у одной из ДФС нет приоритета перед другими для того, чтобы перехватить управление монопольными ресурсами ольфакторного аппарата.

Соответственно, мы можем предположить, что, напротив, интеллектон сознания как раз имеет такую возможность, так как для него реализация референции событий между графами проблемных ситуаций является одной из основных функциональных задач. В

частности, как указывалось выше, он имеет возможность стимулировать ту ДФС, которая реализует проблемную ситуацию, представляющую интерес для интеллектуального агента в контексте одного из множества диалогов на «коктейльной вечеринке», и, соответственно, подавить все остальные ДФС, обеспечивающие контексты восприятия всех остальных синхронных диалогов.

В таком случае происходит «тонкая настройка» как ольфакторного аппарата интеллектуального агента, так и нейроморфологических речевых анализаторов, работа которых реализуется такими ДФС. Это позволит реферировать входные речевые события, относя их к релевантным проблемным ситуациям, выполняя тем самым эффективную онтологизацию системы «агент – среда».

Механизм управления референцией на основе работы двухуровневого суперинтеллектона требует своего экспериментального подтверждения. Над созданием имитационной модели агента общего искусственного интеллекта под управлением суперинтеллектона в настоящее время ведется работа с помощью разрабатываемой системы визуализации и редактирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

Заключение

Таким образом, в результате данного исследования разработаны основные принципы и модели управления референцией речевых сообщений на основе создания двухконтурной модели мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры – суперинтеллектона, реализующего взаимодействие интеллектона подсознания и интеллектона сознания.

Сформированы требования к онтологиям агента общего искусственного интеллекта, условия их формирования и обозначены функциональные узлы нейрокогнитивных архитектур, необходимые для их эффективного формирования в режиме обучения.

Разработан мультиагентный алгоритм нейрокогнитивного управления референцией речевых сообщений на основе механизма достройки множественных графов проблемных ситуаций при онтологизации системы «агент – среда» на основе их произвольного редактирования интеллектоном сознания.

Полученные результаты могут быть применены при создании систем распознавания и понимания речи, работоспособных при применении в зашумленных средах и ситуациях множественных синхронных диалогов для повышения качества распознавания с использованием понимания контекста ситуаций.

REFERENCES

1. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 232 с.

Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence, or Thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p. (In Russian)

2. Cyrus H. Gordon. The Accidental Invention of the Phonemic Alphabet. *Journal of Near Eastern Studies*. 1970. Vol. 29. No. 3. Pp. 193–197.

3. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (AIMA). 2nd ed. Moscow: Williams, 2007. 1424 p.

4. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2022. 150 с.

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)

5. Nagoev Z., Nagoeva O., Anchekov M. et al. The symbol grounding problem in the system of general artificial intelligence based on multi-agent neurocognitive architecture. *Cognitive Systems Researchthis link is disabled*. 2023. No. 79. Pp. 71–84.

6. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures. *Cognitive Systems Research.* Vol. 66. 2021. Pp. 82–88. ISSN 1389-0417. https://doi.org/10.1016/j.cogsys. 2020.10.015.

7. Nagoev Z., Nagoeva O., Gurtueva I. Multi-agent neurocognitive models of semantics of spatial localization of events. *Cognitive Systems Research*. 2020. Vol. 59. Pp. 91–102.

8. Nagoev Z., Gurtueva I., Malyshev D., Sundukov Z. Multi-agent algorithm imitating formation of phonemic awareness. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 948. Pp. 364–369.

9. Nagoev Z., Pshenokova I., Gurtueva I., Bzhikhatlov K. A simulation model for the cognitive function of static objects recognition based on machine-learning multi-agent architectures. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 948. Pp. 370–378.

10. *Нагоев З. В.* Онтонейроморфогенетическое моделирование // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 4(54). С. 46–56.

Nagoev Z.V. Ontoneuromorphogenetic modeling. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 4(54). Pp. 46–56. (In Russian)

11. Hui P.-Y., Meng H. Latent Semantic Analysis for Multimodal User Input With Speech and Gestures. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*. 2014. Vol. 22. No. 2. Pp. 417–429.

12. Despotovic V., Walter O., Haeb-Umbach R. Machine learning techniques for semantic analysis of dysarthric speech: An experimental study. *Speech Communication*. 2018. Vol. 99. Pp. 242–251.

Информация об авторе

Нагоев Залимхан Вячеславович, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823

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

Макоева Дана Гисовна, канд. филол. наук, зав. лабораторией «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

makoevadana@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5955-2262

Гуртуева Ирина Асланбековна, науч. сотр. лаборатории «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

gurtueva-i@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4945-5682

Information about the author

Nagoev Zalimkhan Vyacheslavovich, Candidate of Technical 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

Nagoeva Olga Vladimirovna, Researcher of the Department "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

Makoeva Dana Gisovna, Candidate of Philological Sciences, Head of the Laboratory of Computational Linguistics, 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;

makoevadana@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5955-2262

Gurtueva Irina Aslanbekovna, Researcher of the Laboratory of Computational Linguistics, 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;

gurtueva-i@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4945-5682

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.89 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-210-225
EDN: RSWAMD

Классификация и условия применения алгоритмов автоматической онтологизации пространства состояний агента общего искусственного интеллекта под управлением нейрокогнитивной архитектуры*

З. В. Нагоев[1], И. А. Пшенокова[2], М. И. Анчёков[1], К. Ч. Бжихатлов[1], Б. А. Аталиков[2], С. А. Канкулов[2], А. З. Энес[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. Целью исследования является формирование алгоритмической базы онтологизации пространства состояний агента общего искусственного интеллекта. Основными *задачами* работы являются классификация алгоритмов автономного синтеза онтологий системы «агент – среда» и выбор условий их применения. Определены форма и содержание основных алгоритмов онтологизации пространства состояний интеллектуального агента общего искусственного интеллекта и построена их классификация. Обоснованы механизмы формирования концептов функциональной репрезентации сущностей пространства состояний интеллектуального агента на основе динамического порождения «по требованию». Построен мета-алгоритм выбора частных алгоритмов онтологизации в зависимости от выделенных условий применения.

Ключевые слова: автоматическое построение онтологий, общий искусственный интеллект, мультиагентные системы, нейрокогнитивные архитектуры

Поступила 02.12.2023, одобрена после рецензирования 08.12.2023, принята к публикации 10.12.2023

Для цитирования. Нагоев З. В., Пшенокова И. А., Анчёков М. И. и др. Классификация и условия применения алгоритмов автоматической онтологизации пространства состояний агента общего искусственного интеллекта под управлением нейрокогнитивной архитектуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 210–225. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-210-225

MSC: 68T42, 68T05 Review article

Classification and conditions of application of algorithms for automatic ontologization of the state space of a general artificial intelligence agent under the control of neurocognitive architecture*

Z.V. Nagoev[1], I.A. Pshenokova[2], M.I. Anchekov[1], K.Ch. Bzhikhatlov[1], B.A. Atalikov[2], S.A. Kankulov[2], A.Z. Enes[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., Пшенокова И. А., Анчёков М. И., Бжихатлов К. Ч., Аталиков Б. А., Канкулов С. А., Энес А. З., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-19-00787).
* The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22-19-00787).

Abstract. The purpose of the study is to form an algorithmic base for ontologizing the state space of a general artificial intelligence agent. The main objectives of the work are the classification of algorithms for the autonomous synthesis of ontologies of the "agent-environment" system and the selection of conditions for their application. The form and contents of the main ontologization algorithms for the state space of an intelligent agent of artificial general intelligence are determined and their classification is constructed. The mechanisms for the formation of concepts of functional representation of entities in the state space of an intelligent agent based on dynamic generation "on demand" are substantiated. A meta-algorithm for selecting private ontologization algorithms has been constructed depending on the selected application conditions.

Keywords: automatic construction of ontologies, artificial general intelligence, multi-agent systems, neurocognitive architectures

Submitted 02.12.2023, approved after reviewing 08.12.2023, accepted for publication 10.12.2023

For citation. Nagoev Z.V., Pshenokova I.A., Anchekov M.I. et al. Classification and conditions of application of algorithms for automatic ontologization of the state space of a general artificial intelligence agent under the control of neurocognitive architecture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 210–225. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-210-225

Введение

Проблема онтологизации пространства состояний системы общего искусственного интеллекта (ОИИ) характеризуется некоторыми существенными особенностями, отличающими ее от задач построения онтологий, решаемых специализированными интеллектуальными системами (системами так называемого «слабого искусственного интеллекта» в конкретных предметных областях) [1]. К их числу можно отнести, в частности, универсальную направленность, так как система ОИИ, предназначенная для решения универсального спектра задач, функционирует в пространстве состояний огромной размерности – в реальной среде[1].

Для обозначения такого пространства в [2] введено понятие системы «интеллектуальный агент – среда», основанное на процессе измерений сенсорной подсистемой интеллектуального агента интра- и экстрасенсорных физических данных. Для решения сложной проблемы эффективной работы в таком пространстве состояний естественные системы ОИИ выработали уникальный механизм так называемого *исследовательского поведения*.

Наличие феноменологического комплекса управления исследовательским поведением является одним из наиболее эффективных эволюционных приобретений разумных многоклеточных организмов. Суть этого комплекса состоит в формировании внутренних мотивационных стимулов для реализации контура управления идентификацией состояний дефицита онтологического знания относительно некоторых фрагментов системы «агент – среда» и синтеза поведения интеллектуального агента, направленного на устранение этого дефицита.

Отличительной этологической особенностью этой подсистемы является именно наличие проактивного контура внутренней мотивации, что связано с отложенностью результата действия, его направленностью на применение построенных онтологий в будущих возможных ситуациях. В этом смысле эта подсистема управления принципиально отличается от реактивных контуров управления, действующих в парадигме «стимул – реакция», и даже от проактивных контуров управления, ориентированных на достижение пусть отложенного, но некоторого конкретного результата.

Основным патентом природы, алгоритмическая сущность которого описана в [3], является формирование подсистемы внутренней мотивации, не связанной с внешними стиму-

[1]https://www.researchgate.net/publication/271390398_Artificial_General_Intelligence_Concept_State_of_the_Art_and_Future_Prospects

лами поведения интеллектуального агента. Т.е. возникновение новой, ранее не встречавшейся ситуации вне зависимости от наличия непосредственных стимулов (в настоящем или будущем), связанных с увеличением значений целевой функции, приводит к тому, что в нейрокогнитивной архитектуре выполняется алгоритм, определяющий внутренний стимул в виде вознаграждения, заданного в терминах значений локальных целевых функций агнейронов соответствующих нейрокогнитонов, мотивирующий интеллектуального агента к синтезу и реализации исследовательского поведения, направленного на онтологизацию данной новой ситуации в интересах будущих применений.

Системный (биологический) смысл такой опережающей онтологизации, когда новые события (ситуации) онтологизируются как бы «впрок», состоит в том, что интеллектуальный агент в случае наступления такой ситуации в будущем будет готов к тому, каким образом действовать в ней некоторым субоптимальным по критериям целевой функции способом.

Из вышеизложенного, в частности, следует, что достроенная *онтология* в управляющей нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента в общем случае представляет собой систему отношений между агнейронами в составе динамической функциональной системы (по Анохину). Такое представление об онтологии, формируемой интеллектуальным агентом для описания пространства состояний системы «агент – среда», демонстрирует глубокую сущностную связь с философской категорией бытия. Потребности управления бытием («онтос»), жизненным (функциональным) циклом интеллектуального агента детерминируют формы и содержание процессов онтологизации, реализуемых мультиагентной нейрокогнитивной архитектурой.

Как показано в [4], основным механизмом онтологизации отдельных сущностей является алгоритм порождения функциональных элементов мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры интеллектуального агента «по требованию». Однако в случае агента общего искусственного интеллекта, действующего в пространстве гигантской размерности в интересах эффективного управления своим жизненным циклом, необходима не только онтологизация сущностей, но и их влияние на состояние целевой функции агента, а также построение системы причинно-следственных связей между концептами, описывающими различные фрагменты системы «агент – среда».

Если интеллектуальный агент в процессе исследования такой системы сталкивается с некоторым новым событием (например, с событием идентификации нового объекта), то прямой алгоритм онтологизации предполагает, что необходимо сначала создать онтологическое описание этого события (событие-причина), а затем – онтологическое описание влияния (потенциально возможного влияния) этого события на изменение состояния системы «агент – среда», в которых будут идентифицироваться новые, пока не наступившие (либо вообще ранее не наступавшие) события (события-следствия) в будущем.

Алгоритмы построения причинно-следственных зависимостей должны в этом случае автоматически построить необходимые ассоциативные связи как к событиям прошлого (причины), так и возможным событиям будущего (следствия).

В целях идентификации алгоритмов онтологизации системы «агент – среда» для их рационального ситуативно-детерминированного выбора при автоматическом применении в процессе обучения интеллектуального агента общего искусственного интеллекта необходимо четко определить функциональные различия и особенности их применения.

Таким образом, проблема классификации и выбора условий применения алгоритмов автономной онтологизации пространства состояний программного агента общего искусственного интеллекта является актуальной.

Целью настоящего исследования является формирование алгоритмической базы онтологизации пространства состояний агента общего искусственного интеллекта.

Основными задачами работы являются классификация алгоритмов автономного синтеза онтологий системы «агент – среда» и выбор условий их применения.

1. Проблема классификации и выбора условий применения алгоритмов автоматической онтологизации пространства состояний агента ОИИ

У агента ОИИ процесс онтологизации может быть ориентирован на построение причинно-следственных связей от события-причины к событию-следствию или, наоборот, от события-следствия к событию-причине. Порядок в данном случае определяет последовательность идентификации и обработки событий, связанных причинно-следственной связью.

В целях настоящего исследования *событием* мы считаем формирование некоторого мультиагентного факта. Например: «Некоторый объект существует» либо «Объект находится передо мной», либо «Объект вкусный» и т.п. Этот процесс достаточно подробно описан в [5]. Его суть состоит в том, что любая информация, описывающая систему «агент – среда» в нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента, представляется так называемыми мультиагентными знаниями, организованными в формате так называемого *мультиагентного факта*, часть которого представлена знаниями о *теме* (сущность которой посвящена информации), а другая часть – *реме* – непосредственно знанием о некоторых свойствах этой сущности или действиями с ее участием (рис. 1).

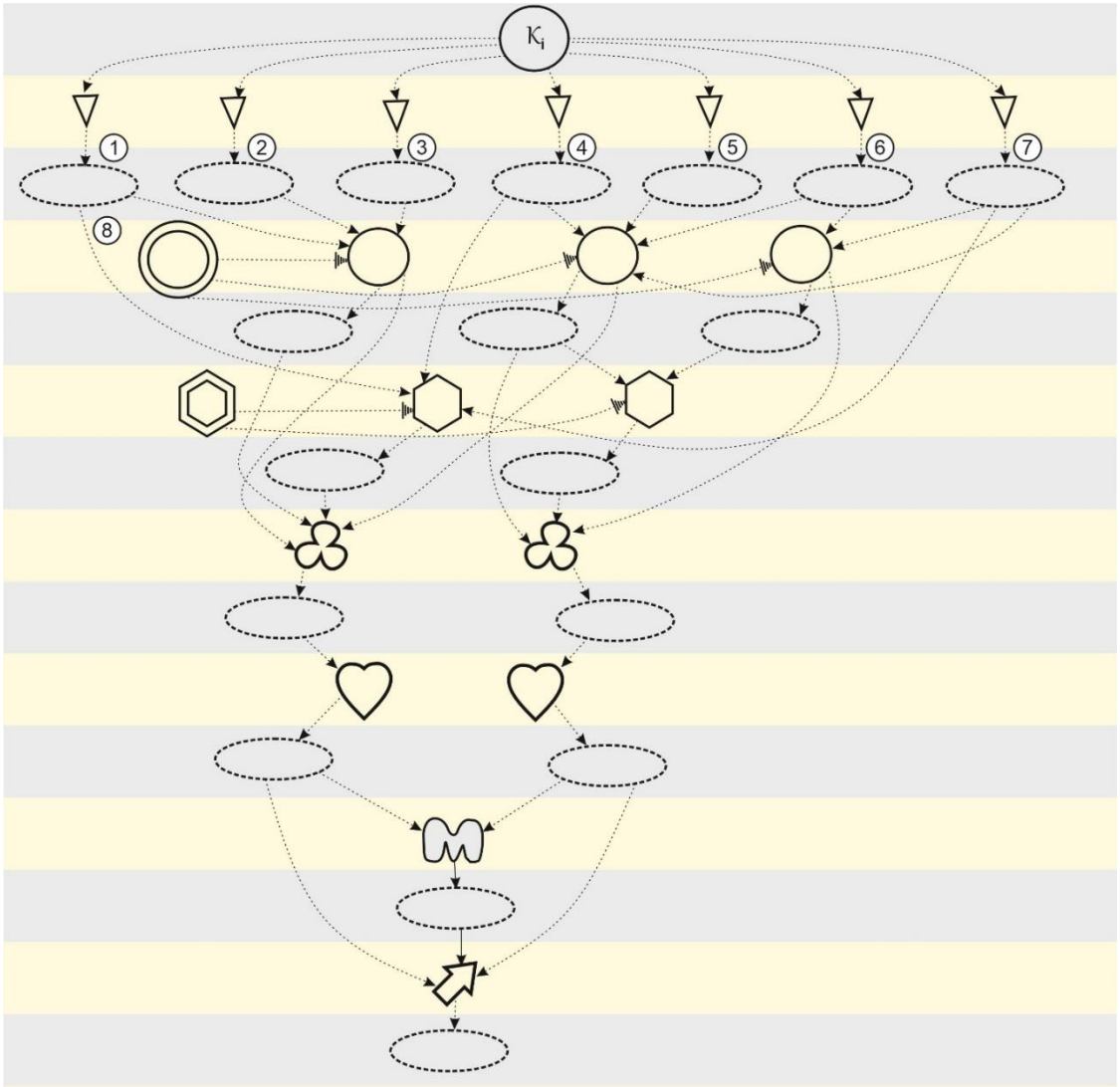


Рис. 1. *Схематическое изображение функциональной репрезентации событий в пространстве состояний интеллектуального агента с помощью мультиагентных фактов*

Fig. 1. *Schematic representation of the functional representation of events in the state space of an intelligent agent using multi-agent facts*

Под *сущностью* в данном случае мы понимаем некоторый *объект* или объекты, которые в явном виде выделяются сенсорной системой интеллектуального агента при наблюдении системы «агент – среда» и для функциональной репрезентации которых в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре агента выделяются (существуют) специальные агнейроны.

Под *действием* будем понимать некоторое преобразование, выполняемое интеллектуальным агентом над определенным объектом (объектами) (над определенным фрагментом системы «агент – среда»), находящимся в некотором состоянии, в результате которого, как правило, наступают изменения в составе, свойствах или состояниях этих и/или других объектов (интеллектуальный агент переходит в другое состояние пространства состояний системы «агент – среда»).

Можно считать, что действие объединяет два или более событий, так как состояния, между которыми переходит система «агент – среда» в результате его выполнения, описываются мультиагентными фактами, а они, как мы выяснили, как раз и есть события.

Алгоритмы онтологизации направлены на создание мультиагентного нейрокогнитивного описания текущего события, формирование таких же описаний событий, уже имевших место в прошлом, послуживших причинами наступления данного события, а также событий, которые, возможно, произойдут в будущем. Таким образом, алгоритмы онтологизации системы «агент – среда» направлены на формирование цепочки причинно-следственных зависимостей, связывающих текущее событие с событиями-причинами и событиями-следствиями (рис. 2).

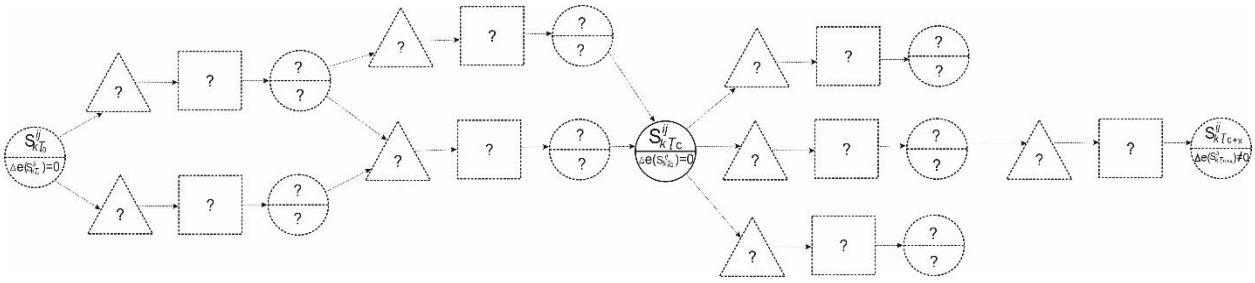


Рис. 2. *«Пустое» дерево решений проблемной ситуации*

Fig. 2. *“Empty” tree of solutions to a problem situation*

На рисунке приведено изображение т.н. *дерева решений текущей проблемной ситуации*, которое задает графическое представление процесса синтеза поведения интеллектуального агента. Кругами в нем представлены состояния системы «агент – среда», треугольниками – действия интеллектуального агента, а квадратами – ответные действия среды. Из рисунка следует, что в данный момент времени интеллектуальный агент однозначно идентифицировал только те события, которые описывают текущую ситуацию (обозначена символами в круге, оконтуренном сплошной жирной линией). Остальные (возможные) элементы дерева пока интеллектуальному агенту неизвестны, поэтому обозначены тонкой пунктирной линией. Заполнение этого дерева интеллектуальный агент может выполнить только на основе существующих, полученных из предыдущего опыта, сформированных на основе исследовательского поведения или приобретаемых «по случаю» («по требованию») в данном эпистемологическом контексте.

По нашей гипотезе, различные алгоритмы онтологизации всегда выполняются совместно, так как целесообразная картина мира, которая формируется в управляющей нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента, должна быть логически целостной, не содержащей необусловленных онтологических единиц. Наличие таких единиц является ситуацией, формирующей внутреннюю мотивацию интеллектуального агента к синтезу и выполнению *исследовательского поведения*.

Как было показано в [2], ответить на вопрос о пользе или вреде, который может принести данное событие, интеллектуальный агент может, только получив соответствующие знания. Знания же эти он может получить только тремя основными способами: а) экспериментальным; б) аналитическим; в) коммуникативным.

Экспериментальный способ предполагает, что интеллектуальный агент выполняет над объектами, участвовавшими в формировании рассматриваемого мультиагентного факта, некоторые действия и регистрирует события, которые наступили в результате. Такой эксперимент позволяет агенту с достаточной степенью правдоподобия установить, как именно изменяется состояние системы «интеллектуальный агент – среда»: от начального состояния, частью описания которого является стартовое событие, в результате выполнения некоторого конкретного действия, – к некоторому конечному состоянию, в которое переходит система (рис. 3).

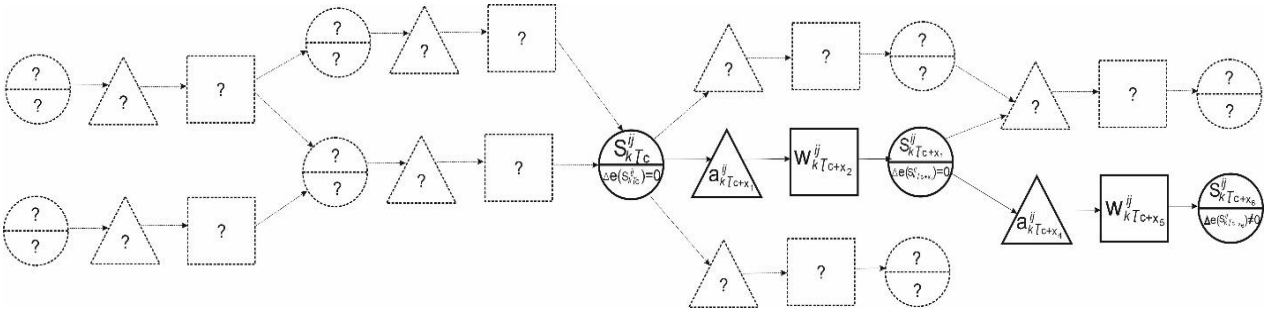


Рис. 3. *Результат выполнения алгоритма прямой экспериментальной онтологизации*

Fig. 3. *Result of executing the direct experimental ontologization algorithm*

На рисунке показано, что интеллектуальный агент заполняет один из потенциально возможных сценариев пространства альтернатив, переходя от текущего состояния к будущим (показаны кругами с обозначениями, оконтуренными жирными линиями), в результате выполнения фактического эксперимента.

Экспериментальный способ отличается достоверностью, однако, во-первых, для его реализации требуются определенные условия – такие, например, как управление монопольными ресурсами и структурными элементами интеллектуального агента (части тела, энергия), наличие времени и некоторых обязательных конкретных условий для выполнения эксперимента.

Аналитический способ основан на самостоятельном (внутреннем) моделировании последствий данного события в процессе «мысленного эксперимента». В ходе такого моделирования выполняется мультиагентный алгоритм, имитирующий процесс рассуждения на заданную тему, в котором основная функциональная роль по предсказанию последствий (развитию ситуации, сценария событий) отводится агнейронам из нейрокогнитона моделирования, ансамблям событийных агнейронов, выполняющих в нейрокогнитивной архитектуре функциональную репрезентацию взаимозависимых фрагментов системы «интеллектуальный агент – среда», и т.н. *агнейронам действия*, которые, соответственно, выполняют в нейрокогнитивной архитектуре функциональную репрезентацию действий, реализуя которые интеллектуальный агент переходит между такими фрагментами. При этом недостающие знания производятся самой управляющей нейрокогнитивной архитектурой интеллектуального агента на основе моделирования и прогнозирования. Такой способ представляется гораздо более экономичным, однако существенной проблемой является точность (качество) знаний, продуцируемых таким способом (рис. 4).

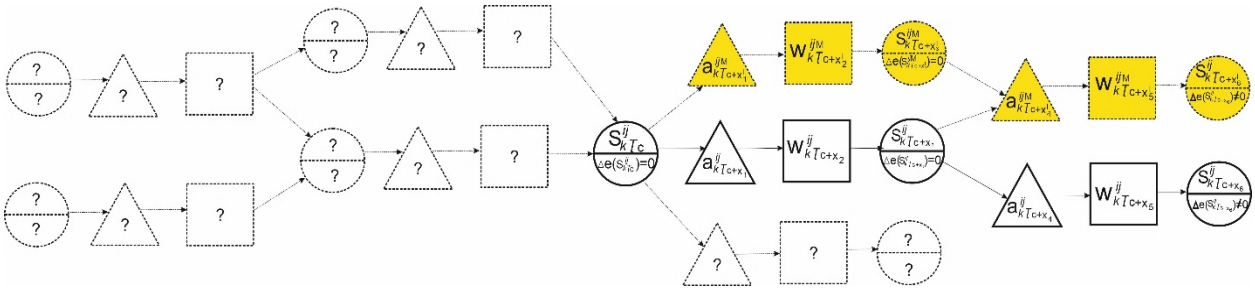


Рис. 4. *Результаты выполнения алгоритма прямой аналитической онтологизации*

Fig. 4. *Results of executing the direct analytical ontologization algorithm*

На рисунке результаты выполнения алгоритма прямой аналитической онтологизации показаны закрашенными элементами дерева решений проблемной ситуации с обозначениями, оконтуренными тонкой пунктирной линией (так как это воображаемое будущее).

На рисунке 5 показано, что аналитический метод вполне применим и к событиям прошлого.

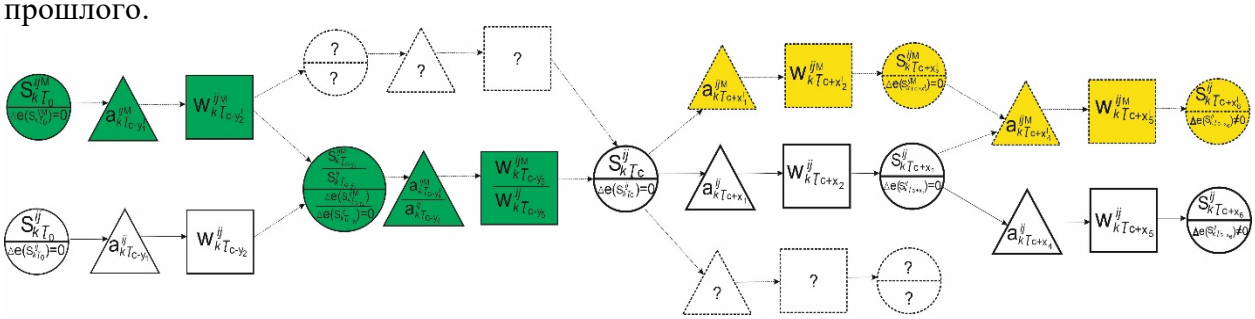


Рис. 5. *Результаты совместной работы прямого и обратного алгоритмов аналитической онтологизации*

Fig. 5. *Results of joint work of forward and reverse algorithms analytical ontologization*

При *коммуникативном способе* интеллектуальный агент не затрачивает вообще никакие ресурсы на проведение ни мысленных, ни физических экспериментов. Вместо этого он просто обращается за необходимой информацией (знаниями) к другим интеллектуальным агентам, используя доступные коммуникативные каналы. В этом случае полученные знания могут характеризоваться различной степенью точности. Безусловным преимуществом является то, что такие знания выражены в абстрактной знаковой форме, что позволяет существенным образом повысить удельную интенсивность обучения, передавая значительно большее количество информации в единицу времени (рис. 6).

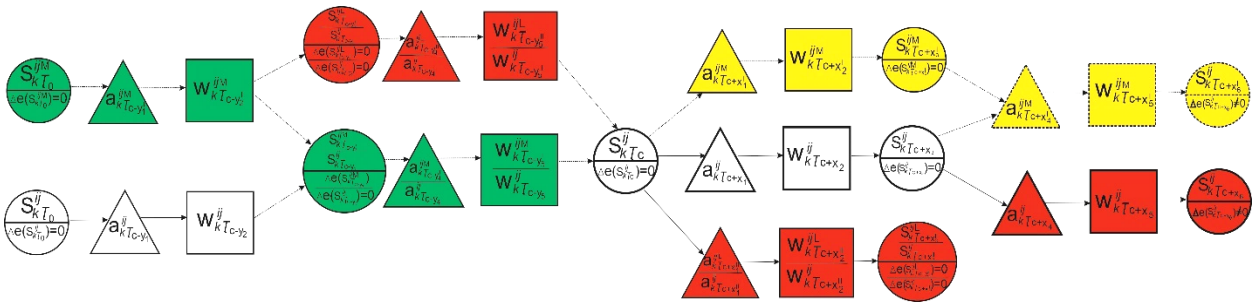


Рис. 6. *Результаты применения прямого и обратного алгоритмов коммуникативной онтологизации*

Fig. 6. *Results of applying the forward and inverse algorithms communicative ontologization*

Сохраняя сильные стороны двух предыдущих способов, коммуникативное обучение преодолевает их недостатки, так как, с одной стороны, в передаваемом, как правило с помощью естественного языка, сообщении описываются и начальное событие, и действия, которые необходимо выполнить для достижения семантически значимого результата, и конечные события, характеризующие ситуацию, в которой эти результаты должны проявиться. При этом в нейрокогнитивной архитектуре строятся и сохраняются все необходимые модели, которые могут, например, в дальнейшем понадобиться для имитационного моделирования самых разнообразных ситуаций с участием задействованных в контексте обучения событий.

С другой же стороны, при реализации коммуникативного способа нет никаких ограничений ни на ресурсные затраты, необходимые для проведения физического эксперимента, ни на качество знаний, которые могли бы, например, проявиться при обучении на основе самостоятельного внутреннего моделирования.

Помимо классификации способов обучения *по критерию источника знаний*, получаемых интеллектуальным агентом, введем также классификацию *по критерию направления процесса верификации* нового знания.

Для того чтобы оценить такое направление, рассмотрим понятие *ситуации*, идентифицируемой управляющей мультиагентной нейрокогнитивной архитектурой интеллектуального агента, введенное в [2]. Под этим термином мы будем понимать множество событий, связанных причинно-следственными и/или темпоральными зависимостями, одно или более из которых характеризуются существенным изменением значения целевой функции интеллектуального агента. У каждой ситуации есть начало и окончание, в явном виде связанные с наступлением определенных событий, а также некоторая внутренняя логика, позволяющая рассматривать множество входящих в эту ситуацию событий – от начальных через промежуточные к завершающим – в качестве комплекса событий, с достаточной степенью вероятности повторяющихся при наступлении данной ситуации.

Например, если утром выпало много снега (1-е событие), в обед температура поднялась выше нуля (2-е событие), к вечеру часть снега подтаяла (3-е событие), а ночью температура опустилась ниже нуля (4-е событие), то, вероятнее всего, на тротуаре будет гололедица (5-е событие), и, соответственно, перемещаться по улице будет некомфортно – от человека (интеллектуального агента) потребуется гораздо больше усилий, чем обычно (6-е, завершающее, событие). В этой ситуации часть событий связана друг с другом причинно-следственными отношениями, а часть – только темпоральными. Однако каждое из этих событий существенным образом влияет на вероятность появления результирующего, завершающего события, наступление которого для интеллектуального агента было бы связано со значительными дополнительными потерями энергии.

Таким образом, любая ситуация однозначно идентифицируется составом и последовательностью входящих в нее событий. При этом часть этих событий сами по себе, взятые отдельно, могут быть нейтральными с точки зрения своего непосредственного влияния на значение целевой функции, однако внутренняя логика, объединяющая эти события в ситуацию, неизбежно ведет их последовательность к событию, характеризующемуся существенным изменением (позитивным или негативным) значения целевой функции.

Так как ключевым фактором преимущества интеллектуальных систем в эффективности является *проактивное принятие решений*, принципиальное значение для реализации этого преимущества имеет *длина горизонта планирования*. Соответственно, чем раньше интеллектуальным агентом будут идентифицированы первые события некоторой ситуации, тем больше шагов (элементов последовательности возникающих событий) в ее составе останется до наступления события, в котором интеллектуальный агент может испытать существенные изменения значений целевой функции. Такая ранняя идентификация, следовательно, дает больше шансов для проактивного принятия решений, направленных либо на

устойчивое движение к результирующему событию, если это событие позитивно, либо на активное противодействие его наступлению в случае, когда такое событие негативно.

С учетом того, что реальная среда, в которой функционирует интеллектуальный агент, является неструктурированной, неопределенной, эпизодической и частично наблюдаемой, априорная вероятность встречи интеллектуального агента с любым из событий в составе некоторой ситуации примерно одинакова. Следовательно, агент может либо сначала пройти через череду нейтральных событий и лишь в конце ситуации встретить результирующее событие, либо сразу столкнуться с результирующим событием, что, соответственно, приведет к потере или приобретению энергии. В зависимости от того, по какому из этих двух сценариев идет ситуация, – от нейтральных событий в составе ситуации к результирующему событию или наоборот, – мы и классифицируем алгоритмы онтологизации по направлению верификации, выделяя соответственно *прямой и обратный алгоритмы онтологизации*.

Необходимо отметить, что все процессы формирования функциональных связей между агнейронами в составе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры выполняются на основе т.н. *алгоритма онтонейроморфогенеза* [6], определяющего гипотетический механизм формирования связей в динамических функциональных системах головного мозга на основе процессов ситуативно-детерминированного роста и деградации аксо-дендрональных связей между биологическими нейронами.

Так как перебор всех возможных потенциальных вариантов ситуаций, в которых рассматриваемое событие может «встретиться» (возникнуть) как составная часть, является практически нереализуемой задачей, необходим механизм, который позволял бы обучающемуся интеллектуальному агенту (ребенку, программному агенту, роботу) непосредственно «на месте» первоначального возникновения этого события сразу же найти такие ситуации, в которых данное событие несло бы в себе угрозу либо было бы полезно.

Таким механизмом в социальной среде является интерактивное взаимодействие с наставниками (родителями, учителями, коллегами, друзьями), в ходе которого интеллектуальный агент запрашивает и получает необходимую информацию на основе прямой или косвенной коммуникации (рис. 7).

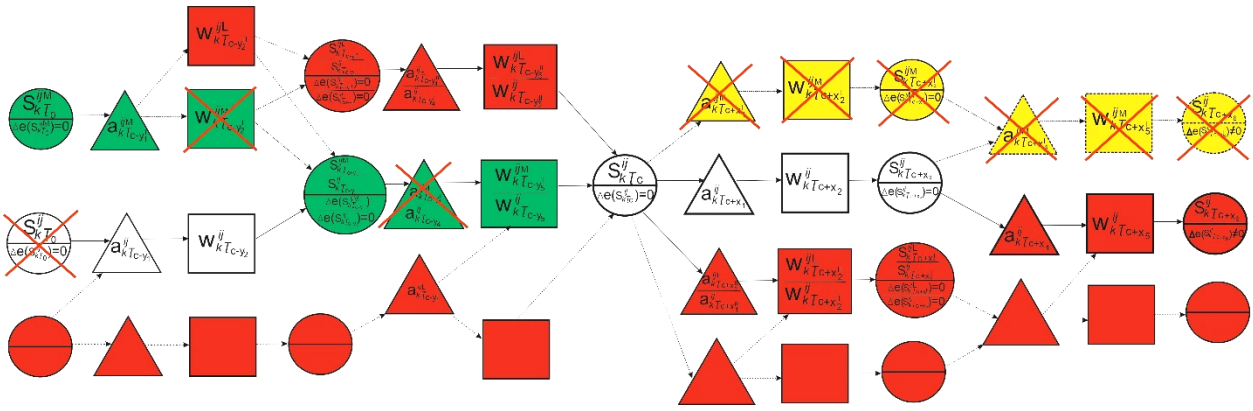


Рис. 7. *Развитие и частичная деградация дерева проблемной ситуации за счет многократного применения алгоритмов прямой и обратной онтологизации*

Fig. 7. *Development and partial degradation of the problem situation tree due to repeated use of direct and reverse ontologization algorithms*

Следует обратить внимание, что так же, как и при применении аналитических алгоритмов онтологизации, возможно многократное применение коммуникативных алгоритмов для развития дерева решений проблемной ситуации, а также для его прореживания путем удаления элементов, потерявших актуальность.

Таким образом, в результате анализа процессов формирования функциональных связей на основе алгоритма онтонейроморфогенеза в управляющей нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента можно выделить следующие способы онтологизации: *алгоритм порождения концептов, прямой экспериментальный алгоритм, обратный экспериментальный алгоритм, прямой аналитический алгоритм, обратный аналитический алгоритм, прямой коммуникативный алгоритм, обратный коммуникативный алгоритм.*

В процессе реализации каждого из этих алгоритмов интеллектуальный агент выполняет исследовательское поведение, направленное на достройку недостающих знаний с помощью соответствующего мультиагентного алгоритма синтеза, реализующего формирование соответствующей цели, синтез необходимых для ее достижения действий, их выполнение и обучение интеллектуальной системы управления на основе измерений по факту исполнения этих действий.

Как следует из вышеизложенного, цель онтологизации пространства состояний интеллектуального агента – формирование системы знаний, необходимых и достаточных для эффективной реализации функционального назначения, может быть реализована только с помощью комплексного, совместного применения всех типов этих алгоритмов. Каковы же существенные условия выбора каждого из этих алгоритмов при реализации сложного исследовательского поведения интеллектуального агента, направленного на автономный синтез онтологий системы «агент – среда».

2. Условия применения алгоритмов автоматической онтологизации

Как правило, различные способы онтологизации используются интеллектуальным агентом в процессе его индивидуального развития в соответствии с логикой, обусловленной текущим *эпистемологическим контекстом*. Под таким контекстом мы, собственно, и понимаем существенные условия и обстоятельства, в зависимости от которых интеллектуальный агент извлекает знания в процессе онтологизации системы «агент – среда» тем или иным способом. К существенным условиям, определяющим эпистемологический контекст, относятся комбинации таких обстоятельств, характеризующих текущую ситуацию, как степень новизны онтологизируемого события, направление онтологизации, наличие, возможность и сложность доступа к полному набору знаний, необходимых для построения комплекса онтологий, связанных с данным событием.

Если у интеллектуального агента есть возможность выбора способов онтологизации некоторого фрагмента системы «агент – среда», то он может выработать определенные предпочтения относительно того, в каких именно эпистемологических контекстах какие именно из этих способов применять.

После того, как алгоритмы распознавания регистрируют некоторую текущую ситуацию, производится оценка системной (биологической) значимости этой ситуации с помощью эмоциональных нейрокогнитонов. Так как ситуация неизвестная, в составе нейрокогнитивного тракта подсознания с высокой вероятностью отсутствуют агнейроны, которые отвечали бы за ее обработку. Поэтому рационально было бы предположить, что оценка входного события как неизвестного в этом когнитивном тракте должна приводить к постановке цели, достижение которой приведет к устранению этого пробела в знаниях интеллектуального агента. Как минимум, необходимо выяснить, несет ли это событие какую-либо угрозу или, наоборот, с ним можно связать некоторые надежды на достижение более высоких значений целевой функции интеллектуального агента в настоящей ситуации либо в возможных будущих ситуациях, в которых может возникнуть такое же (аналогичное) событие.

В условиях неопределенности нейрокогнитивной архитектурой интеллектуального агента используется априорная информация, связанная с базовым системным (биологическим) значением объектов, задействованных в новом событии, такая, например, как знание о том, пригоден ли предмет в пищу, каковы его экстеросенсорные свойства (форма, цвет, запах и др.).

Если за стартовую точку процесса онтологизации системы «агент – среда» принять начало функционирования интеллектуального агента в данной среде, то можно констатировать ситуацию практически полного отсутствия у него знаний об этой системе (исключая базовый предустановленный набор онтологий). Отсутствие знаний практически исключает возможность эффективного использования аналитического способа синтеза онтологий.

На рисунке 8 приведена блок-схема разработанного мета-алгоритма выбора интеллектуальным агентом частных алгоритмов онтологизации в зависимости от условий применения.

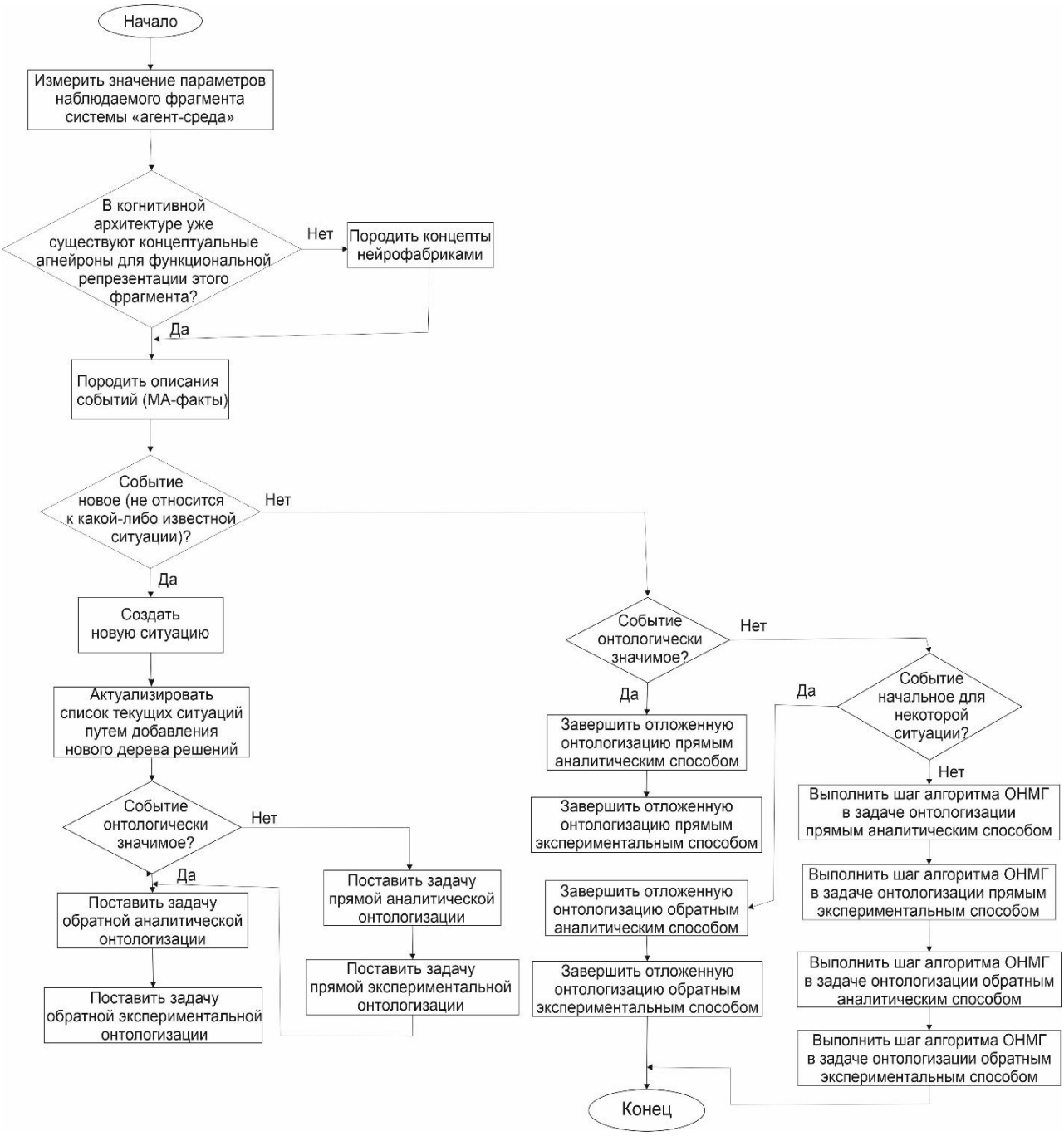


Рис. 8. *Мета-алгоритм выбора алгоритмов онтологизации пространства состояний интеллектуального агента*

Fig. 8. *Meta-algorithm for selecting space ontologization algorithms intelligent agent states*

Учитывая отсутствие опыта функционирования, можно также утверждать, что интеллектуальный агент пока не переходил (не попадал) ни в какие ситуации, т.е. система «агент – среда» еще не переходила ни в «хорошие» состояния (в которых значение целевой функции увеличивается), ни в «плохие» ситуации (в которых соответственно значение целевой функции уменьшается). Строго говоря, в начальный момент времени эта система вообще характеризуется опытом пребывания только в одном-единственном состоянии.

Так как ввиду полного отсутствия социального опыта в начальный момент времени интеллектуальный агент также не знает никакого языка, коммуникативный способ онтологизации, основанный на обмене абстрактными языковыми описаниями событий, ему также не доступен.

Больше того, в начальный момент времени потоки данных, описывающие систему «интеллектуальный агент – среда», в принципе являются неструктурированными, так как в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента пока еще нет агнейронов, выполняющих функциональную репрезентацию сущностей, выделяемых из этих потоков данных сенсорной системой интеллектуального агента на основе действия комплекса предустановленных (врожденных) априорных паттернов распознавания.

Следовательно, в начальный момент функционирования интеллектуальному агенту доступен только один способ онтологизации системы «агент – среда» – концептуализация входных потоков неструктурированных многомодальных данных [7, 8]. Такая онтологизация предполагает как порождение нейрофабриками агнейронов, выполняющих функциональную репрезентацию фрагментов системы «агент – среда» в различных категориях сущностной парадигмы концептов – объекты, действия, признаки и т.д., так и формирование мультиагентных фактов, выполняющих уже функциональную репрезентацию событий в системе «агент – среда», в составе которых ранее порожденные единичные концепты как раз и используются для передачи отношений между различными фрагментами наблюдаемой системы. Для функциональной репрезентации таких мультиагентных фактов в нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента предусмотрены т.н. *событийные агнейроны* (рис. 1).

Непосредственно после начала процесса онтологизации системы «агент – среда» на основе концептуализации при помощи порождения нейрофабриками агнейронов и автоматического формирования в нейрокогнитивной архитектуре мультиагентных фактов интеллектуальному агенту становится доступен еще только один новый способ онтологизации – прямая экспериментальная онтологизация.

Этот эффект проявляется в силу того, что концептуальные агнейроны, порождаемые нейрофабриками в режиме реального времени, постепенно начинают заполнять соответствующие нейрокогнитоны, принимать участие в построении мультиагентных фактов, описывающих события в системе «агент – среда», а также активно и автономно взаимодействовать друг с другом с целью формирования динамических мультиагентных функциональных систем, ориентированных на решение текущих проблем на основе построения причинно-следственных зависимостей.

Сразу же после перехода в состояние, в котором значение целевой функции интеллектуального агента претерпевает существенное изменение («плохие» и «хорошие» состояния), для обозначения которого мы будем применять термин «онтологически значимые состояния» интеллектуального агента (имея в виду опосредованное влияние изменения значения целевой функции на степень функциональной целостности и готовности этого агента, его «онтос» – «бытие»), у интеллектуального агента возникает возможность использования метода обратной экспериментальной онтологизации. Необходимым условием для этого является еще и участие в формировании ситуации, завершающим событием которой и стал переход в онтологически значимое состояние, событий, ранее онтологизированных интеллектуальным агентом в составе некоторых других ситуаций.

После накопления некоторой базы знаний о системе «агент – среда» становятся принципиально возможными эпистемологические контексты, в которых интеллектуальный агент выполняет уже аналитический синтез онтологий, так как «машина рассуждений» в виде инварианта КА позволяет использовать совокупность некоторых (уже не пустых) нейрокогнитонов, таких, например, как моделирующий нейрокогнитон, нейрокогнитон потенциалиса, синтеза целей, действий, оценки, управления для выполнения цикла внутреннего «ментального» мультиагентного нейрокогнитивного моделирования ситуаций, в которые входят те или иные определенные события.

На этом уровне развития нейрокогнитивной архитектуры интеллектуальный агент уже обладает всеми нужными функциональными элементами (агнейроны-концепты, мультиагентные алгоритмы, реализующие те или иные методы рассуждений), которые необходимы для выполнения как прямых, так и обратных способов онтологизации как экспериментальным, так и аналитическим способом.

Строго говоря, учитывая необходимость постоянного совершенствования мультиагентных алгоритмов нейрокогнитивного моделирования системы «агент – среда», интеллектуальный агент на данном этапе своего развития, как правило, применяет все четыре вышеупомянутых способа конструирования онтологий [8–10].

Так, например, если сначала интеллектуальный агент идентифицирует новое событие, с которым ранее он не сталкивался, и если оно само по себе оценивается как нейтральное, то далее в этом эпистемологическом контексте интеллектуальному агенту доступен как прямой аналитический, так и прямой экспериментальный способ онтологизации.

В первом случае с помощью нейрокогнитона моделирования когнитивная архитектура пытается построить возможные сценарии развития ситуации, начало которой может быть положено данным идентифицированным событием, которые представляют последствия данного события в виде цепочек воображаемых (еще не наступивших) событий в будущем.

Во втором интеллектуальный агент опирается на данные фактических измерений, регистрируемые его сенсорной системой по результату наступления событий, последовавших за первым идентифицированным событием (рис. 8).

Если же интеллектуальный агент идентифицирует некоторое нейтральное событие, не являющееся новым, но входящее (в череде других сопутствующих событий) в некоторую ранее имевшую место ситуацию (событие, ранее встречавшееся в некотором эпистемологическом контексте), а затем наступает некоторое новое для данного эпистемологического контекста онтологически значимое событие, можно говорить о запуске обратного экспериментального алгоритма онтологизации.

Способ обратной аналитической онтологизации запускается интеллектуальным агентом в работу в том случае, когда он идентифицирует некоторое известное событие, которое ранее регистрировалось в качестве неначального события некоторой известной ситуации. Констатация факта наступления известного события в таком новом эпистемологическом контексте приводит интеллектуального агента к необходимости учесть данное событие в составе некоторой новой ситуации. Агент может выполнить эту задачу только комбинацией применения нескольких способов – прямой аналитический или прямой экспериментальный способ он может использовать для достройки ситуации в направлении будущего онтологически значимого события (необходимо понять, к чему приведет наступление данного события). Соответственно, обратный аналитический и обратный экспериментальный способы будут применяться для достройки ситуации в направлении прошедших событий, так как всегда существует также необходимость понять, какое событие явилось стартовым для текущей ситуации.

Разница между обратным экспериментальным и обратным аналитическим способами состоит в том, что с помощью первого из них интеллектуальный агент может проверить участие

в текущей ситуации только тех событий, которые были идентифицированы в прошлом самим этим агентом в результате самостоятельно выполненных измерений соответствующих значений параметров системы «агент – среда». Что же касается обратного аналитического способа, то с его помощью интеллектуальный агент может идентифицировать даже те события, которые по факту своего наступления в прошлом непосредственно не были зарегистрированы сенсорами интеллектуального агента. Как следует из краткого описания такого эпистемологического контекста, эти непосредственно не наблюдавшиеся события также восстанавливаются интеллектуальным агентом с помощью функциональной системы воображения, работа которой обеспечивается нейрокогнитивной архитектурой. Соответственно, будучи «воображаемыми в прошлом», эти события могли на самом деле (фактически) никогда и не иметь места в действительности. Для их восстановления с помощью описанного механизма, так же, как и для восстановления событий в прошлом, интеллектуальный агент использует агнейроны моделирующего когнитона нейрокогнитивной архитектуры [9].

С точки зрения процессов, протекающих в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре, принципиальное различие между экспериментальным и аналитическим способом онтологизации состоит в том, что при экспериментальном способе алгоритм онтонейроморфогенеза выполняется путем образования новых контрактных связей между агнейронами событийного нейрокогнитона, активизирующимися в результате выполнения функциональной репрезентации фактически наступивших событий, а при аналитическом способе – развитие новых аксо-дендрональных связей происходит между такими же событийными агнейронами уже на основе выполнения ими функциональной репрезентации воображаемых событий, активация которых наступает в результате работы прежде всего моделирующих агнейронов (агнейронов моделирующего нейрокогнитона).

Заключение

Таким образом, в результате выполнения данного исследования определены форма и содержание основных алгоритмов онтологизации пространства состояний интеллектуального агента общего искусственного интеллекта и построена их классификация. Обоснованы механизмы формирования концептов функциональной репрезентации сущностей пространства состояний интеллектуального агента на основе порождения «по требованию» с помощью нейрофабрик. Дано обоснование применения комплекса мета-алгоритмов исследовательского поведения таких агентов в условиях реальной среды для формирования систематизированных знаний, необходимых и достаточных для реализации эффективного функционирования по назначению применения. Построен мета-алгоритм выбора частных алгоритмов онтологизации системы «агент – среда» в зависимости от выделенных условий применения.

REFERENCES

1. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (AIMA). 2nd ed. Moscow: Williams, 2007. 1424 p.

2. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 232 с.

Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence, or Thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p. (In Russian)

3. Nagoev Z., Nagoeva O., Anchekov M. et al. The symbol grounding problem in the system of general artificial intelligence based on multi-agent neurocognitive architecture. *Cognitive Systems Researchthis link is disabled*, 2023. No. 79. Pp. 71–84.

4. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2022. 150 с.

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)

5. *Апшев А. З., Аталиков Б. А., Канкулов С. А. и др.* Онтофилогенетические алгоритмы синтеза фенотипов интеллектуальных программных агентов для применения в задачах многопоколенной оптимизации управляющих нейрокогнитивных архитектур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 76–91. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-76-91

Apshev A.Z., Atalikov B.A., Kankulov S.A. et al. Ontophylogenetic algorithms for the synthesis of phenotypes of intelligent software agents for use in multi-generation optimization problems of control neurocognitive architectures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 76–91. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-76-91. (In Russian)

6. *Нагоев З. В.* Онтонейроморфогенетическое моделирование // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 4(54). С. 46–56.

Nagoev Z.V. Ontoneuromorphogenetic modeling. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 4(54). Pp. 46–56. (In Russian)

7. DiFilippo N.M., Jouaneh M.K. Using the soar cognitive architecture to remove screws from different laptop models. *IEEE Trans Autom Sci Eng*. 2018. No. 16(2). Pp.767–780.

8. Fittner M., Brandstatter C. How human inspired learning enhances the behavior of autonomous agents. *JCP*. 2018. No 13(2). Pp.154–160.

9. Gobet F., Lane P. The chrest architecture of cognition: The role of perception in general intelligence. *In: 3d Conference on Artificial General Intelligence (AGI-2010)*, Atlantis Press. 2010. https://doi.org/10.2991/agi.2010.20

10. González-Casillas A., Parra L., Martin L. et al. Towards a model of visual recognition based on neurosciences. *Proc Comput Sci*. 2018. Vol. 145. Pp. 214–231.

Информация об авторах

Нагоев Залимхан Вячеславович, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823

Пшенокова Инна Ауесовна, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. «Интеллектуальные среды обитания», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3394-7682

Анчёков Мурат Инусович, науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X

Бжихатлов Кантемир Чамалович, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

haosit13@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0924-0193

Аталиков Борис Анзорович, стажер-исследователь лаборатории «Интеллектуальные среды обитания», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

atalikov10@gmail.com

Канкулов Султан Ахмедович, стажер-исследователь лаборатории «Интеллектуальные среды обитания», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
skankulov@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2996-7376
Энес Ахмед Зюлфикар, мл. науч. сотр. лаборатории «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
ahmedenes@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3633-4910

Information about the authors

Nagoev Zalimkhan Vyacheslavovich, Candidate of Technical 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
Pshenokova Inna Auesovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory “Intelligent Living Environments”, 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;
pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3394-7682
Anchekov Murat Inusovich, Researcher of the Laboratory “Molecular Selection and Biotechnology”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;
murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X
Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory “Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360002, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;
haosit13@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0924-0193
Atalikov Boris Anzorovich, Trainee Researcher of the Laboratory “Intellectual Habitats”, 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;
atalikov10@gmail.com
Kankulov Sultan Akhmedovich, Trainee Researcher of the Laboratory “Intellectual Habitats”, 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;
skankulov@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2996-7376
Enes Akhmed Zulfikar, Junior Researcher of the Laboratory “Computational Linguistics”, 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;
ahmedenes@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3633-4910

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.8 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-226-234
EDN: RNODMY

Имитационная модель нейрокогнитивной системы управления автономным программным агентом, выполняющим кооперативное поведение с целью автоматического пополнения онтологий*

З. В. Нагоев[1], И. А. Пшенокова[2], О. В. Нагоева[2], М. И. Анчёков[1], А. З. Энес[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. Разработан контур системы управления интеллектуального агента, обеспечивающий формирование семантических онтологий системы «агент – среда», объединяющих на основе межнейронных ассоциаций функциональные репрезентации текущих наблюдаемых состояний агента и высказываний контрагентов по коммуникативному окружению. На основе алгоритма онтонейроморфогенеза происходит рост аксо-дендрональных связей, который направлен на отражение причинно-следственных отношений между событиями, описывающими контекст ситуации, событиями, описывающими предмет высказывания, и событием, описывающим само высказывание. По результатам экспериментов имитационной модели был сделан вывод, что мультиагентный алгоритм автономного синтеза функциональных систем семантических онтологий на основе роста и развития нейрокогнитивных архитектур может быть применен для любой предметной области.

Ключевые слова: системы управления, интеллектуальный агент, мультиагентная система, когнитивные архитектуры

Поступила 23.11.2023, одобрена после рецензирования 05.12.2023, принята к публикации 09.12.2023

Для цитирования. Нагоев З. В., Пшенокова И. А., Нагоева О. В., Анчёков М. И., Энес А. З. Имитационная модель нейрокогнитивной системы управления автономным программным агентом, выполняющим кооперативное поведение с целью автоматического пополнения онтологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 226–234. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-226-234

MSC: 68T42 Review article

Simulation model of a neurocognitive control system for an autonomous software agent performing cooperative behavior to automatically replenish ontologies*

Z.V. Nagoev[1], I.A. Pshenokova[2], O.V. Nagoeva[2], M.I. Anchekov[1], A. Z. Enes[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., Пшенокова И. А., Нагоева О. В., Анчёков М. И., Энес А. З., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-19-00787).

* The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22-19-00787).

Abstract. A circuit of the control system of an intelligent agent has been developed, which ensures the formation of semantic ontologies of the "agent – environment" system, combining on the basis of interneuron associations functional representations of the current observed states of the agent and statements of counterparties in the communicative environment. Based on the ontoneuromorphogenesis algorithm, axo-dendronal connections grow, which is aimed at reflecting the cause-and-effect relationships between events that describe the context of the situation, events that describe the subject of the statement, and the event that describes the statement itself. According to the results of experiments of the simulation model it was concluded that the multi-agent algorithm for the autonomous synthesis of functional systems of semantic ontologies based on the growth and development of neurocognitive architectures can be applied to any subject area.

Keywords: control systems, intelligent agent, multi-agent system, cognitive architectures

Submitted 23.11.2023, approved after reviewing 05.12.2023, accepted for publication 09.12.2023

For citation. Nagoev Z.V., Pshenokova I.A., Nagoeva O.V., Anchekov M.I., Enes A. Z. Simulation model of a neurocognitive control system for an autonomous software agent performing cooperative behavior to automatically replenish ontologies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 226–234. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-226-234

1. Введение

Онтологии используются в качестве модели для хранения и семантического представления знаний некоторой предметной области [1]. Показателями качественной онтологии являются память, динамичность, лексическая полисемия и автоматизация [2]. Большинство онтологий генерируются вручную экспертами предметной области и специалистами по онтологическому моделированию [3], что требует больших затрат и времени. Поэтому весьма актуальной является задача автоматического генерирования и пополнения онтологий. Цель автоматического пополнения заключается в преобразовании новых знаний в онтологическую форму, применяя для этого методы семантического поиска и извлечения знаний [4, 5]. Большая часть существующих на сегодняшний день систем автоматического пополнения онтологий преобразуют строго структурированные знания в онтологические форматы. Системы, преобразующие неструктурированные знания, еще не до конца разработаны. Кроме того, существующие подходы специфичны для определенной предметной области и требуют ручного вмешательства со стороны экспертов в этой области.

В построении онтологий широко используются методы, основанные на правилах. Эти подходы требуют создания наборов правил или шаблонов для представления знаний, что делает их узкими по объему и зависимыми от предметной области [6].

В [7] предлагается метод метаонтологий в интеллектуальном анализе текстовых ресурсов, учитывающий нечеткость и размытость изображений единиц естественного языка. Использование метаонтологии позволяет организовать поиск информации в большом количестве распределенных гетерогенных хранилищ данных и решать проблему синонимии и неоднозначности семантики объектов.

В [8] разрабатывается независимое от предметной области автоматическое создание онтологии из неструктурированного текстового потока путем генерирования графа знаний. Такая структура позволяет конвертировать новые знания в последовательную онтологическую форму.

В [9] представлено автоматическое пополнение онтологии из обычного текста с использованием предопределенных словарей и методов обработки естественного языка. Однако этот подход имеет медицинскую направленность и довольно затратный для создания моделей и поддержания обширных словарей.

Медицинское направление также представлено в работе [10]. В ней разработана система генерации онтологии болезни Альцгеймера. Для построения онтологии на основе системы Text2Onto путем сочетания подходов машинного обучения с тегами части речи использовался контролируемый словарь вместе со связанными словами. Однако для развития такой системы также необходимо участие экспертов предметной области.

В [11] представлена эволюционная модель на основе онтологий для реагирования на изменения в динамических средах. Она анализирует разнородные слабоструктурированные входные данные, используя изученную онтологию для расширения исходной модели. С помощью такого подхода к обучению онтологий автоматически развивается и пополняется первоначальная модель. Такой подход позволил получить более релевантную картину онтологической модели с учетом изменений окружающей среды без участия экспертов во время выполнения.

Большая часть представленных выше подходов автоматического пополнения онтологий из неструктурированного потока данных являются предметно-ориентированными.

Цель настоящей работы – разработать контур системы управления интеллектуального агента, обеспечивающий автоматическое формирование семантических онтологий системы «агент – среда» независимо от предметной области.

Задача исследования – разработать имитационную модель нейрокогнитивной системы управления автономного программного агента, выполняющего кооперативное поведение с целью автоматического пополнения онтологий.

2. Модели семантики на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур

В работе для формализации семантики «агент – среда» предлагается использовать модели на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур [12]. *Научная новизна* представленного исследования состоит в том, что для автоматического пополнения онтологий, описывающих отношения «агент – среда», применяются мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры, которые формируются в процессе ознакомления интеллектуального агента с составом и свойствами окружающих его объектов. Интерактивное формирование пространственных онтологий автономного робота на основе нейрокогнитивных моделей семантики представлено в работах [13, 14].

Система управления автономными программными агентами представляет собой мультиагентную нейрокогнитивную архитектуру, состоящую из взаимодействующих агентов-нейронов (агнейронов), которые объединены в составе инварианта организационной структуры принятия решений [15]. Инвариант состоит из обязательных блоков (рис. 1) распознавания состояний, идентификации и оценки проблемных ситуаций, синтеза целевых состояний, планирования и управления. Взаимодействие с пользователями программным агентом происходит через систему сенсоров и эффекторов.

Интеллектуальный агент имеет базовую архитектуру (рис. 1), которая развивается в процессе его взаимодействия с другими агентами, пользователями или оператором. Автономное пополнение онтологий, выполняющееся на основе развития мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, обеспечивает корректную работу подсистемы понимания речи при постановке задач и синтез поведения, направленный на решение этих задач. При выполнении кооперативного поведения в составе человеко-машинного коллектива очень важно, чтобы в процессе коммуникации агенты оперировали одними и теми же терминами и однозначно их воспринимали.

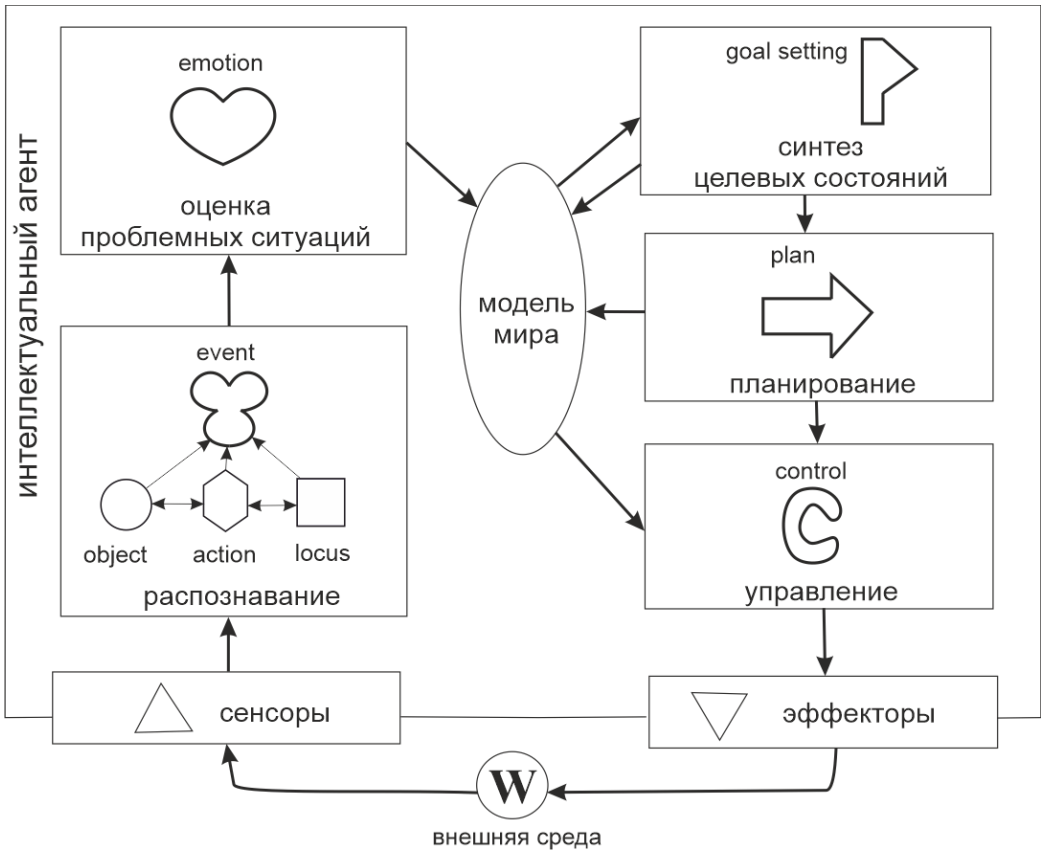


Рис. 1. *Базовая архитектура интеллектуального агента*

Fig. 1. *Basic architecture of an intelligent agent*

Рассмотрим контур системы управления интеллектуального агента, обеспечивающий формирование семантических онтологий системы «интеллектуальный агент – среда», объединяющих на основе межнейронных ассоциаций функциональные репрезентации текущих наблюдаемых состояний агента и высказываний контрагентов по коммуникативному окружению.

На рисунке 2 представлена мультиагентная архитектура системы управления интеллектуальным агентом, который взаимодействует с контрагентом (пользователем) для идентификации событий, наблюдаемых во внешнем мире.

Для восприятия пользователя и объектов во внешнем мире автономный агент, установленный на роботе, использует входной поток данных с видеокамеры. Система распознавания формирует мультиагентные факты (на рисунке представлены событийными агнейронами, которые обозначаются трилистниками с закругленными лепестками), описывающие действия (на рисунке представлены агнейронами действий и обозначены шестиугольниками), объекты (на рисунке представлены объектными и абстрактными агнейронами и изображены кругами), свойства и состояния робота (на рисунке обозначены черным цветом), пользователя (обозначены синим цветом) и объекта (обозначены коричневым). После идентификации событий происходит их оценка (на рисунке представлены агнейронами эмоциональной оценки и обозначены сердечками), в соответствии с которой ставится цель (на рисунке обозначена остроконечным флажком) и синтезируется действие (обозначено широкой наклоненной стрелкой), которое необходимо выполнить для ее достижения.

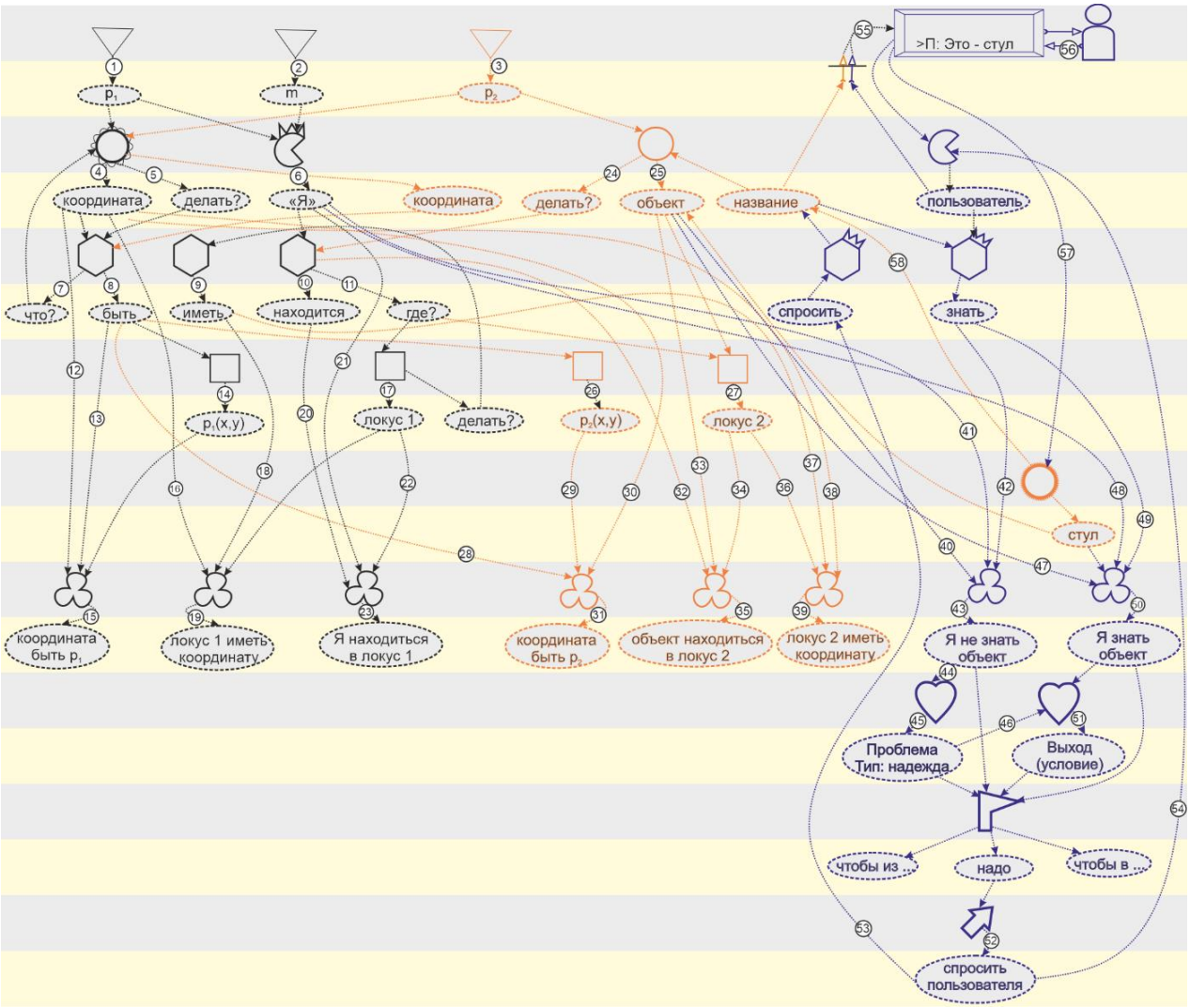


Рис. 2. *Мультиагентная архитектура системы управления интеллектуального агента для идентификации нескольких событий*

Fig. 2. *Multi-agent architecture of the intelligent agent control system for identifying several events*

Диалоговое взаимодействие интеллектуального агента с пользователем находит отражение в нескольких событиях, регистрируемых мультиагентной нейрокогнитивной архитектурой: «Объект находится в локус 2», «Я не знать объект». После оценки выявленных фактов идентифицируется проблема, которую необходимо решить. Для этого информация передается на вход агнейрону целеполагания, который определяет целевое значение в графе проблемной ситуации в виде состояния в будущем. После того, как определена цель «Я знать объект», агнейрон целеполагания дает команду (посылает соответствующее сообщение) агнейрону управления действием, который формирует действие «Спросить пользователя». В нейрокогнитивной архитектуре строится мультиагентный факт «Название объекта – стул». Автономный агент считывает это сообщение и строит функциональную репрезентацию слова и концепта «стул».

В результате в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре формируется система функциональных репрезентаций событий, действий и причинно-следственных связей между ними, отражающая опыт взаимодействия интеллектуального агента со средой, в которую он погружен.

Имитационная модель системы управления интеллектуального агента, представленной на рисунке 2, была построена в разрабатываемой авторами автоматизированной среде проектирования мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. На рисунке 3 представлено трехмерное изображение некоторой части этой архитектуры, построенное подсистемой графической визуализации используемого программного комплекса.

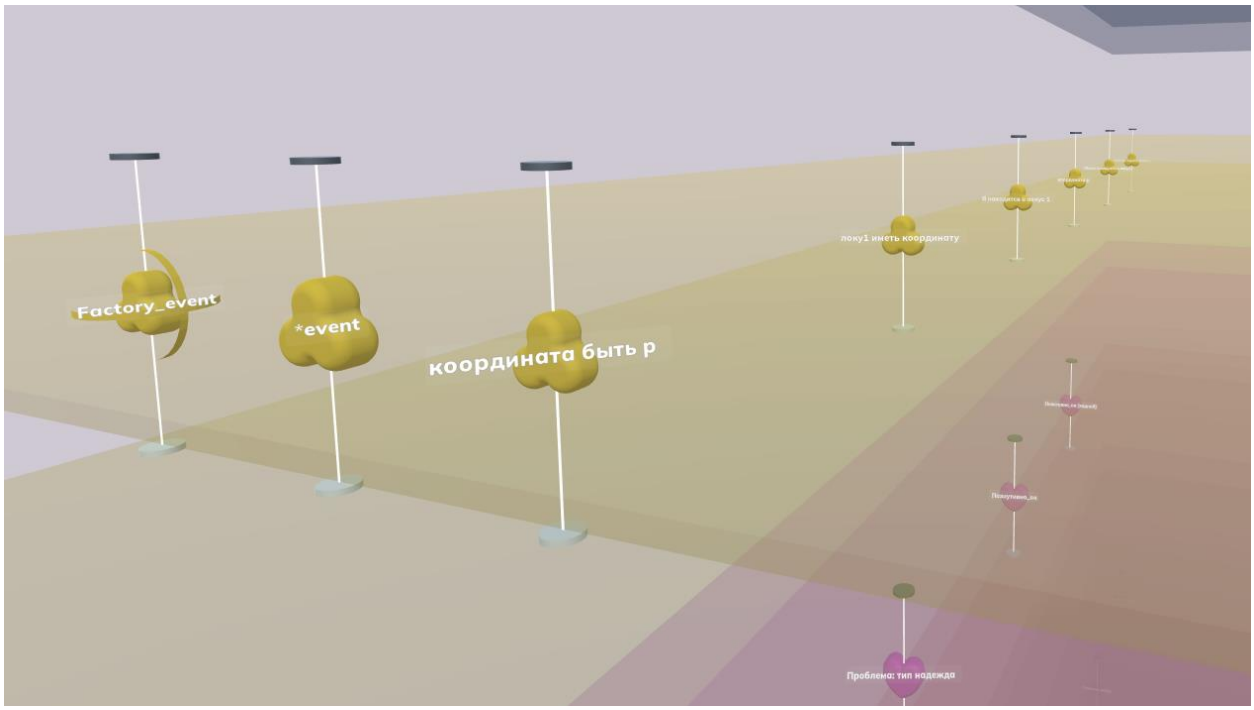


Рис. 3. *Часть управляющей нейрокогнитивной архитектуры для идентификации нескольких событий в окне визуализации программы*

Fig. 3. *Part of the control neurocognitive architecture for identifying several events in the program visualization window*

С целью исследования возможности по интерактивному обучению интеллектуального агента, основанного на мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре, автономному синтезу функциональных систем семантических онтологий был проведен эксперимент. Сначала интеллектуальный агент с помощью сенсоров и подсистемы распознавания выполнял идентификацию всех объектов, их свойств и локаций, отдельно выделяя уже знакомые ему и пока еще не знакомые. В отношении знакомых объектов интеллектуальный агент строил варианты событий с их участием. Если степень значимости этих событий для решения задачи максимизации своей целевой функции в текущем контексте невысокая, то он приступал к ознакомлению (осознанию) новых, незнакомых ему объектов. В результате формировались новые ассоциативные связи между группами агнейронов, которые выполняли функциональную репрезентацию наблюдаемых агентом объектов, их свойств и отношений. Далее на основе алгоритма онтонейроморфогенеза [16] формировались связи, направленные на отражение причинно-следственных отношений между событиями, описывающими контекст ситуации, событиями, описывающими предмет высказывания, и событием, описывающим само высказывание. Сформированные таким образом связи привели к построению функциональных систем семантической онтологии системы «агент – среда». Таким образом, система «интеллектуальный агент – среда» получает дополнительное расширенное представительство в комплексе концептуальных представлений,

обеспечиваемых агнейронами мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, на основе наблюдения любого фрагмента этой системы. По результатам экспериментов имитационной модели был сделан вывод, что мультиагентный алгоритм автономного синтеза функциональных систем семантических онтологий на основе роста и развития нейрокогнитивных архитектур может быть применен для любой предметной области.

3. Заключение

Представлена имитационная модель нейрокогнитивной системы управления автономного программного агента, выполняющего кооперативное поведение с целью автоматического пополнения онтологий независимо от предметной области.

Разработан контур системы управления интеллектуального агента, обеспечивающий формирование семантических онтологий системы «агент – среда», объединяющих на основе межнейронных ассоциаций функциональные репрезентации текущих наблюдаемых состояний агента и высказываний контрагентов по коммуникативному окружению. Кооперативное поведение агентов в составе человеко-машинного коллектива направлено на построение функциональных систем семантических онтологий. Пополнение онтологий выполняется за счет формирования в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре интеллектуального агента связей, которые направлены на отражение причинно-следственных отношений между событиями, описывающими контекст ситуации, событиями, описывающими предмет высказывания, и событием, описывающим само высказывание.

REFERENCES

1. Lan M., Xu J. Ontology feature extraction via vector learning algorithm and applied to similarity measuring and ontology mapping. *IAENG International Journal of Computer Science*. 2016. Vol. 43(1). Pp. 10–19.

2. Somodevilla M., Ayala D., Pineda I. An overview on ontology learning tasks. *Comput. Sist.* 2018. Vol. 22(1). Pp. 137–146.

3. Alobaidi M., Malik K.M. Linked open data-based framework for automatic biomedical ontology generation. *BMC bioinformatics*. 2018. Vol. 19(1). Pp. 3–19.

4. Asim M.N. et al. A survey of ontology learning techniques and applications. *Database*. 2018. Vol. 2018. P. 101.

5. Ma Z., Cheng H. et al. Automatic Construction of OWL Ontologies From Petri Nets. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*. 2019. Vol. 15(1). Pp. 21–51.

6. Maynard D., Funk A., Peters W. Using lexico-syntactic ontology design patterns for ontology creation and population. *Proc. of the Workshop on Ontology Patterns.* 2009. Vol. 516. Pp. 39–52.

7. Dzyubanenko A.A., Rabin A.V. Application of the method of metaontologies in the intellectual analysis of text resources considering the fuzziness and blurring of images of natural language units. *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2647. https://doi.org/10.1063/5.0124340

8. Elnagar S., Yoon V., Thomas M. A. An automatic ontology generation framework with an organizational perspective. arXiv:2201.05910. 2022.

9. Kumar N., Kumar M., Singh M. Automated ontology generation from a plain text using statistical and NLP techniques. *International Journal of System Assurance Engineering and Management.* 2016. Vol. 7. Pp. 282–293.

10. Cahyani D.E., Wasito I. Automatic ontology construction using text corpora and ontology design patterns (ODPs) in Alzheimer's disease. *J. Ilmu Komputer dan Informasi*. 2017. Vol. 10(2). Pp. 59–66.

11. Jabla R., Khemaja M., Buendia F., Faiz S. Automatic Ontology-Based Model Evolution for Learning Changes in Dynamic Environments. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(22). P. 10770. https://doi.org/10.3390/app112210770

12. *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* [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p. (In Russian)

13. Nagoev Z., Nagoeva O., Gurtueva I. Multi-agent neurocognitive models of semantics of spatial localization of events. *Cognitive Systems Research.* 2020. Vol. 59. Pp. 91–102.

14. *Бжихатлов К. Ч., Канкулов С. А., Малышев Д. А. и др.* Интерактивное формирование пространственных онтологий автономного робота на основе нейрокогнитивных моделей семантики // Материалы XVI всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону, 2021. С. 147–154.

Bzhikhatlov K.Ch., Kankulov S.A., Malyshev D.A. et al. Interactive formation of spatial ontologies of an autonomous robot based on neurocognitive models of semantics. *Materialy XVI vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii i XII molodezhnoj shkoly-seminara «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference and the XII Youth School-Seminar “Advanced Systems and Management Problems”]. Rostov-na-Dony, 2021. Pp. 147–154. (In Russian)

15. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures. *Cognitive Systems Research*. 2021. Vol. 66. Pp. 82–88.

16. *Нагоев З. В.* Мультиагентные экзистенциальные отображения и функции // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 4(54). С. 63–71.

Nagoev Z.V. Multi-agent existential mappings and functions. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2013. No. 4(54). Pp. 63–71. (In Russian)

Информация об авторах

Нагоев Залимхан Вячеславович, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

zaliman@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9549-1823

Пшенокова Инна Ауесовна, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. «Интеллектуальные среды обитания», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3394-7682

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

Анчёков Мурат Инусович, науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X

Энес Ахмед Зюлфикар, мл. науч. сотр. лаборатории «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

ahmedenes@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3633-4910

Information about the authors

Nagoev Zalimkhan Vyacheslavovich, Candidate of Technical 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

Pshenokova Inna Auesovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory "Intelligent Living Environments", 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;

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3394-7682

Nagoeva Olga Vladimirovna, Researcher of the Department "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

Anchekov Murat Inusovich, Researcher of the Laboratory "Molecular Selection and Biotechnology", Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8977-797X

Enes Ahmed Zulfikar, Junior Researcher of the Laboratory "Computational Linguistics", 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;

ahmedenes@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3633-4910

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.056.5, 004.8 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-235-246
EDN: SPQSZQ

Модель интеллектуального распределения трафика в кластерных сегментах теплотехнологических систем*

Б. В. Окунев[1], Е. К. Верейкина[2], А. И. Лазарев[1]

[1]Национальный исследовательский университет
Московский энергетический институт – филиал в г. Смоленске
214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1
[2]Национальный исследовательский университет
Московский энергетический институт
111250, Россия, Москва, Красноказарменная улица, 17

Аннотация. В настоящее время принятие решений по управлению теплотехнологическими системами является достаточно сложным процессом. Непосредственное расширение параметров и взаимосвязанных элементов между участниками существенно сказывается на масштабировании систем оценки и контроля потоков информации. Несмотря на достаточно стремительное развитие информационно-коммуникационных технологий, существующие инструменты организации инфраструктурной поддержки процессов взаимодействия между клиентом и сервером все еще имеют существенные недостатки. Несовершенство таких решений не только сдерживает возможности роста их эффективности, но и является уязвимостью с точки зрения безопасности функционирования системы в целом. Целью исследования является алгоритмическая и программная разработка гибкой топологии сегментов сети с учетом динамически изменяющихся факторов. В результате проведен анализ существующих решений построения модульных сетевых протоколов для организации функционирования сложных систем. Выявлены их сильные стороны, уязвимости и потенциальные источники роста эффективности, на развитие и устранение которых направлено разработанное решение. Построена модель безопасной сети удаленного взаимодействия и обмена критически важной информацией для обеспечения стабильной работы сложно-технического оборудования в теплотехнологической системе. Особенностью разработанной модели является модуль безопасного доступа к требуемой информации за счет прямого *p2p* обмена между клиентами при помощи безопасного туннеля. Практическая значимость заключается в возможности использования разработанной модели интеллектуального распределения трафика в сегментах сети теплотехнологических систем различных видов экономической деятельности.

Ключевые слова: TCP/IP топологии, обеспечение безопасности данных, управление данными, нейронные модели, теплотехнологические комплексы

Поступила 03.11.2023, одобрена после рецензирования 09.11.2023, принята к публикации 13.11.2023

Для цитирования. Окунев Б. В., Верейкина Е. К., Лазарев А. И. Модель интеллектуального распределения трафика в кластерных сегментах теплотехнологических систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 235–246. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-235-246

© Окунев Б. В., Верейкина Е. К., Лазарев А. И., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-21-00487)

MSC: 68; 94 Original article

Intelligent traffic distribution model in cluster segments of heat technology systems*

B.V. Okunev[1], E.K. Vereykina[2], A.I. Lazarev[1]

[1]National Research University
Moscow Energy Institute – branch in Smolensk
214013, Russia, Smolensk, 1 Energeticheskiy proezd
[2]National Research University
Moscow Energy Institute
111250, Russia, Moscow, 17 Krasnokazarmennaya street

Abstract. Nowadays decision-making on the management of heat technology systems is a rather complex process. The parameters direct expansion and interrelated elements among participants significantly affects the scaling of information flow assessment and control systems. Despite the rather rapid information and communication technologies development, the existing tools for organizing infrastructure support for the processes of interaction between the client and the server still have significant drawbacks. The imperfection of such solutions not only hinders the increasing of their effectiveness possibility, but also are vulnerabilities from the point of the security system functioning view as a whole. The purpose of the study is algorithmic and software develop of network segments flexible topology taking into account dynamically changing factors. As a result, an analysis of existing solutions for the construction of modular network protocols for the organization of the functioning of complex systems is carried out. Their advantages, vulnerabilities and potential sources of efficiency growth have been identified, which the proposed solution is aimed at their improvement and elimination. A model of a secure network of remote interaction and exchange of critical information is built to ensure stable operation of complex technical equipment in a heat technology system. A special feature of the developed model is the module of secure access to the required information due to direct *p2p* exchange between clients using a secure tunnel. The practical significance lies in the possibility of using the developed model of intelligent traffic distribution in the network segments of heat technology systems of various types of economic activity.

Keywords: TCP/IP topologies, data security, data management, neural models, thermal technology complexes

Submitted 03.11.2023, approved after reviewing 09.11.2023, accepted for publication 13.11.2023

For citation. Okunev B.V., Vereykina E.K., Lazarev A.I. Intelligent traffic distribution model in cluster segments of heat technology systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 235–246. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-235-246

Введение

Усложнение теплотехнологических систем, связанное с увеличением числа вовлекаемых участников, их параметров и элементов, требующих оценки и контроля, а также кратный рост в связи с этим потоков информации и связей различного рода делают принятие решений по управлению ими в настоящее время достаточно сложным. Кроме того, отмечаемый курс на реализацию программ по импортозамещению, определяющий необходимость высокотехнологичных и немедленных производственных решений, обусловливает его актуальность. Поэтому системы мониторинга реализации производственных и бизнес-процессов, прежде всего в сфере использования возможностей тепловой энергии, выходят на первый план. Так как особенно сейчас инновационные решения по созданию

* The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-21-00487)

аналогов и рост эффективности в них являются неотъемлемой основой развития. Вместе с тем сложности, а зачастую практически невозможность влияния на факторы внешней среды, достоверно их оценивать и прогнозировать в связи с высоким динамизмом, изменчивостью и слабой предсказуемостью побуждают предприятия и организации искать источники повышения эффективности в рамках внутренних границ системы.

Несмотря на достаточно стремительное развитие информационно-коммуникационных технологий сейчас и их активное использование как средств коммуникаций, обмена, мониторинга и оценки, некоторые из существующих инструментов организации инфраструктурной поддержки процессов взаимодействия между клиентом и сервером все еще имеют существенные недостатки, которые не только сдерживают возможности роста их эффективности, но и являются уязвимостями с точки зрения безопасности функционирования системы в целом. Для теплотехнологических систем этот аспект является критически важным.

Для устранения данных недостатков было предложено разработать уникальную систему первичной инициализации безопасного соединения между отдельными клиентами теплотехнологического комплекса, а также обеспечить поддержку безопасности работы через виртуальный туннель. При реализации такой модели предлагается использовать универсальную топологию *IP*-сегментации устройств и прогнозное определение нагрузок трафика клиентов для поддержки безопасного обмена данными. Одной из главных особенностей разработанного решения является интеллектуальный выбор метода передачи с поддержкой *p2p*-соединения с клиентами, что позволит в дальнейшем расширять область его применения в узкоспециализированных сетевых топологиях, в том числе на промышленных установках для поддержки работы критически важной инфраструктуры.

Анализ существующих решений построения модульных сетевых протоколов для организации функционирования сложных систем

Обмен информацией между субсистемами сложных теплотехнологических комплексов может осуществляться как в рамках взаимодействия с сервером, так и через технологии *peer-to-peer (p2p)* передачи данных между клиентами [1]. Для автоматизации обмена информацией используются различные программно-аппаратные средства, включая протоколы передачи данных и удаленный доступ к комплексам через *VPN*-туннель. Однако эти инструменты не всегда удовлетворяют требованиям безопасности, особенно когда речь идет о передаче критически важных данных. Несанкционированное изменение таких данных может привести к серьезным проблемам на производстве.

На данный момент распространенной топологией взаимодействия между организациями является *TCP/IP* топология, основанная на типизированной работе серверного оборудования с наличием *DHCP*-сервера для назначения адресов клиентам. Однако ее нельзя интегрировать в теплотехнологические комплексы из-за ряда недостатков, среди которых можно выделить сложность отслеживания трафика клиентов с привязкой к реальному идентификатору. Кроме того, стандартизированный *DHCP*-сервер имеет относительно сложную систему назначения прав сервера клиентам для поддержки гибкой кластеризации данных. *DHCP*-сервер поддерживает статичное назначение адресов клиентам сети. Однако для организаций с частичным/полным аутсорсингом сотрудников использование статичного пула IP-адресов не является целесообразным.

Рассматривая *TCP/IP* технологию, можно отметить, что ее многогранное ветвление поддерживает работу в беспроводном режиме *WiFi* 4/5/6 на большинстве портативных

устройств. В среднечисленных масштабах организации часто используется топология, состоящая из роутера с наличием усилителей в удаленных дислокациях сетевых розеток [2]. Однако на сегодняшний день более адаптивная реализация такой топологии возможна благодаря использованию *mesh*-сетей. Эти сети позволяют в беспроводном режиме создавать сегмент сети, ограниченный лишь радиусом действия *mesh*-клиентов [3].

Mesh-системы представляют собой инновационную децентрализованную сеть, где каждое устройство имеет одинаковые права на доступ в интернет, функционируя как клиент и сервер одновременно. Такая топология является универсальным способом распределения интернет-доступа для различных устройств, включая *IoT*-оборудование [4]. Кроме того, использование *mesh*-системы обеспечивает возможность сегментации сети на отдельные участки с выделенным пулом *IP*-адресов [5]. Также необходимо отметить отсутствие необходимости в использовании дополнительного специализированного аппаратного оборудования для сети данного вида.

После настройки соединения и создания нескольких сегментов сети важным шагом в обеспечении стабильной передачи данных между участниками теплотехнических систем является этап оптимизации нагрузки трафика. Существующие программные решения для повышения эффективности в данной области, такие как технология *IntelliQoS* от *Keenetic*, позволяют определять приоритетность для распределения трафика с помощью классификации сервисов (например, голосовых вызовов, интернета вещей). Другое технологическое решение – *Quality of Service (QoS)* – используется в устройствах *Cisco*. *QoS* использует систему запросов и ответов для выбора полосы пропускания трафика [6–8]. Хотя эти инструменты могут решить проблему неравномерного распределения трафика, сетевое оборудование должно иметь приоритет перед другими устройствами или быть центральным устройством в топологии. В других случаях, когда управление устройствами в различных сегментах сети осуществляется с помощью различного сетевого оборудования, проблема централизованного распределения трафика остается актуальной.

Разработанная интеллектуальная модель взаимодействия участников сложных теплотехнологических систем в виде многоуровневой структуры сети

Разработанная гибкая система взаимоотношений при инициализации туннеля между клиентами теплотехнологического комплекса показана на рисунке 1. Каждый клиент такой сети в различные периоды времени и в зависимости от решаемых задач может выступать сервером для другого сегмента сети клиентов. Ее структура базируется на использовании *mesh*-топологии, которая даст возможность реализовать такую же гибкость, как при наличии специализированных аппаратных устройств, но без его реального использования.

На первоначальном этапе назначения адресов планируется инициализация *DHCP*-сервера на базе пакета *isc-dhcp-server* с использованием технологии выделения виртуальных мешей [9, 10]. Субмодуль первичного объединения устройств выполняет лимитирование доступного сегмента, что приводит к выделению нового меша для сегмента устройств. Таким образом, первоначальный меш из двух устройств контролирует сервер ID_0, а ID_1 – клиент. В новом меше клиент ID_1 становится сервером для меша № 1. В данном случае для принятия решений используются два модуля, а именно: процесс нечеткого посимвольного сравнения и изменчивость потока данных. Процесс нечеткого посимвольного сравнения в данном случае работает как цифровой идентификатор, который используется для проверки подлинности устройства. Этот подход позволяет использовать только один программный модуль и минимизировать использование аппаратных ресурсов устройств в сети.

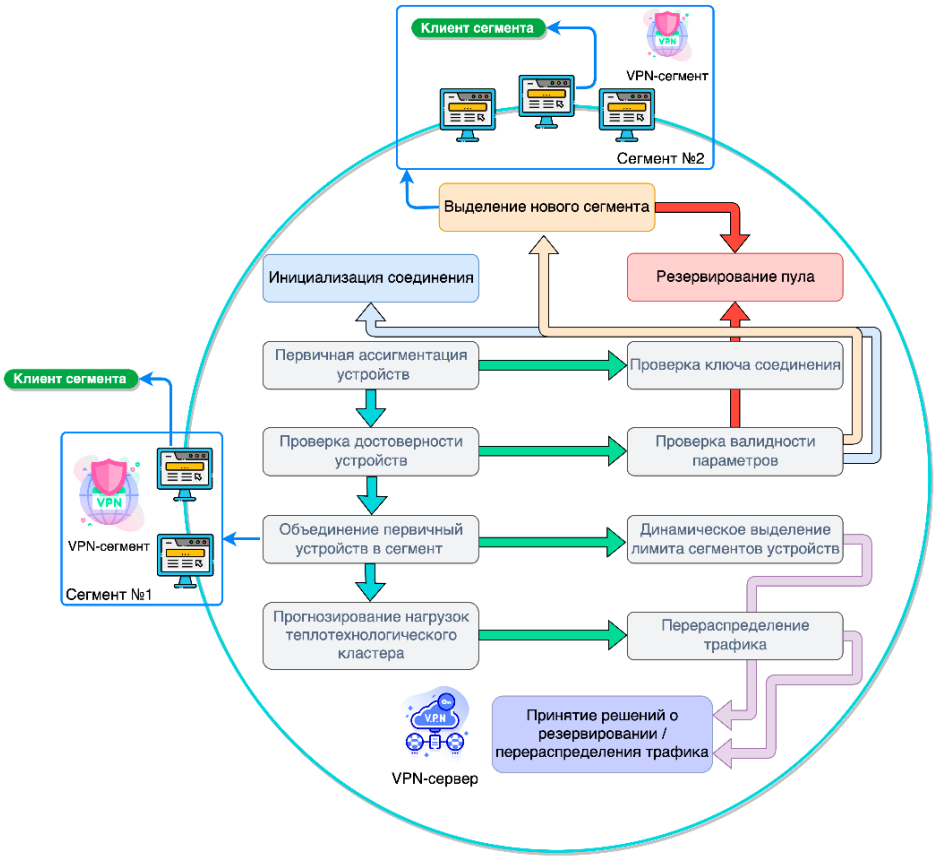


Рис. 1. *Алгоритм меш-инициализации виртуальной топологии VPN-туннелирования*

Fig. 1. *Algorithm for mesh initialization of virtual VPN tunneling topology*

На этапе идентификации первичных параметров асигментации устройств устанавливаются два автономных агента, которые работают как сервер и клиент для поиска совместимых элементов меша. Для первоначального назначения устройств используется модуль генерации уникального временного *TOTP-AUTH* кода, который использует статический идентификатор аппаратной составляющей устройства и системное время с последующим кодированием в бинарную последовательность (1). В качестве зависимой аппаратной составляющей используется системное смещение процессора с добавлением сокета процессора по следующему листингу:

id = “$(cat /proc/cpuinfo | grep 'model name' | uniq)”
auth = ”date +%s”
stamp = “$(echo -n “$id$auth” | xxd)”

$$TOTP = \left[\frac{T_1 - T_0}{T}\right] \cdot X, \quad (1)$$

где *TOTP* – временной код авторизации на сервере;

T_1 – текущее время, синхронизированное с онлайн-сервисами;

T_0 – начало времени по UTC (команда – *date +%s*);

X – время действия текущего отпечатка.

После того как устройства были первоначально идентифицированы, происходит проверка параметров их соединения по защищенному протоколу. Данный процесс проиллюстрирован на рисунке 2.

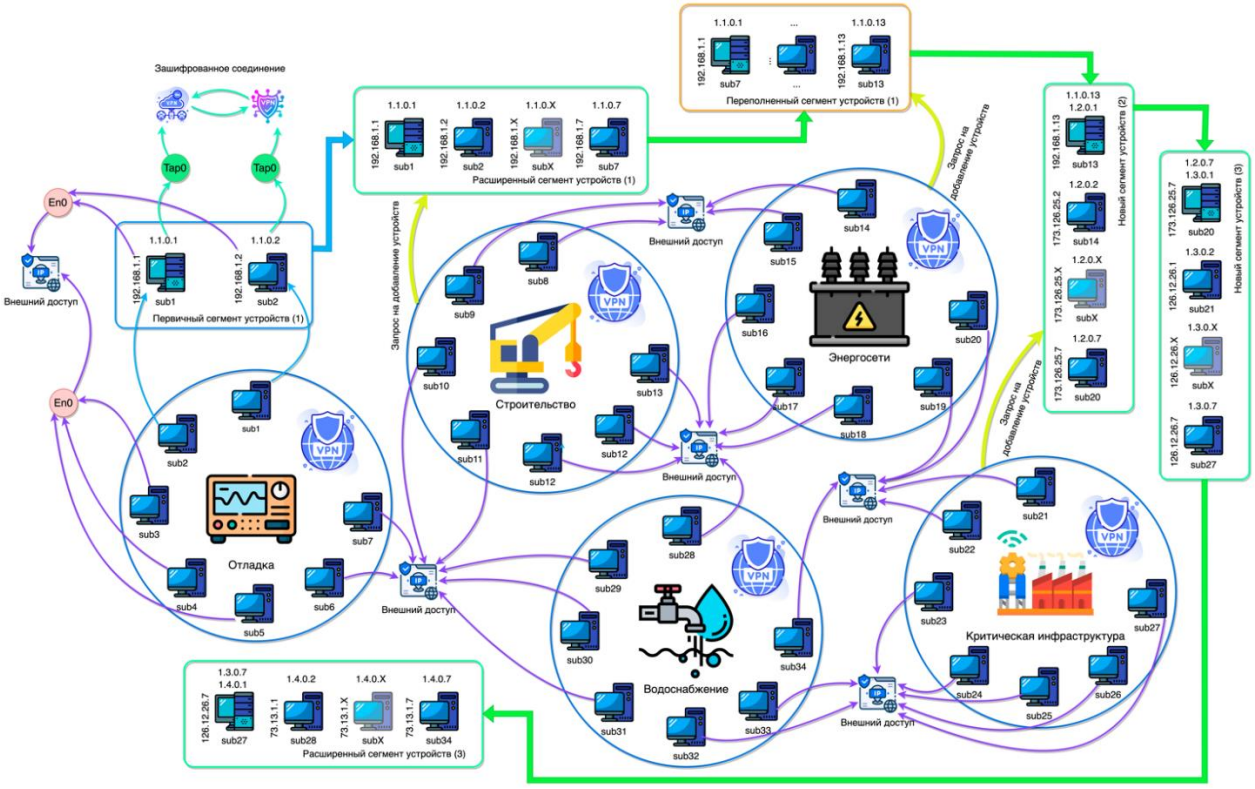


Рис. 2. *Типовая структура маршрутизации сегментов теплотехнологических сетей*

Fig. 2. *Typical structure of routing segments of thermal technology networks*

Согласно представленной топологии устройства, находящиеся в выделенных сегментах, обладают характеристиками, такими как *MAC*-адрес, *IP*-адрес, смещение *SoC*, а также максимальная и минимальная частота процессора (ГГц). Перечисленные характеристики, за исключением динамической частоты процессора, являются статичными и могут быть использованы для конфигурации ключей клиента/сервера *VPN*-соединения на последующих этапах. Для инициализации туннеля в рамках *OpenVPN (OVPN)* используются определенные параметры, перечисленные ниже:

- пул выделяемых адресов для меша – данный параметр определяет наличие массива или стартового *IPv4*-адреса для назначения клиентам сегмента сети;
- ограничения для резервирования – данный параметр предоставляет возможность задать ограниченное количество подключаемых устройств;
- открытый/закрытый ключ сервера – уникальная последовательность, генерируемая в форме *RSA*-ключа, используется для авторизации клиентов;
- авторизация по паролю – этот параметр является опциональным и позволяет использовать единый сертификат клиентов для авторизации по связке логин/пароль.

Для реализации *VPN*-топологии предполагается использовать параметры с динамическим счетчиком для пула адресов, начиная со второй ячейки, и стандартным значением в 10 устройств для ограничения резервирования [11, 12]. В качестве открытого/закрытого ключа сервера предлагается использовать 2054-битное *RSA*-шифрование с авторизацией по связке логин/пароль.

Таким образом, в качестве клиентов динамической системы предполагается использование единого сертификата с динамической системой генерации паролей по *TOTP*-смещению времени.

Для решения проблемы неравномерного распределения трафика предлагается применение собственного модуля распределения нагрузок со стороны клиентских устройств. Этот подход обеспечит возможность контроля трафика внутри сегмента сети со стороны клиента путем принудительного перенаправления запросов клиентов в локальный сетевой интерфейс. В результате этап прогнозирования нагрузок в теплотехнологических системах может быть реализован как отдельный модуль анализа трафика для устройств, которые выступают в роли серверов для *n*-го меша (рис. 3). Данный модуль может быть представлен в виде набора субпроцессов, включающих в себя компоненты, представленные ниже.

- Процесс «Первичное получение устройств сети» осуществляет запрос к серверу *OpenVPN (OVPN)* для получения списка доступных устройств по внутреннему *IP*-адресу, представленному в виде интерфейса *tap0*. Данный процесс является необходимым для определения активных устройств в сегменте.

- Процесс «Сегментация устройств» осуществляет разбивку выделенного пула устройств на несколько подсетей, содержащих от 2 до 10 устройств. Это позволяет точечно перенаправлять трафик в локальный интерфейс *lo* для контроля трафика со стороны клиента.

- Процесс «*Speedtest API*» предназначен для выполнения базовых замеров скорости загрузки и отдачи трафика с внешних серверов, чтобы определить текущую нагрузку сети.

- Процесс «Тестовое отключение устройств» направлен на отключение выбранного массива устройств с последующим выполнением «*Speedtest API*» для замеров нагрузки сети. Данный процесс позволяет провести анализ нагрузки сети при уменьшении количества активных устройств.

- Процесс «Принятия решений» использует результаты нескольких выходных данных *Speedtest API* для аналитического сравнения изменений при тестовых отключениях устройств. Этот подпроцесс позволяет принимать решение о продолжении работы или деаутентификации выбранного устройства в сегменте сети на основании анализа текущей нагрузки сети.

Из рисунка 3 следует, что процесс прогнозирования изменений трафика включает предварительное разбиение устройств на сегменты, содержащие по 2 *IP*-адреса. Это позволяет осуществлять замер текущей скорости загрузки/отдачи трафика с последующим временным перенаправлением каждого из устройств в локальный интерфейс и повторными замерами. После этого записи сохраняются в базе данных. Далее для прогнозирования потребления трафика предлагается использовать обученную *LSTM-XGBoost* модель [13, 14]. Для улучшения точности прогнозирования трафика необходимо использовать комбинированную модель с градиентным бустингом. Эта модель принимает на вход данные о текущем и предыдущих потреблениях трафика для данного пользователя в виде векторов g_i и x_i соответственно, которые вместе представляют входную матрицу X_i [15]. Для инициализации *LSTM*-слоя используется функция активации *PReLU*, после чего выполняется прогнозирование значений в соответствии с формулой 2 [16, 17]. Применение комбинированной модели позволяет учесть внешние факторы, оказывающие влияние на потребление трафика, и повысить точность прогнозирования:

$$\tilde{y}_{t+i} = PReLU(\omega_i \cdot h_i + b_h), \quad (2)$$

где $\tilde{y}_{t+i}$ – функция возврата прогнозных значений; *PReLU* – функция активации Parametric rectified linear unit.

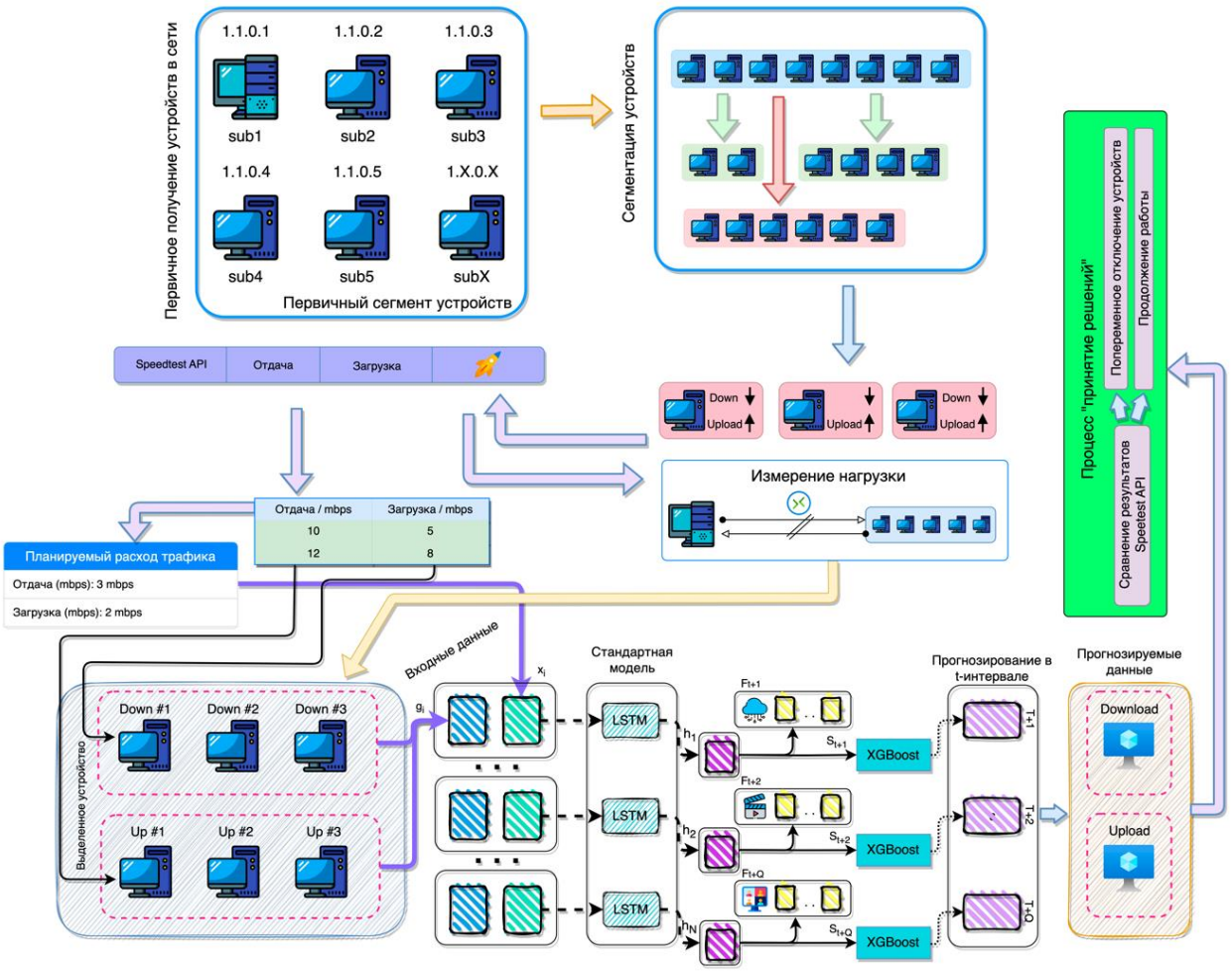


Рис. 3. *Организация процесса прогнозирования трафика при сегментации устройств*

Fig. 3. *Organization of the process of traffic forecasting during device segmentation*

На этапе выхода первичных векторов S_{t+Q} из *LSTM*-модели выполняется прогнозирование значений за счет *XGBoost*-модели в идентичном временном промежутке $\tilde{y}_{t+i}$ с учетом внешних факторов влияния на трафик, обозначенных F_{t+Q} в формуле

$$\hat{y}_{t+i} = \sum_{n=1}^{n} f_n(S_{t+Q}), \quad (3)$$

где $\tilde{y}_{t+i}$ – функция возврата прогнозных значений *XGBoost*; S_{t+Q} – выходные значения векторов из нейронной сети.

Таким образом, на данном этапе процесса прогнозирования трафика осуществляется получение выходных значений из *LSTM*-модели, после чего прогнозы уточняются при помощи градиентного бустинга. Такой подход позволяет получать более точные прогнозы возможной нагрузки на сеть с конкретного устройства, что обеспечивает возможность принятия оптимальных решений по оптимизации работы сегмента сети [18, 19].

Для реализации функции управления и принятия решений по обеспечению оптимальной нагрузки и безопасности предлагается использовать процесс первоначального нечеткого сравнения аутентифицируемой последовательности. Однако выходные данные формулы 1 и «склейки» *ID*-процессора на выходе представляют собой бинарную последовательность вида «00100101010…010101000». По умолчанию *TOTP*-генерация

значения времени обновляет выходную переменную каждую секунду, что может приводить к расхождениям в последовательностях при сравнении значений. Учитывая вышеизложенное, в данной системе применяется модуль нечеткого сравнения на базе библиотеки *FuzzyWuzzy*. Реализация модуля принятия решений основана на Python-модуле, который использует структуру данных *pandas* для первоначального сохранения результатов в файл «**.csv*» для последующей загрузки и сравнения через указанную библиотеку, как представлено на рисунке 4 [20].

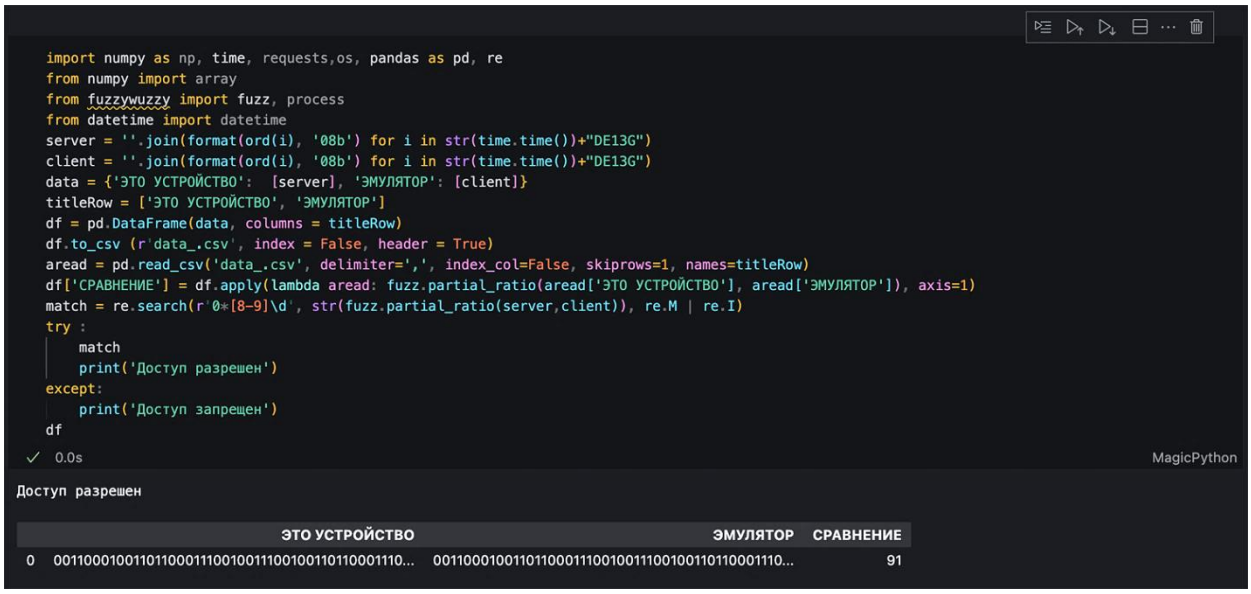


Рис. 4. *Тестирование модуля нечеткого посимвольного сравнения*

Fig. 4. *Testing the fuzzy symbol-by- symbol comparison module*

Процесс сравнения первичного кода включает в себя генерацию уникального временного отпечатка и уникального идентификатора агента. Этот набор данных затем преобразуется в двоичный код и сравнивается с помощью функции *partial math rate*, интегрированной в библиотеке *FuzzyWuzzy*. Результаты сравнения представлены в виде процента совпадения, который может варьироваться в зависимости от параметров настроек. Для установления валидности инициализируемого соединения используется регулярное выражение, которое гарантирует достижение процента совпадения на уровне 80 % и выше. В итоге использование модуля нечеткого сравнения на основе библиотеки *FuzzyWuzzy* позволяет установить достоверность и подлинность аутентифицируемых последовательностей в системе.

Заключение

В данной статье были проанализированы наиболее популярные из существующих решений построения модульных сетевых протоколов для организации функционирования сложных систем. Выявлена актуальная проблема распределения трафика и обеспечения безопасности при взаимодействии в сложных теплотехнологических системах. Предложена модель-топология клиент-серверного взаимодействия таких комплексов, а также отдельная система прогнозирования для принятия решений о доступе клиентов к сегментам сети с помощью реализованного алгоритма верификации доступа. Данное решение было реализовано в виде готового программного продукта. Важной чертой предлагаемого решения является децентрализованный подход взаимообмена на основе *mesh*-топологии, что может быть использовано для реализации полноценных автомати-

зированных платформ управления данными в корпоративных организациях. Реализованная топология благодаря своей многомодульности позволяет первоначально осуществлять соединение между субъектами сети и поддерживать обмен информацией с расширением устройств в сети за счет развертки на клиенте серверной составляющей *VPN*-сервера. Описана возможность отслеживания перегрузок трафика за счет совместного использования *LSTM*-сети с градиентным бустингом и системы прогнозирования. Особое внимание следует уделить реализованному модулю контроля трафика внутри сети. Модуль циклически запрашивает изменения скорости интернет-соединения с внешним сервером и прогнозирует превышения доступного лимита для оптимизации работы теплотехнологической сети. Также важной функциональностью является *ARP*-обработка трафика, которая помогает управлять потоками данных в сети. В целом разработанный программный модуль представляет собой инновационный подход к управлению теплотехнологическими комплексами, который может быть использован в широком спектре корпоративных организаций.

REFERENCES

1. Kensworth S., Saumitra A., Vahid D. et al. On the Design and Implementation of IP-over-P2P Overlay Virtual Private Networks. *IEICE Transactions on Communications.* 2020. Vol. E103.B. No. 1. P. 2–10. DOI: https://doi.org/10.1587/transcom.2019CPI0001

2. Zhang Y., Zhong N., You W. et al. NDFuzz: a non-intrusive coverage-guided fuzzing framework for virtualized network devices. *Cybersecurity.* 2022. No. 5(21). DOI: https://doi.org/10.1186/s42400-022-00120-1

3. Seneviratne P. Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks. New York: Apress, 2019. 320 p.

4. Ahmadi A.E. An Introduction to Wireless Mesh Networks. New York: Scholars' Press. 2022. 68 p.

5. Kim J.-W., Kim J., Lee J. Cross-Layer MAC/Routing Protocol for Reliability Improvement of the Internet of Things. *Sensors.* 2022. Vol. 22(9429). DOI: https://doi.org/10.3390/s22239429

6. *Моисеев В. И.* Экспериментальное исследование структуры пакетного буфера Ethernet коммутатора. *T-Comm.* 2020. № 1. С. 18–24.

Moiseev V.I. *Eksperimental'noe issledovanie struktury paketnogo bufera Ethernet kommutatora* **[**Experimental evaluation of ethernet switch packet buffer structures]. *T-Comm*. 2020. No. 1. Pp. 18–24. (In Russian)

7. *Канаев А. К., Логин Э. В., Гришанов И. С.* Комплексный алгоритм процессов контроля и управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet с применением механизмов OAM // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. Вып. 2. С. 266–275. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-266-275

Kanaev A.K., Login E.V., Grishanov I.S. Complex Algorithm for Control and Management Processes of Carrier Ethernet Telecommunication Network Using OAM Mechanisms. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022. Vol. 19. No. 2. Pp. 266–275. DOI: 10.20295/1815-588X-2022- 2-266-275. (In Russian)

8. *Никишин К. И.* Исследование передачи трафика в программно-конфигурируемой сети с использованием cisco packet tracer // ВГТУ. 2022. № 5. С. 85–90.

Nikishin K.I. Modeling a wireless sensor network using OMNET. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University]. 2022. No. 5. Pp. 85–90. (In Russian)

9. Simla J.A., Chakravarthy R., Leo M.L. An Experimental study of IoT-Based Topologies on MQTT protocol for Agriculture Intrusion Detection. Measurement: Sensors. 2022. Vol. 24. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100470

10. Wang M., Li Y., Lv J., Gao Y., Qiao C., Liu B., Dong W. ACE: A Routing Algorithm Based on Autonomous Channel Scheduling for Bluetooth Mesh Network. *Electronics*. 2022. No. 11(113). DOI: https://doi.org/10.3390/electronics11010113

11. *Андреев С. В., Хлупина А. А.* Оптимизация скорости vpn для удаленной работы с использованием маршрутизаторов с arm-процессорами // Программные продукты и системы. 2020. № 4. С. 605–612.

Andreev S.V., Khlupina A.A. Optimizing speed for VPN providing the possibility of telework using routers powered by ARM CPU. Programmnye produkty i sistemy. *Software & Systems*. 2020. No. 4. Pp. 605–612. (In Russian)

12. *Мартьянов А. В.* Анализ информации о подключениях к сети предприятия удаленных пользователей // Инновационная наука. 2021. № 6. С. 46–48.

Martyanov A.V. Analysis of information about connections to the enterprise network of remote users. *Innovacionnaya nauka* [Innovative science]. 2021. No. 6. Pp. 46–48. (In Russian)

13. Zaenchkovsky A., Kirillova E., Zeman Z. Mathematical foundations intellectually coordination of data for group expert innovative processes evaluation within the framework of scientific and industrial cooperation. Algorithms and solutions based on computer technology. *Lecture Notes in Networks and Systems.* Vol. 387. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-93872-7_9

14. Dai Y., Zhou Q., Leng M. et al. Improving the bi-LSTM model with XGBoost and attention mechanism: A combined approach for short-term power load prediction. Applied Soft Computing. 2022. No. 130. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109632

15. *Борисов В. В., Булыгина О. В., Дли М. И., Козлов П. Ю.* Рубрицирование текстовых документов на основе нечетких отношений различия // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 3. С. 36–45. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-3-36-45

Borisov V.V., Bulygina O.V., Dli M.I., Kozlov P.Yu. Rubrication of text documents based on fuzzy difference relations. *Prikladnaya informatika* [Journal of Applied Informatics]. 2020. Vol. 15. No. 3. Pp. 36–45. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-3-36-45. (In Russian)

16. Pajankar A., Joshi A. Hands-on Machine Learning with Python: Implement Neural Network Solutions with Scikit-learn and PyTorch. New York: Apress, 2022. 356 p.

17. *Чумакова Е. В., Корнеев Д. Г., Гаспариан М. С.* Подход к проектированию нейронной сети для формирования индивидуальной траектории тестирования знаний // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 5. С. 102–115. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-102-115

Chumakova E.V., Korneev D.G., Gasparian M.S. An approach to the design of a neural network for the formation of an individual trajectory of knowledge testing. *Prikladnaya informatika* [Journal of Applied Informatics]. 2022. Vol. 17. No. 5. Pp. 102–115. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-102-115. (In Russian)

18. *Непомнящий О. В.* Метод оценки ресурсов в процессе функционально-потокового высокоуровневого синтеза СБИС // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 3. С. 34–44. DOI: 10.37791/2687- 0649-2022-17-3-34-44

Nepomnyashchiy O.V. Resource estimation method in the process of functional-flow high-level VLSI synthesis. *Prikladnaya informatika* [Journal of Applied Informatics]. 2022. Vol. 17. No. 3. Pp. 34–44. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-34-44. (in Russian)

19. Park M.-H., Chakraborty S., Vuong Q.D. et al. Anomaly detection Babed on time series data of hydraulic accumulator. *Sensors.* 2022. Vol. 22(9428). DOI: https://doi.org/10.3390/s22239428

20. Chen G., Tat T.P. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 328 p.

Информация об авторах

Окунев Борис Васильевич, канд. техн. наук, доцент, преподаватель кафедры информационных технологий в экономике и управлении, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» – филиал в г. Смоленске;

214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1;

ok-bmw@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8740-7855

Верейкина Елизавета Константиновна, аспирант, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»;

111250, Россия, Москва, Красноказарменная улица, 17;

vereikina.ek@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3791-9099

Лазарев Алексей Игоревич, ассистент кафедры информационных технологий в экономике и управлении, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» – филиал в г. Смоленске;

214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1;

anonymous.prodject@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3252-0409

Information about the authors

Okunev Boris Vasilievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Teacher of the Department of Information Technologies in Economics and Management, National Research University “Moscow Energy Institute” – branch in Smolensk;

214013, Russia, Smolensk, 1 Energetichesky proezd;

ok-bmw@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8740-7855

Vereykina Elizaveta Konstantinovna, Graduate student of the National Research University “Moscow Energy Institute”;

111250, Russia, Moscow, 17 Krasnokazarmennaya street;

vereikina.ek@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3791-9099

Lazarev Alexey Igorevich, Assistant of the Department of Information Technologies in Economics and management, National Research University “Moscow Energy Institute” – branch in Smolensk;

214013, Russia, Smolensk, 1 Energetichesky proezd;

anonymous.prodject@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3252-0409

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.896 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-247-263
EDN: SVSRRK

Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий

М. А. Шереужев[1], Ф. В. Девяткин[1], Д. И. Арабаджиев[1], М. А. Шереужев[2, 3]

[1]Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5
[2]Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а
[3]Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В. М. Кокова
360030, Россия, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в

Аннотация. В статье рассмотрен способ моделирования работы системы управления группой роботов. Предложена база знаний системы группового управления, представленная в виде онтологии. Описаны конечные автоматы ведущего и ведомого роботов. Рассмотрен алгоритм назначения задач отдельным роботам и сконфигурированы инструменты моделирования управления движением и распределением задач для обеспечения единой программной среды моделирования группового управления. Рассмотрен венгерский алгоритм в контексте назначения задач отдельным роботам, для оценки путей движения использовался планировщик A* (Astar). Сконфигурированы инструменты моделирования управления движением и распределением задач для обеспечения единой программной среды моделирования группового управления. Полученные результаты применимы в задачах оптимизации взаимодействия многоагентных систем.

Ключевые слова: групповое управление, онтология, робототехническая система, конечный автомат

Поступила 24.11.2023, одобрена после рецензирования 04.12.2023, принята к публикации 08.12.2023

Для цитирования. Шереужев М. А., Девяткин Ф. В., Арабаджиев Д. И., Шереужев М. А. Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 247–263. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-247-263

MSC: 68T40; 93C85 Original article

Simulation of group management of agricultural robots using finite state machines and ontologies

M.A. Shereuzhev[1], F.V. Devyatkin[1], D.I. Arabadjiev[1], M.A. Shereuzhev[2, 3]

[1]Moscow State Technical University named after N. E. Bauman
105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5
[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
[3]Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov
360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue

Abstract. The article discusses a method for modeling the operation of a control system for a group of robots. A knowledge base of a group control system is proposed, presented in the form of ontology. The finite state machines of the leading and driven robots are described. An algorithm for assigning tasks to

© Шереужев М. А., Девяткин Ф. В., Арабаджиев Д. И., Шереужев М. А., 2023

individual robots is considered and tools for modeling motion control and task distribution are configured to provide a unified software environment for modeling group control. The Hungarian algorithm is considered in the context of assigning tasks to individual robots; the A* (Astar) planner was used to estimate movement paths. Tools for modeling motion control and task distribution have been configured to provide a unified software environment for modeling group control. The results obtained are applicable in problems of optimizing the interaction of multi-agent systems.

Keywords: multirobot control system, ontology, robotic system, finite state machine

Submitted 24.11.2023, approved after reviewing 04.12.2023, accepted for publication 08.12.2023

For citation. Shereuzhev M.A., Devyatkin F.V., Arabadjiev D.I., Shereuzhev M.A. Simulation of group management of agricultural robots using finite state machines and ontologies *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 247–263. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-247-263

Введение

На сегодняшний момент наблюдается активное стремление к разработке средств автоматизации в областях человеческой деятельности, где прежде существовала только частичная механизация, как, например, в сельском хозяйстве, в части выращивания плодоовощных культур [1]. Многообразие производственных задач в данной области и высокие издержки на трудовые ресурсы обусловливают актуальность разработки универсальных робототехнических платформ с модульным быстросъемным технологическим оборудованием. При выполнении операций, связанных с выращиванием и сбором плодовых культур, необходимо решение как общих задач робототехники, так и специализированных задач. Общие операции робототехники включают, например, навигацию по местности, локализацию, и распознавание объектов и др. [2]. Специализированные операции включают такие задачи, как срыв плодов, планирование траектории и управление позиционированием распылителя для нанесения препаратов.

Для эффективного выполнения задач требуется реализация цепочек операций, включая как типичные для большинства роботов, так и специализированные. Это предполагает формирование знаний о типах задач, требованиях к роботам и их возможностях для решения различных операций. Для группового применения роботов необходимо наличие семантических знаний, а также обоснование последовательности действий каждого робота на этапе распределения задачи и формирования последовательности состояний на логическом уровне системы управления отдельного робота [3]. В этом контексте методы представления знаний на основе онтологий, а также их комбинирование с управлением состояниями роботов на основе конечных автоматов [4, 5], представляются подходящими инструментами, предоставляющими возможность для решения сложных задач в реальной среде.

Онтология робототехнической системы

Реализуем онтологию в составе алгоритма распределения задач для группы роботов, осуществляющих операцию сбора плодов в саду интенсивного выращивания. Определим набор классов для задач и роботов, таких как *«СборПлодов», «ПеревозкаКоробок», «ЗарядкаАккумулятора», «РоботСборщик», «РоботЛогист»* и *«РоботЗарядка»*. Каждой задаче и роботу можно назначить набор атрибутов и возможностей, таких как *«скорость_сбора», «вместимость_хранилища», «объем_перевозки», «расстояние_до_целевой_точки»* и *«состояние_зарядки»*. Также определим набор отношений между задачами и роботами, например, *«совместимость_с», «конфликт_с», «зависит_от» и «близость_к»* (табл. 1).

Таблица 1. Элементы онтологии группы роботов для сбора яблок

Table 1. Ontology elements of a group of apple-picking robots

	Задачи	**Роботы**
Классы	*СборПлодов, ПеревозкаКоробок, ЗарядкаАккумулятора*	*РоботСборщик* *РоботЛогист* *РоботЗарядка*
Атрибуты	*скорость_сбора, вместимость_хранилища, объем_перевозки, расстояние_до_целевой_точки, требуемый_заряд*	*состояние_зарядки* *остаток_заряда* *расстояние_до_целевой_точки*
Отношения		*совместимость_с* *конфликт_с* *зависит_от близость_к*

Для реализации данной онтологии воспользуемся инструментом на базе OWL. Итоговая интерпретация онтологии, представленная на рисунке 1, учитывает наличие таких абстракций, как «способности», «рабочий орган», «объект манипулирования».

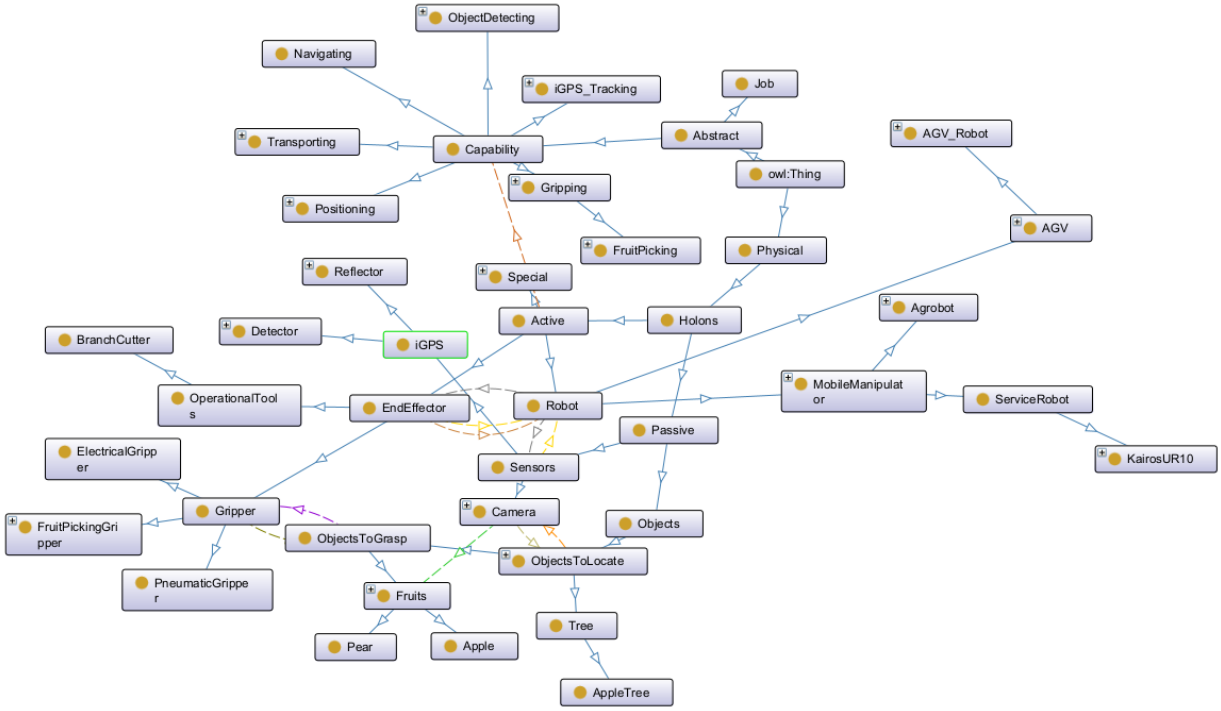


Рис. 1. *Онтология для сельскохозяйственного робота с учетом возможных конфигураций (Источник: составлено авторами)*

Fig. 1*. Ontology for an agricultural robot taking into account possible configurations (Source: made by the authors)*

В экземплярах классов данной онтологии будем хранить данные о требуемых параметрах выполнения задачи и данные о текущем состоянии роботов.

Пример метода распределения задач

Основная цель заключается в координированном движении группы роботов, которая следует заданным маршрутом [6] и выполняет задачи по уборке урожая в определенном месте [7] в соответствии с заранее определенной логикой.

Используя данные о возможностях роботов и данные об актуальном состоянии, возможно сформировать алгоритм определения оптимального назначения задач [8–11].

Назначение задач гомогенным группам роботов является задачей о назначениях за полиномиальное время. Формализация данной задачи в виде графа предполагает, что в графе $G = (S, T; E)$ есть n вершин, соответствующих гомогенным роботам в случае распределения на уровне верхнего вычислителя и отдельным агентам в случае гомогенной группы (S), и n вершин, соответствующих видам работ T.

Пусть каждая задача T_i имеет набор требований req_i и набор ограничений con_i, а каждый робот r_j имеет набор возможностей cap_j и набор ограничений con_j. Решим проблему распределения задачи.

Для наглядности здесь и ниже полезность решения задачи t_i роботом r_j будем рассматривать в упрощенном виде как $c_{i,j}$, которая может быть рассчитана на основе совместимости требований задачи и возможностей робота, а также ограничений задачи. Например, если задача t_i требует возможности собирать яблоки, а робот r_j имеет возможность собирать яблоки, но срок службы батареи робота r_j низкий и он не может выполнить задачу без подзарядки, то стоимость назначения задачи $\mathrm{t_i}$ для робота $\mathrm{r_j}$ должна отражать как соответствие возможностей, так и ограничение батареи.

Для достижения оптимального режима работы РТК требуется найти совершенное или полное паросочетание с наименьшей стоимостью.

Венгерский алгоритм можно использовать для решения задачи о назначениях, находя такое задание, которое минимизирует общую стоимость [12]. Алгоритм сначала инициализирует матрицу M размера $m \times n$, где каждый элемент представляет стоимость назначения задачи t_i роботу r_j. Затем алгоритм итеративно сводит матрицу к квадратной матрице размера $m \times m$, где каждая строка и столбец содержат ровно один нулевой элемент, путем вычитания элемента минимальной стоимости каждой строки и столбца из всех остальных элементов. Затем алгоритм идентифицирует набор назначений, которые охватывают все нулевые элементы, и если количество назначений меньше m, алгоритм итеративно увеличивает набор назначений, находя новые назначения, которые охватывают непокрытые нулевые элементы, пока не будут назначены все задачи. Полное описание приведено на рисунке 2.

1. Инициализация

Пусть M – матрица размера $m \times n$, где $M_{i,j}$ представляет стоимость назначения задачи t_i роботу r_j. Установим набор назначений A пустым.

Уменьшение матрицы

Для каждой строки i и каждого столбца j таблицы M необходимо вычесть минимальный элемент строки i и столбца j из всех элементов строки i и столбца j соответственно. Обозначим полученную матрицу как M'.

2. Определение задания

Пока размер A меньше m, сделать следующие шаги.

Найти нулевой элемент $M'_{i,j}$, который не покрывается никаким присваиванием в A.

Если существуют уникальная строка i и уникальный столбец j такие, что $M'_{i,j} = 0$, то назначаем задачу t_i роботу r_j и добавляем задание (t_i, r_j) в A.

В противном случае пусть S_i будет набором столбцов, в которых нет элементов в строке i, и пусть T_j будет набором строк, в которых нет элементов в столбце j. Пусть S – объединение S_i и T_j. Если S не пусто, выбрать любой столбец k.

Если S пусто, алгоритм завершается без действительного присваивания.

В противном случае выбрать любую строку p в S и добавить присваивание (t_p, r_k) к A. Удалить все назначения, которые охватывают любую строку или столбец, которые покрыты назначением (t_p, r_k). Вернуться к шагу 2.

3. Выход

Набор заданий A представляет собой оптимальное распределение заданий, минимизирующее общую стоимость.

Рис. 2. *Описание венгерского алгоритма для распределения задач*

Fig. 2. *Description of the Hungarian algorithm for task distribution*

С учетом особенностей функционирования роботов предложим следующую структуру стоимости назначения задачи t_i для робота r_j:

$$c_{i,j} = w_1 \times d_{i,j} + w_2 \times (B - b_j) + w_3 \times (1 - c_j), \quad (1)$$

где $d_{i,j}$ – расстояние между задачей $\mathrm{t_i}$ и роботом $\mathrm{r_j}$, B – необходимое время работы от батареи задачи t_i, b_j – оставшееся время работы от батареи робота r_j, c_j – количество задач, назначенных роботу r_j, а w_1, w_2 и w_3 – весовые коэффициенты, отражающие относительную важность расстояния, времени автономной работы и балансировки рабочей нагрузки. Значения $d_{i,j}$ и B можно получить из онтологии, а значения b_j и c_j можно динамически обновлять по мере назначения задач роботам.

Конечно-автоматное управление

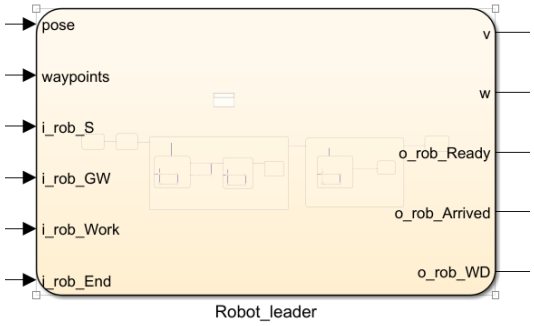
Модель управления состояниями робота-ведущего представлена на рисунке 3 (а) и (б). Эта модель включает в себя 6 входов и 5 выходов. Модель управления конечным автоматом ведомого робота представлена на рисунке 3 (в) и (г). Связь иллюстрированных автоматов между собой и с верхнеуровневым автоматом состояний всей системы, а также с объектами для публикации данных в ROS можно проследить на рисунке 4.

Структура и описание входных и выходных сигналов конечных автоматов роботов представлены в таблице 2.

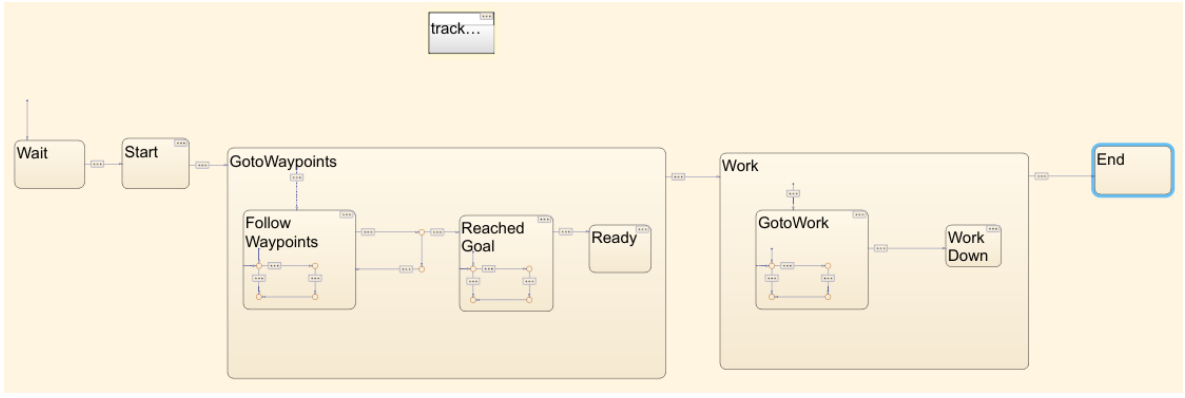
Таблица 2. Входы и выходы конечных автоматов ведущего и ведомого роботов

Table 2. Inputs and outputs of finite state machines of the leading and driven robots

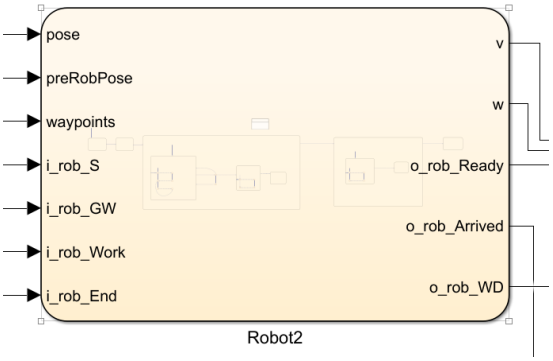
Показатель	Входы	Выходы
Ведущий робот	pose – текущее положение робота waypoints – начальная рабочая позиция робота i_rob_S – готовность робота к перемещению i_rob_GW – начинает ли робот движение к целевой точке i_rob_Work – начинает ли робот работу i_rob_End – завершил ли робот свою работу	v – желаемая линейная скорость робота w – желаемая угловая скорость робота o_rob_Ready – готов ли робот к перемещению o_rob_Arrived – достиг ли робот целевой точки o_rob_WD – завершилась ли работа с роботами
Ведомый робот	pose – текущее положение робота waypoints – начальная рабочая позиция робота i_rob_S – готовность робота к перемещению i_rob_GW – начинает ли робот движение к целевой точке i_rob_Work – начинает ли робот работу i_rob_End – завершил ли робот свою работу preRobPose – положение передового робота	v – желаемая линейная скорость робота w – желаемая угловая скорость робота o_rob_Ready – готов ли робот к перемещению o_rob_Arrived – достиг ли робот целевой точки o_rob_WD – завершилась ли работа с роботами



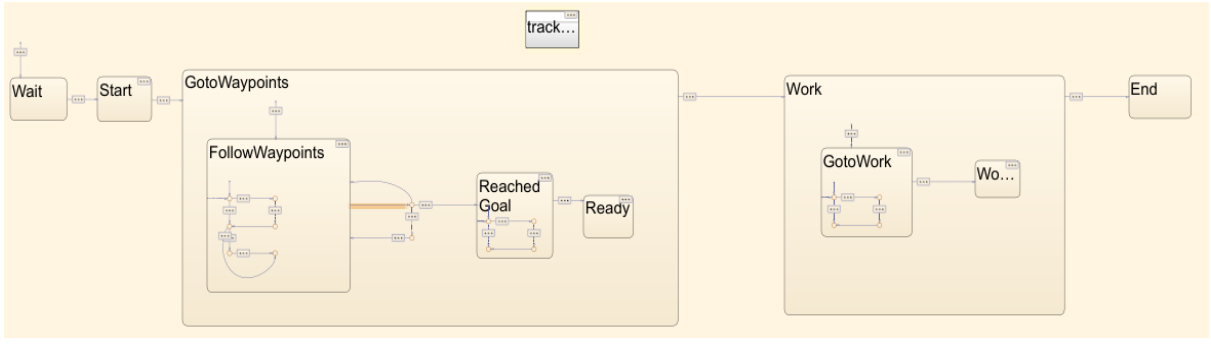
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. *Структура конечных автоматов роботов: а) – конечный автомат ведущего робота; б) – структура взаимодействия элементов ведомого робота; в) – конечный автомат ведомого робота; г) – структура взаимодействия элементов ведущего робота (Источник: составлено авторами)*

Fig. 3. *Structure of finite state machines of robots: a) – finite state machine of the leading robot; b) – structure of interaction between elements of the driven robot; c) – finite state machine of the driven robot; d) – structure of interaction between the elements of the leading robot (Source: made by the authors)*

Логика работы конечного автомата ведущего робота описывается следующим образом:

- Инициализация робота, проверка готовности.
- Робот движется к целевой точке, непрерывно оценивая угол в процессе работы и корректируя угловую скорость, если отклонение больше pi/24.
- По достижении целевой точки робот продолжает корректировать установку, выставляя угловую скорость, и когда все установки верны, отправляет команду о достижении цели.
- Робот начинает работу и следует по траектории.
- Робот завершает свою работу и прекращает движение.
- Функция trackGoal(goal) используется для вычисления угла и расстояния до целевой точки.

Логика работы конечного автомата ведомого робота описывается следующим образом:

- Инициализация робота, проверка его готовности.
- Робот движется к целевой точке, непрерывно оценивая угол в процессе работы и корректируя угловую скорость, если отклонение больше pi/24.
- Оценка расстояния до робота, являющегося ведущим для текущего, и снижение скорости, если расстояние слишком мало.
- По достижении целевой точки робот продолжает корректировать установку, выставляя угловую скорость, и когда все установки верны, отправляет команду о достижении цели.
- Робот начинает работу и следует по траектории.
- Робот завершает свою работу и прекращает движение.

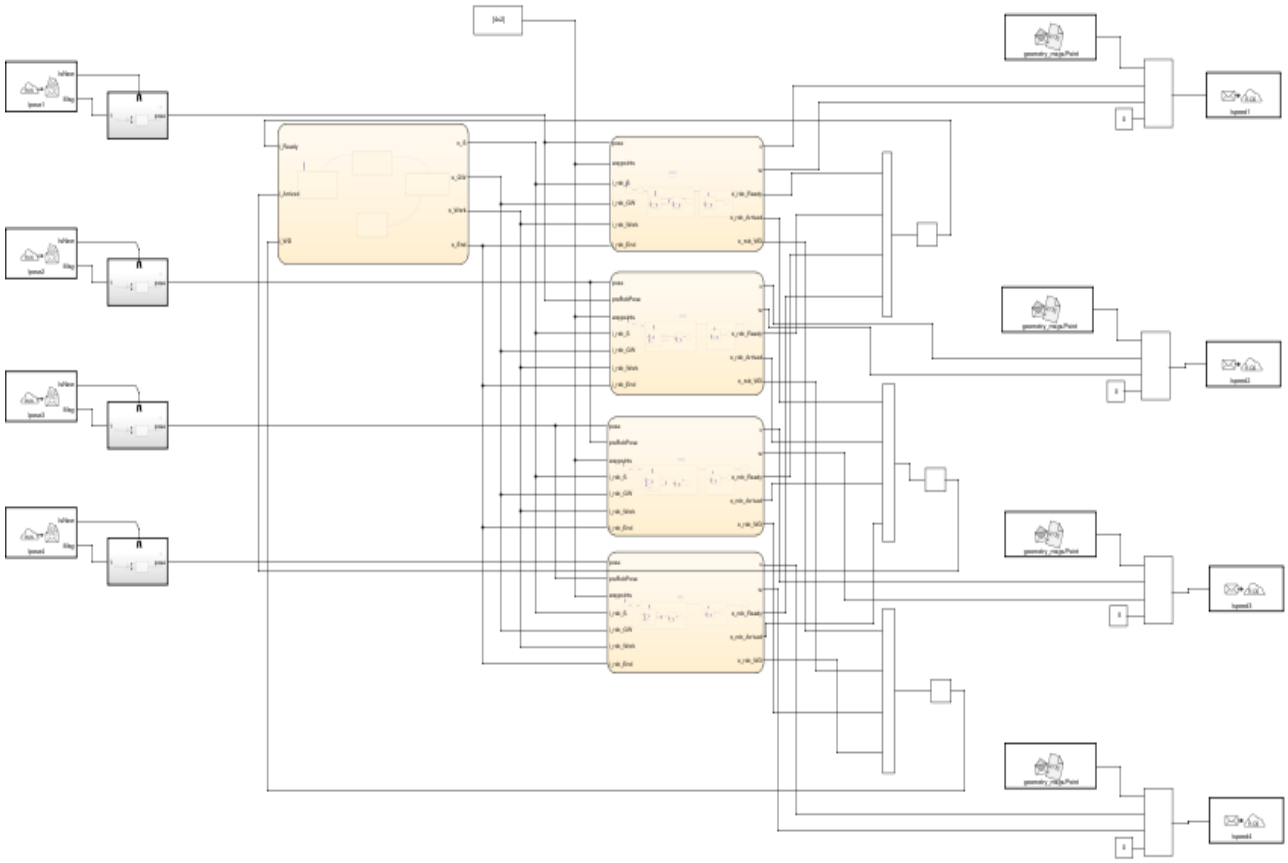


Рис. 4. *Структура управляющего сетевого конечного автомата (Источник: составлено авторами)*

Fig. 4. *Structure of the control network finite state machine (Source: made by the authors)*

Моделирование процесса

Группа роботов состоит из робота-ведущего и нескольких ведомых. Процесс работы развертывается следующим образом: сначала роботы последовательно прибывают в заранее назначенное место, после чего они одновременно приступают к выполнению задачи по уборке урожая.

В основе системы лежат следующие инструменты: MATLAB, ROS, CoppeliaSim [13, 14]. MATLAB (настроенный на функцию минимизации ode15s): логическое управление с использованием конечных автоматов для координации действий роботов. ROS: обеспечивает связь между MATLAB и CoppeliaSim для эффективного взаимодействия между различными компонентами системы. CoppeliaSim: реализует моделирование рабочего процесса робота, обеспечивая визуализацию и анализ выполнения задач. Для обмена сообщениями между перечисленными инструментами были использованы темы, приведенные на рисунке 5. Топики с корнем *pose* наполнялись данными из CoppeliaSim и считывались в MATLAB, а с корнем *speed* с точностью до наоборот, *simTime* необходима для корректной работы регуляторов на стороне MATLAB, выполняет задачу согласования времени между этими инструментами.

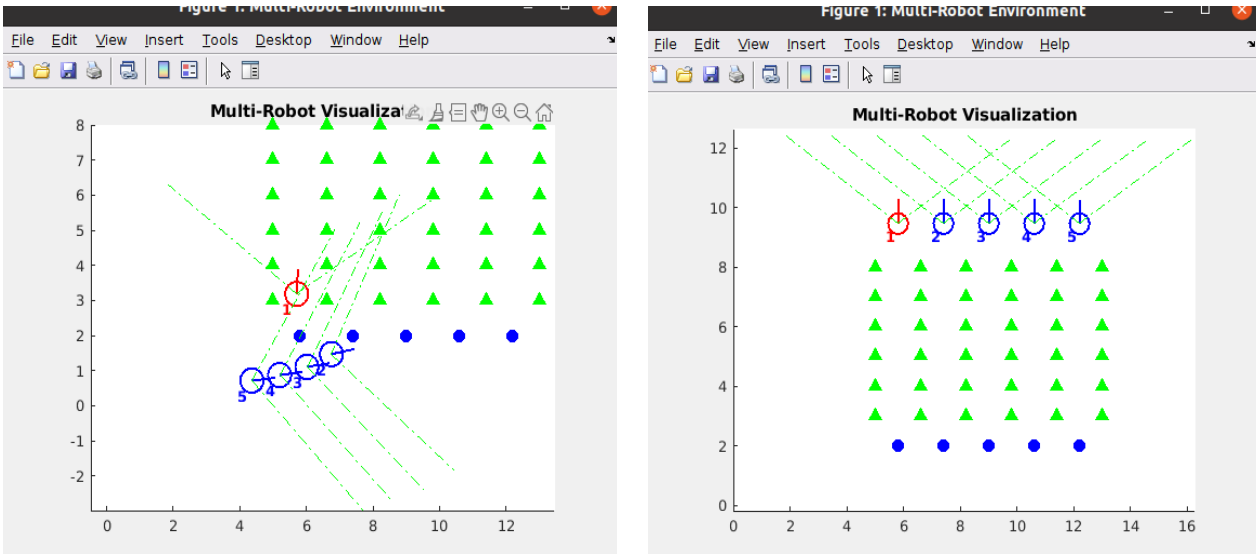
В создании распределенной робототехнической системы в рамках данной работы использован инструмент Mobile Robotics Simulation Toolbox в среде MATLAB. Такое сочетание инструментов обеспечивает эффективное функционирование и взаимодействие в рамках робототехнической системы.



Рис. 5. *Активные топики (Источник: составлено авторами)*

Fig. 5. *Active topics (Source: made by the authors)*

В процессе управления на вход робота поступают желаемые значения линейной скорости и угла поворота, а на выходе формируются скорости колес робота. Робот изображен в виде прототипа, где красным цветом выделен робот-ведущий, а синим – робот-ведомый. Весь рабочий процесс был успешно смоделирован в среде MATLAB. На рисунке 6 на карте представлено 5 маршрутов между насаждениями. Начальная точка обозначена синей меткой. Робот начинает движение по рабочей траектории после достижения заданной начальной точки. Состояние робота в начале распределения между рядами деревьев проиллюстрировано на рисунке 6 (а), а конечное состояние – на рисунке 6 (б).

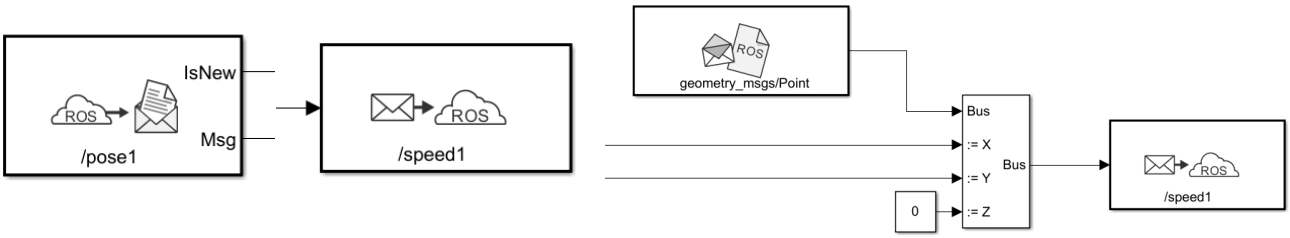


а) б)

Рис. 6. *Моделирование группы роботов при выполнении назначенных задач: а) – начало процесса выполнения задачи; б) – конец прохода ряда (Источник: составлено авторами)*

Fig. 6. *Simulation of a group of robots performing assigned tasks: a) – the beginning of the task execution process; b) – end of row passage (Source: made by the authors)*

Для публикации и подписки на сообщения в Simulink используется ROS Toolbox, модуль темы представлен на рисунке 7.



а) б)

Рис. 7. *а) – блоки модуля ROS для подписки и публикации; б) – блок-схема MATLAB для публикации (Источник: составлено авторами)*

Fig. 7. *a) – ROS module blocks for subscription and publication; b) – MATLAB block diagram for publication (Source: made by the authors)*

Модель робота и карты в CoppeliaSim представлены на рисунке 8. В данной модели сельскохозяйственные культуры заменены на стеновые блоки с маркерами, указывающими направление движения вперед.

Используя предложенную оценку стоимости назначения задач (1), составим матрицу затрат и применим венгерский алгоритм, чтобы найти оптимальное распределение задач для системы с несколькими роботами, состоящей из ведущего и ведомых роботов.

Для этого сначала происходит загрузка изображения карты и создание бинарной карты занятости. Количество задач и роботов определено переменными numTasks и numRobots.

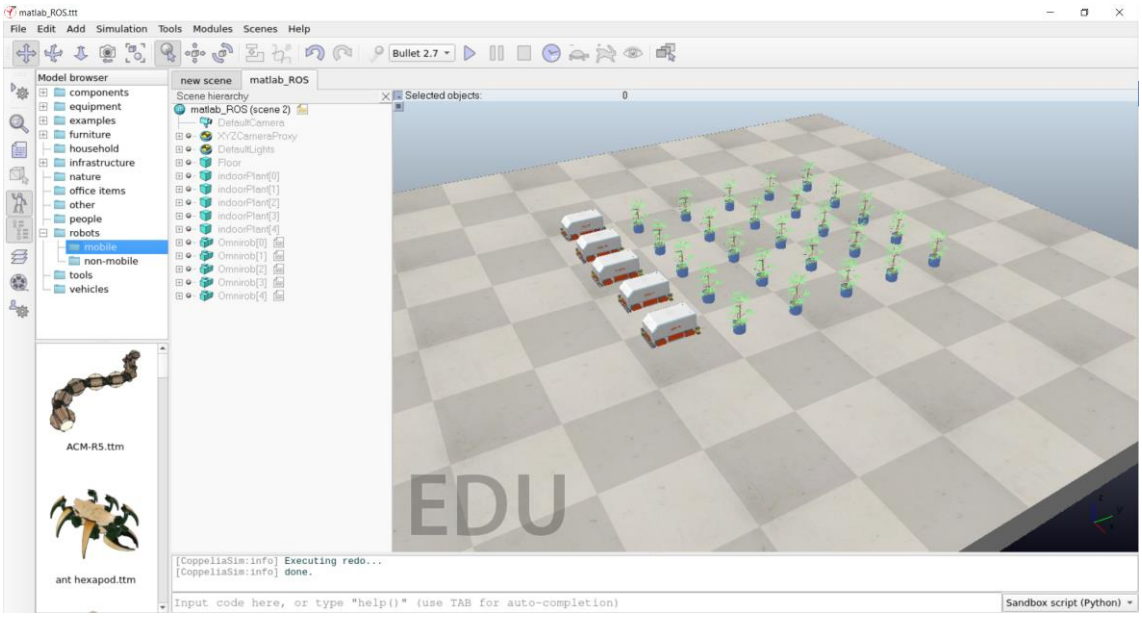


Рис. 8. *Моделирование роботов и карт в CoppeliaSim*
(Источник: составлено авторами)

Fig. 8. *Simulation of robots and maps in CoppeliaSim*
(Source: made by the authors)

Далее задача разбивается на 4 подзадачи разной стоимости. Стоимость задачи определяется суммой всех подзадач, в нее входящих. Стоимость подзадач определяется по расходу заряда аккумулятора у робота для выполнения подзадачи. Транспортные перемещения до начала ряда требуют меньше всего заряда. Движение вдоль ряда требует большего расхода заряда, так как робот не только движется, но и собирает плоды, следовательно, стоимость подзадачи больше.

Затем используется алгоритм A* для планирования путей от каждого робота к каждой задаче. Результаты сохраняются в матрицу pathArray, а стоимость каждой задачи сохраняется в матрицу costMatrix.

После этого происходит распределение задач между роботами с использованием венгерского алгоритма и вывод результатов.

В таблицах 3–5 представлены матрицы стоимости, где номера столбцов соответствуют номерам роботов, а номера строк – номерам задач. На зеленом фоне оптимальное распределение задач по роботам.

Таблица 3. *Матрица стоимости и оптимальное распределение для 4 роботов и 4 задач*

Table 3. *Cost matrix and optimal allocation for 4 robots and 4 tasks*

№ зад.\№ роб.	1	2	3	4
1	268	**73**	153	280
2	**95**	252	110	105
3	219	139	**87**	229
4	315	92	216	**327**

Таблица 4. *Матрица стоимости и оптимальное распределение для 5 роботов и 5 задач*

Table 4. *Cost matrix and optimal allocation for 5 robots and 5 tasks*

№ зад.\№ роб.	1	2	3	4	5
1	**27**	233	272	182	371
2	132	262	301	**211**	252
3	270	328	289	331	**184**
4	200	**36**	75	125	181
5	247	200	**151**	286	141

Таблица 5. *Матрица стоимости и оптимальное распределение для 6 роботов и 6 задач*

Table 5. *Cost matrix and optimal allocation for 6 robots and 6 tasks*

№ зад.\№ роб.	1	2	3	4	5	6
1	230	146	183	226	**257**	157
2	**235**	145	188	225	256	156
3	130	261	148	**107**	73	178
4	322	38	**275**	156	187	61
5	15	345	34	195	209	**290**
6	259	**158**	277	98	58	75

Реализация венгерского алгоритма, используемого для оптимального распределения задач между роботами в соответствии с матрицей стоимости costMatrix, следующая:

1. Инициализация:

1.1. Получить размеры матрицы стоимости (numRows и numCols).

1.2. Вычислить минимальные значения по строкам и столбцам и вычесть их из соответствующих строк и столбцов матрицы стоимости.

1.3. Инициализировать переменные и массивы для отслеживания распределения задач: coveredRows, coveredCols и assignment.

2. Поиск и покрытие нолей:

2.1. Поочередно находить ноли в матрице стоимости, которые еще не были покрыты и не использовались для распределения задач.

2.2. Если найден ноль в текущих строке и столбце, обновить массивы coveredRows и coveredCols и прервать вложенный цикл 3.

3. Итерации для покрытия всех строк:

3.1. Запустить цикл, который будет повторяться, пока есть непокрытые строки.

3.2. Если невозможно найти ноль в текущей строке, уменьшить все непокрытые значения матрицы на минимальное непокрытое значение.

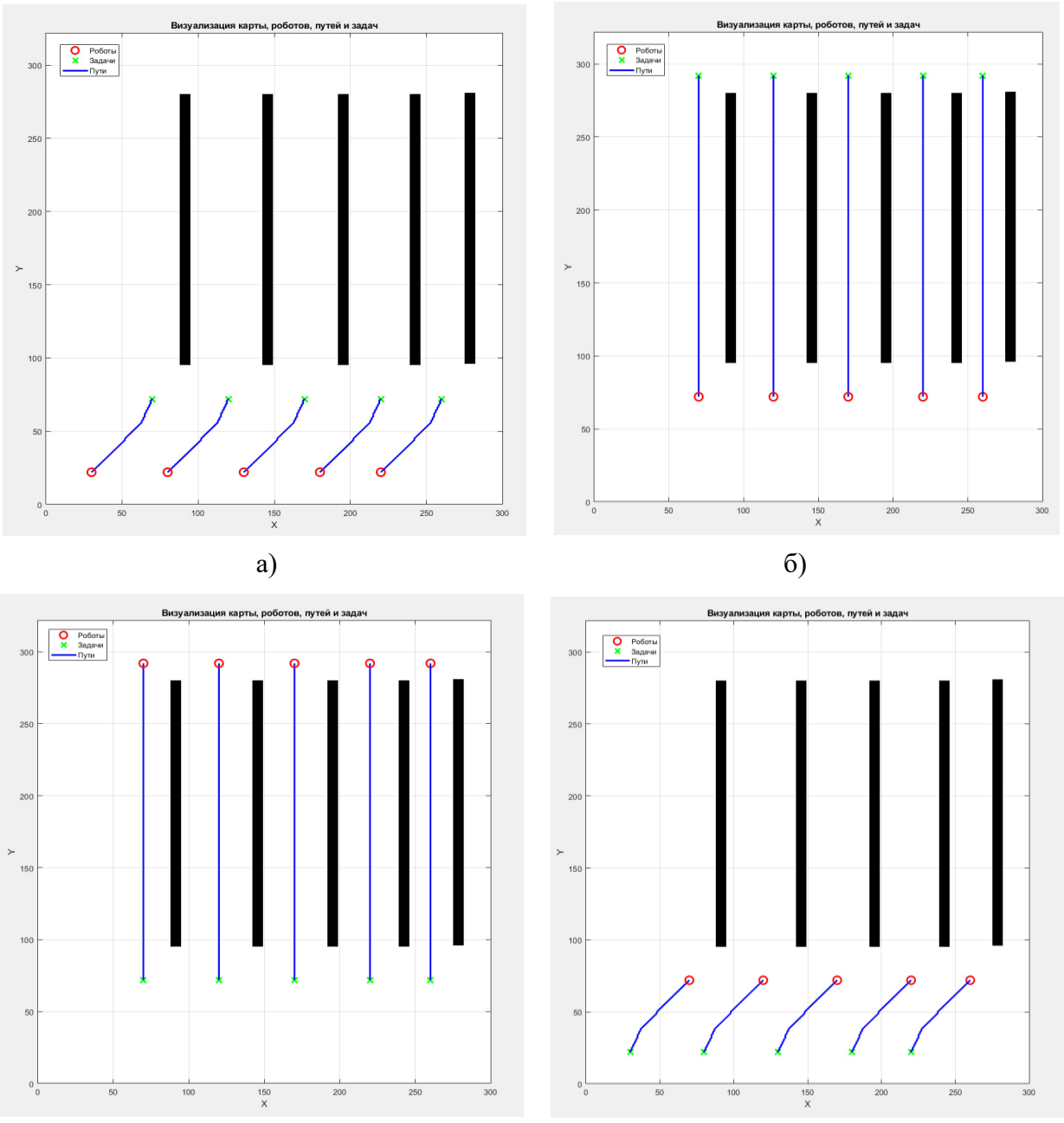
4. Возврат оптимального распределения:

4.1. По завершении цикла вернуть оптимальное распределение задач в виде матрицы assignment.

На рисунке 9 представлен результат оптимального распределения задач между роботами и траекторий движения для их достижения. Критерием оптимизации в данном случае выступает расстояние до точки выполнения задачи.

Сценарий робота был отредактирован в CoppeliaSim для преобразования полученных из топика ROS скоростей в скорости всех четырех колес в соответствии с кинематической моделью платформы с меканум колесами.

Движение роботов к рядам происходит в соответствии с вышеуказанным распределением, порядок роботов в строю регулируется результатом работы венгерского алгоритма, выполненного для начальных позиций роботов.



а) б)

в) г)

Рис. 9. *а) – движение на исходные позиции для работы; б) – движение вдоль рядов; в) – возврат вдоль рядов на исходные позиции; г) – возвращение домой (Источник: составлено авторами)*

Fig. 9. *a) – movement to the starting positions for work; b) – movement along the rows; c) – return along the rows to the starting positions; d) – return to home (Source: made by the authors)*

На рисунке 10 отображен процесс моделирования в CoppeliaSim движения мобильных роботов по траекториям, сформированным из задачи распределения.

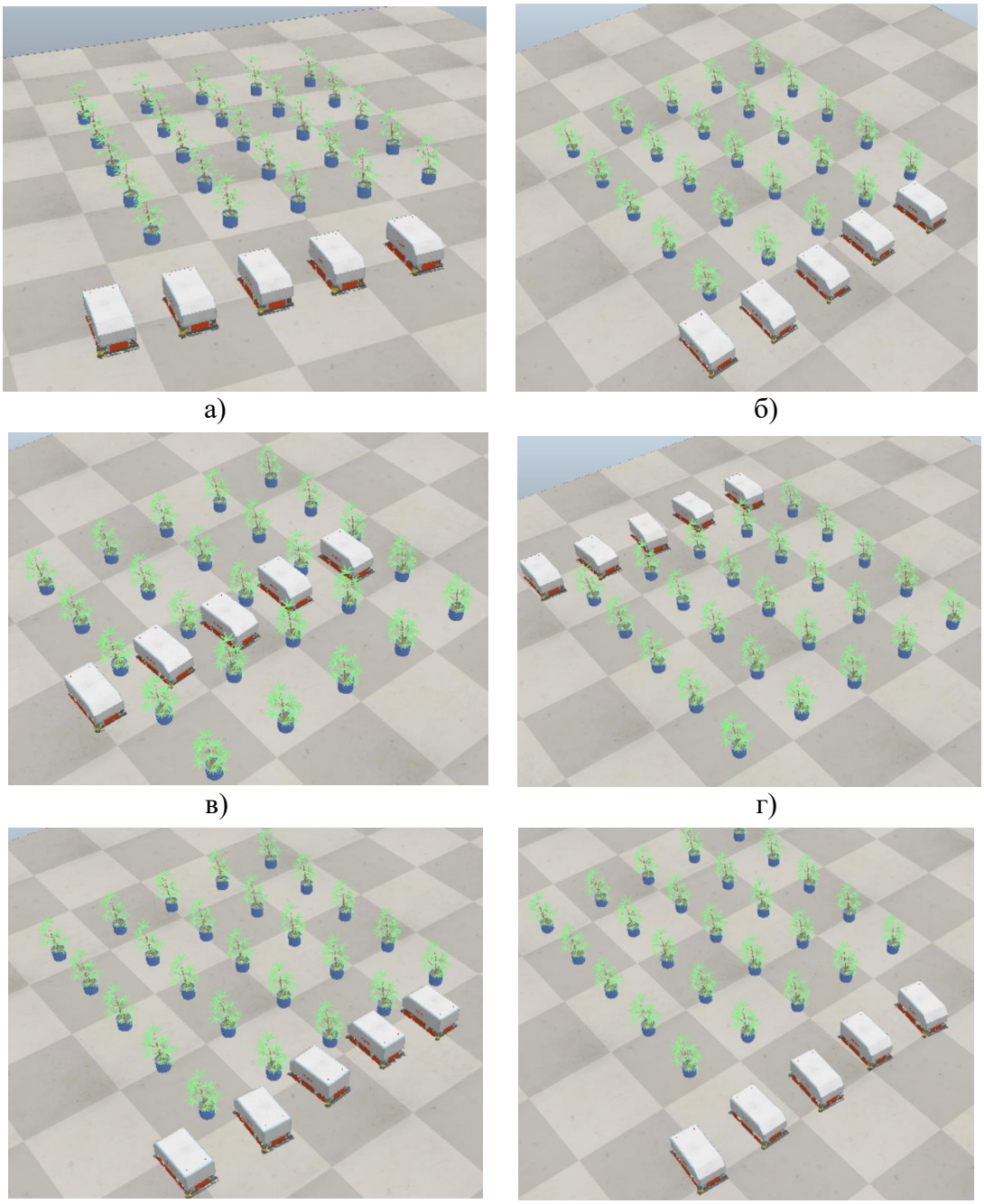


Рис. 10. *а) – движение на исходные позиции для работы; б) – начало движения вдоль рядов; в) – движение вдоль рядов; г) – возврат вдоль рядов из конечной точки на исходные позиции; д) – достижение исходной позиции; е) – в стартовой позиции*
(Источник: составлено авторами)

Fig. 10. *a) – movement to the starting positions for work; b) – movement began along the rows; c) – movement along the rows; d) – return along the rows from the end point to the starting positions; e) – reaching the starting position; f) – in the starting position*
(Source: made by the authors)

На рисунке 11 приведена динамика изменения координат каждого робота на этапе подхода к исходной позиции и движения вдоль ряда. Ступенчатость значений обоснована имеющей значение частотой отсылки сообщений из симулятора в ROS.

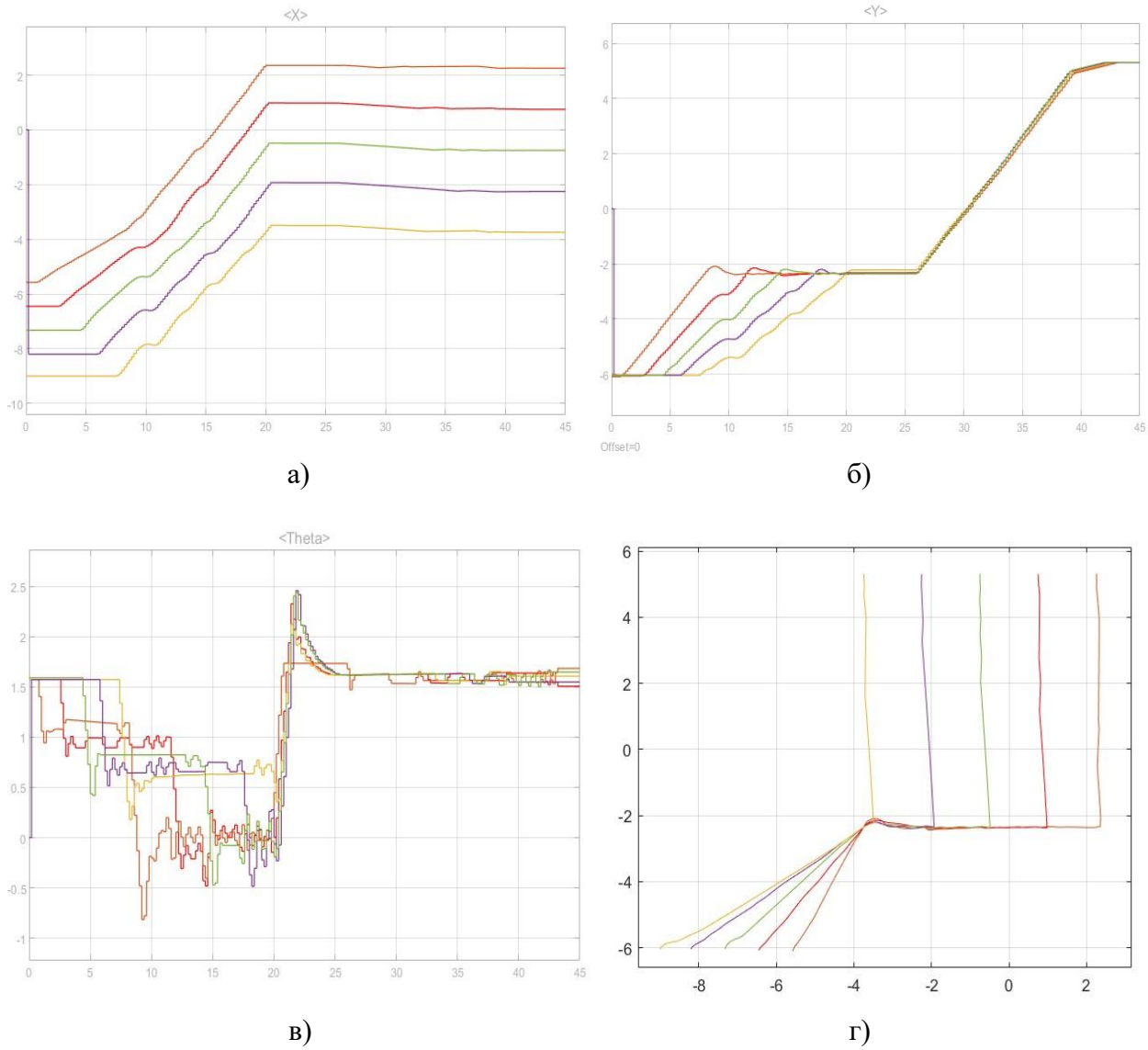


Рис. 11. *а) – изменение x координаты роботов; б) – изменение y координаты роботов; в) – изменение угла поворота роботов; г) – зависимости x от y*
(Источник: составлено авторами)

Fig. 11. *a) – change in the x coordinates of the robots; b) – change in the coordinates of the robots; c) – change in the angle of rotation of the robots; d) – dependence of x on y*
(Source: made by the authors)

Заключение

Разработана методика моделирования назначения задач для систем, управляемых конечными автоматами, с оптимизацией по критерию эффективности. Разработана модель задачи роботизированного сбора урожая группой роботов в среде Simulink с применением Stateflow. Для обеспечения совместного моделирования в реальном времени между MATLAB и CoppeliaSim был использован ROS для эффективной организации коммуникации между системами. Этот подход позволяет успешно интегрировать и координировать действия роботов в симуляционной среде, обеспечивая более точное и надежное моделирование задачи сбора урожая.

REFERENCES

1. *Нагоев З. В., Шуганов В. М., Бжихатлов К. Ч. и др.* Перспективы повышения производительности и эффективности сельскохозяйственного производства с применением интеллектуальной интегрированной среды // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 6(104). С. 155–165.

Nagoev Z.V., Shuganov V.M., Bzhikhatlov K.Ch. et al. Prospects for increasing the productivity and efficiency of agricultural production using an intelligent integrated environment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2021. No. 6(104). Pp. 155–165. (In Russian)

2. *Зенкевич С. Л., Чжу Хуа, Хо Цзяньвень,* Движение группы мобильных роботов в строю типа «конвой» – теория, моделирование и эксперимент // IV Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта», 5–6 октября 2017 г., Казань: труды семинара, под ред. Е. А. Магида, В. Е. Павловского, К. С. Яковлева. Казань: ЦИТ, 2017. С. 136–147.

Zenkevich S.L., Zhu Hua, Ho Jianwen. *Dvizhenie gruppy mobil'nyh robotov v stroju tipa «konvoj» – teorija, modelirovanie i eksperiment* [Movement of a group of mobile robots in a convoy-type formation – theory, modeling and experiment]. *IV Vserossiyskiy nauchno-prakticheskiy seminar «Bespilotnyye transportnyye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta», 5–6.10.2017, Kazan: trudy seminara, eds. E.A. Magid, V.E. Pavlovsky, K.S. Yakovlev.* Kazan: Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy, 2017. Pp. 136–147. (In Russian)

3. Shereuzhev M., Mostakov N., Vorotnikov S. Development of the Elements of a Control System for a Mobile Agricultural Robot Operating in a Group. *Modeling in Engineering*. Moskow, 2021. С. 11–18.

4. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Извлечение знаний из многомодальных потоков неструктурированных данных на основе самоорганизации мультиагентной когнитивной архитектуры мобильного робота // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2015. № 6(68). Т. 2. С. 145–152.

Nagoev Z.V., Nagoeva O.V. Extracting knowledge from multimodal streams of unstructured data based on the self-organization of a multi-agent cognitive architecture of a mobile robot. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2015. No. 6–2(68). Pp. 145–152. (In Russian)

5. Nazarova A.V., Huo J., Zenkevich S.L. Dynamic switching of multi-agent fromation in unknown obstacle environment. *Studies in systems, decision and control*. 2020. No. 261. Pp. 73–87.

6. *Носков В. П., Рубцов И. В.* Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 21–24.

Noskov V.P., Rubtsov I.V. Experience in solving the problem of autonomous control of the movement of mobile robots. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, automation, control]. 2005. No. 12. Pp. 21–24. (In Russian)

7. Hohimer C. Design and Field Evaluation of a Robotic Apple Harvesting System with a 3D-Printed Soft-Robotic End-Effector. *Transactions of the ASABE*. 2019. No. 62. Pp. 405–414. DOI: 10.13031/trans.12986.

8. Yang S.H., Lai W.H. Multi-robot task allocation with fuzzy constraint satisfaction. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012. No. 9(3). Pp. 107–116.

9. Julian B.J., Gerkey B.P. Scalable multirobot task allocation for complex missions. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. Pp. 2730–2736.

10. Lacroix S., Nourbakhsh I.R., Tomatis N. Multi-robot task allocation in uncertain environments using negotiation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. No. 37(2–3). Pp. 163–179.

11. Shi Z., Yu H., Zhang Q., Cheng Y. A hybrid algorithm for task allocation in multi-robot systems based on improved Hungarian algorithm and particle swarm optimization. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2015. No. 12(8). Pp. 1–13.

12. Martinelli S., Giordani M., Lujak F. A Distributed Algorithm for the Multi-Robot Task Allocation Problem. IEA/AIE 2010: *Trends in Applied Intelligent Systems*. Cordoba, Spain: Springer, 2010.

13. *Галин Р. Р.* Виртуальный полигон для эффективного взаимодействия роботов в многоагентной робототехнической системе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6–2(86). С. 108–113.

Galin R.R. Virtual training ground for effective interaction of robots in a multi-agent robotic system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2018. No. 6–2(86). Pp. 108–113. (In Russian)

14. Shamshiri R.R., Hameed I.A., Karkee M., Weltzien C. Robotic Harvesting of Fruiting Vegetables: A Simulation Approach in V-REP, ROS and MATLAB. Automation in Agriculture – Securing Food Supplies for Future Generations. 2018. URL: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73861 (access date: 15.08.2019).

Информация об авторах

Шереужев Мадин Артурович, ст. преподаватель кафедры «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

Арабаджиев Денис Игоревич, студент-магистр кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

arabadzhievdi@student.bmstu.ru

Девяткин Федор Владимирович, студент-магистр кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1;

feodor-dev@ya.ru

Шереужев Марат Артурович, аспирант кафедры «Агрономия», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в;

стажер-исследователь лаборатории «Интеллектуальные среды обитания», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

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

marat.shereuzhev07@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7368-4691

Information about the authors

Shereuzhev Madin Arturovich, Senior Teacher of the Department of “Robotic systems and mechatronics”, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, building 1;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2352-992X

Arabadzhiev Denis Igorevich, Graduate Student of “Robotics and mechatronics” Department, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;
105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, building 1;
arabadzhievdi@student.bmstu.ru

Devyatkin Fedor Vladimirovich, Graduate Student of “Robotics and mechatronics” Department, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;
105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, building 1;
feodor-dev@ya.ru

Shereuzhev Marat Arturovich, Postgraduate Student of “Agronomy” Department, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov;
360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue;
Trainee researcher of the Laboratory “Intellectual Habitats” 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;
marat.shereuzhev07@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7368-4691

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

УДК 633.15.631.52 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-264-269
EDN: TEGVMU

Комбинационная способность новых инбредных линий кукурузы селекции ВНИИК

Л. А. Галговская, О. В. Теркина, А. Н. Романова

Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы
357502, Россия, г. Пятигорск, ул Ермолова, 14-о, пом. 1

Аннотация. В статье приводятся результаты изучения новых среднеранних инбредных линий кукурузы по комбинационной способности. Исследования проводили на опытном поле ВНИИ кукурузы в период с 2015-го по 2020 г. В течение пяти лет на линейном материале проводили отбор по хозяйственным признакам, в процессе которого для дальнейшей работы отобрали 5 линий кукурузы. Линии были получены методом неоднократного самоопыления и отбора. Для проверки линий по общей комбинационной способности использовали метод топкроссных скрещиваний. Провели оценку селекционной ценности новых линий кукурузы в условиях предгорной зоны Ставропольского края. С участием новых линий и трех тестеров было создано 15 гибридных комбинаций. Анализ урожая зерна, полученного при скрещивании новых линий и тестеров, показал, что высокую общую комбинационную способность имели линии Л 145 и Л 374. Линия Л 180 характеризовалась низкой общей комбинационной способностью. Специфическая комбинационная способность была рассчитана по Савченко. Высокие результаты получились при скрещивании линии Л 126 с тестером Т8172 М и линии Л 145 с тестером Т5179 М. Провели изучение реакции анализируемых линий на закрепление стерильности и восстановление фертильности. В результате анализа цветения метелок гибридов F1, полученных при скрещивании линии и тестера по типу стерильности М, все пять линий проявили себя как закрепители.

Ключевые слова: инбредные линии, комбинационная способность, топкроссные скрещивания

Поступила 30.10.2023, одобрена после рецензирования 13.11.2023, принята к публикации 29.11.2023

Для цитирования. Галговская Л. А., Теркина О. В., Романова А. Н. Комбинационная способность новых инбредных линий кукурузы селекции ВНИИК // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 264–269. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-264-269

Original article

Combination ability of new inbred corn lines bred by VNIIK

L.A. Galgovskaya, O.V. Terkina, A.N. Romanova

All-Russian research scientific institute of corn
357502, Russia, Pyatigorsk, 14-o Ermolov street, building 1

Abstract. The article presents the results of a study of new mid-early inbred lines of corn in terms of combining ability. The research was carried out on the experimental field of the All-Russian Research Institute of Corn in the period from 2015 to 2020. For five years selection was carried out on linear material based on economic characteristics, during which 5 lines of corn were selected for further work. The lines were obtained by repeated self-pollination and selection. To test the lines for general combining ability, the topcross method was used. We assessed the breeding value of new lines of corn in the

© Галговская Л. А., Теркина О. В., Романова А. Н., 2023

conditions of the foothill zone of the Stavropol Territory. With the participation of new lines and three testers, 15 hybrid combinations were created. Analyzing the grain yield obtained by crossing new lines and testers, lines L 145 and L 374 had a high overall combinative ability. Line L 180 was characterized by a low overall combinative ability. Specific combining ability was calculated according to Savchenko. High results were obtained by crossing the L 126 line and the T8172 M tester and the L 145 line with the T5179 M tester. We studied the reaction of the analyzed lines to the consolidation of sterility and restoration of fertility. As a result of the analysis of flowering panicles of F1 hybrids obtained by crossing a line and a tester for sterility type M, all five lines proved to be fixers.

Keywords: inbred lines, combinative ability, topcross crossings

Submitted 30.10.2023, approved after reviewing 13.11.2023, accepted for publication 29.11.2023

For citation. Galgovskaya L.A., Terkina O.V., Romanova A.N. Combination ability of new inbred corn lines bred by VNIIK. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 264–269. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-264-269

Введение

Для создания гибридов кукурузы нужен исходный материал, отвечающий требованиям зоны семеноводства и дающий высокопродуктивные гибриды. Поэтому особое значение имеет изучение исходного материала по хозяйственно ценным признакам, таким как урожайность, устойчивость к болезням и вредителям, комбинационная способность и др.

Создание высокоурожайных гибридов кукурузы – это прежде всего подбор родительских пар (линий) с высокой комбинационной способностью [1]. Их подбирают с учетом требований, которые предъявляют к созданию (гибрида) сорта. Одно из главных – это получение высоких урожаев в сравнении с известными гибридами.

В настоящее время наиболее широко применяют селекционную схему, при которой новые линии получают из гибридов, созданных из существующих элитных линий. Это разновидность рекуррентного отбора, направленного на концентрацию в одном генотипе максимальной частоты желаемых аллелей. Поскольку обычно выбирают лучшие линии, генетическая основа линий становится с каждым циклом все более разнообразной [2].

Кукуруза – перекрестноопыляемое растение, поэтому создать линии с устойчивыми признаками можно лишь с помощью самоопыления (инцухта), повторяемого в течение ряда поколений. При неоднократном инцухтировании и отборе в конечном итоге все это должно привести к созданию нового по генотипу линейного материала. Чем больше информации накоплено об исходном материале и о характере наследования селектируемых признаков, тем точнее можно подобрать компоненты для гибридизации. Для этой цели необходимо изучить их по комплексу хозяйственно ценных признаков и определить характер наследования этих показателей в местных условиях [4, 8]. При этом необходимо отметить, что получаемые в результате работы самоопыленные линии не являются конечным продуктом селекции, а служат лишь материалом для скрещивания.

Получение новых самоопыленных линий с высокой комбинационной способностью, оптимально адаптированных к различным природно-климатическим условиям, – одна из важных задач, стоящих перед селекционерами. Самоопыленные линии могут использоваться как исходный материал не только для создания новых высокоурожайных гибридов, но и для улучшения каких-либо признаков или свойств у распространенных гибридов [9]. При выделении новых самоопыленных линий кукурузы особое внимание уделяется отбору элитных генотипов растений с максимальной концентрацией благоприятных аллелей генов [3]. Определение комбинационной способности самоопыленных линий кукурузы, по мнению большинства исследователей, является самым надежным методом оценки их селекционной значимости [5]. При определении комбинационной ценности

очень важно правильно выбрать тестер. Мы руководствовались следующими задачами: выявить как общую, так и специфическую комбинационную ценность нового материала и выбрать лучшие комбинации, а по возможности проверить реакцию на ЦМС. Для этого в качестве тестеров мы использовали стерильные простые гибриды.

Материалы и методика

Пополнение исходного материала в отечественной селекции идет в основном за счет закладки линий кукурузы на гибридах либо на синтетических популяциях (часто с закрытой родословной) [7]. Исходный материал, который мы использовали в данном опыте, получен методом самоопыления и отбора. Научные исследования проведены на базе ВНИИ кукурузы в Предгорной зоне Ставропольского края в период с 2015-го по 2020 г. Объектом исследований являлись новые перспективные линии селекции института. Линии отбирали по хозяйственно полезным признакам, таким как высокая комбинационная способность, хорошая влагоотдача, устойчивость к полеганию и ломкости стебля, устойчивость к основным болезням. В период работы осуществляли фенологические наблюдения (дата появления всходов и цветения растений), биометрические измерения (высота растений и прикрепления початка). Кроме этого, на всех линиях определяли длину и массу початка, количество рядов зерен, массу 1000 зерен, консистенцию зерна, цвет стержня и окраску зерна.

Предшественником по всем годам была озимая пшеница. Агротехника в опыте общепринятая для выращивания зерновых культур. Методика исследований соответствовала требованиям государственного сортоиспытания. Семена высевали в третьей декаде апреля (20–25 апреля), когда почва на глубине заделки семян прогрелась до 10–12^0 С. Способ посева пунктирный, на глубину 6–8 см при ширине междурядий 70 см. Густоту стояния 50–60 тыс./га формировали ручной прорывкой растений в фазе 3–5 листьев. Гибридные комбинации с использованием новых линий и тестеров изучали в контрольном питомнике.

Полученные данные были подвергнуты математической обработке по Д. А. Доспехову. Оценку линий ОКС (общая комбинационная способность) и СКС (специфическая комбинационная способность) рассчитывали по методике В. К. Савченко [6].

Результаты исследований

В процессе создания нового исходного материала участвовало 45 семей по 12 источникам, из которых в процессе отбора оставили для дальнейшей работы 5 линий. По длине вегетационного периода они относятся к среднеранним линиям. Растения имеют в среднем 13–15 листьев, высота их достигает 140–150 см, а прикрепление початка – 30–35 см. Практически все линии относятся к подвиду кремнистой кукурузы, за исключением Л 374 с промежуточным типом зерна.

Метод топкросса, которым мы воспользовались, позволяет провести основную браковку линий по общей комбинационной способности более легким и экономически более выгодным путем. Он был предложен Дэвисом (1927). Однако широкое признание в селекции инбредных линий кукурузы этот метод получил после опубликования Дженкинсом и Брунсоном (1932) обширного материала, свидетельствующего о том, что линии, выделенные на основании испытания топкроссов, дают и лучшие межлинейные комбинации.

С участием новых линий и трех тестеров (Т5179М, Т8172М, Т0176М) было создано 15 гибридных комбинаций. Анализ поделяночных урожаев показал, что полученные гибридные комбинации имели существенные различия по урожаю зерна. По результатам испытаний в 2019–2020 гг. гибридных комбинаций с участием новых линий было выявлено превышение над стандартом по урожаю зерна (табл. 1).

Таблица 1. Урожай зерна гибридов кукурузы с участием новых линий и трех тестеров в 2019–2020 гг.

Table 1. Grain yield of corn hybrids with the participation of new lines and three testers in 2019–2020

Линия	Урожай зерна при 14 % влажности, т/га			Средний урожай зерна при 14 % влажности, т/га	Отклонение от стандарта (+), т/га	Уборочная влажность %
	Т5179М	Т8172М	Т0176М			
Машук150МВ	–	–	–	4,7	0	15,1
Л 145	6,1	5,1	5,8	5,7	+1,0	15,1
Л 123	5,7	4,7	5,8	5,4	+0,7	17,4
Л 126	5,3	6,1	4,8	5,4	+0,7	15,6
Л 180	4,6	4,7	4,3	4,5	-0,2	15,8
Л 374	4,9	5,9	6,0	5,6	+0,9	15,3
НСР				1,1		

Из таблицы видно, что четыре гибрида превышают по зерновой продуктивности стандарт на 0,7–1,0 т/га, при этом уборочная влажность практически у всех на уровне стандарта, что говорит о хорошей селекционной ценности новых линий. Самое большое превышение у комбинации Л 145 с тестерами. На втором месте Л 374. Линия Л 180 с самыми низкими показателями по урожаю зерна, у нее при скрещивании с тестерами урожай ниже стандарта.

Анализ комбинационной способности самоопыленных линий по урожайности зерна является основным при оценке их как исходного материала для создания гетерозисных гибридов кукурузы. Поэтому по результатам данного опыта были рассчитаны эффекты общей комбинационной способности (ОКС) линий (табл. 2).

Таблица 2. Общая комбинационная способность линий

Table 2. General combining ability of lines

Линия	Эффекты ОКС
Л 145	2,58
Л 123	0,58
Л 126	0,69
Л 180	-5,82
Л 374	1,97

Как видно из таблицы, высокую ОКС имели линии Л 145 и Л 374. Линия Л 180 характеризовалась низкой общей комбинационной способностью. Также в процессе работы мы проверили данный набор линий по специфической комбинационной способности (СКС) (табл. 3).

Таблица 3. Специфическая комбинационная способность

Table 3. Specific combining ability

Линия	Тестеры		
	Т5179М	Т8172М	Т0176М
	Эффекты СКС		
Л 145	4,92	-4,49	2,15
Л 123	2,82	-6,36	4,13
Л 126	-0,42	7,19	-6,09
Л 180	-1,22	0,00	-4,60
Л 374	-6,10	3,67	4,41

Высокие значения СКС с участием тестеров получились у линии Л 126 и тестера Т8172М и Л 145 плюс тестер Т5179М. Неплохие результаты получились при скрещивании Л 145 и Т5179М, а также Л 374 и Т0176М.

Так как тестеры в данном опыте стерильные, то также проведено изучение реакции анализируемых линий на закрепление стерильности и восстановление фертильности. В результате анализа цветения метелок гибридов F1, полученных при скрещивании линии и тестера по типу стерильности М, все пять линий проявили себя как закрепители.

Выводы

Исследования позволили выделить линии, формирующие урожай зерна в скрещиваниях с тестером выше, чем у стандарта. Проведена оценка линий на общую и специфическую комбинационную способность по урожаю зерна. Намечены пути дальнейшего использования новых линий. Изучена реакция новых линий кукурузы на ЦМС (цитоплазматическая мужская стерильность).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слащев А. Ю., Супрунов А. И., Кольцова О. А., Чилашвили И. М.* Комбинационная способность новых среднеранних самоопыленных линий кукурузы // Кукуруза и сорго. 2015. № 1. С. 16–20.

2. *Гурьев Б. Л. Гурьева И. А.* Селекция кукурузы на раннеспелость. Москва: Агропромиздат, 1990. 171 с.

3. *Дзюбецкий Б. В., Боденко Н. А., Федько Н. Н., Бондарь Т. Н.* Комбинационная способность самоопыленных линий кукурузы плазмы айодент // Кукуруза и сорго. 2014. № 1. С. 27–29.

4. *Кардашина В. Е.* Сравнительная оценка сортов овса уральской селекции и их родительских форм // Достижения науки и техники АПК. № 6. 2021. Т. 35. С. 11–14.

5. *Перевязка Д. С., Перевязка Н. И., Супрунов А. И.* Изучение общей комбинационной способности новых раннеспелых и среднеранних автодиплоидных линий кукурузы в условиях центральной зоны Краснодарского края // Рисоводство. 2021. № 1(50). С. 43–48.

6. *Савченко В. К.* Генетический анализ в сетевых пробных скрещиваниях. Минск: Наука и техника, 1984. 51 с.

7. *Гульняшкин А. В., Варламова И. Н., Варламов Д. В.* Идентификация новых самоопыленных линий кукурузы на принадлежность к гетерозиготной группе зародышевой плазмы // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Белгородского научно-исследовательского института сельского хозяйства. Белгород, 2016. С. 258–263.

8. *Сотченко Ю. В., Галговская Л. А.* Изучение исходного материала в селекции кукурузы // Сб. Селекция, семеноводство, технология возделывания кукурузы. Пятигорск, 2009. С. 59.

9. *Шмараев Г. Е.* Кукуруза. Москва: Колос, 1975. 236 с.

REFERENCES

1. Slashchev A.Yu., Suprunov A.I., Koltsova O.A., Chilashvili I.M. Combination ability of new mid-early self-pollinated lines of corn. *Kukuruza i sorgo* [Corn and sorghum]. 2015. No. 1. P. 16–20. (In Russian)

2. Guryev B.L. Guryeva I.A. *Selektsiya kukuruzy na rannespelost'* [Selection of corn for early ripeness]. Moscow: Agropromizdat, 1990. 171 p. (In Russian)

3. Dzyubetsky B.V., Bodenko N.A., Fedko N.N., Bondar T.N. Combination ability of self-pollinated corn lines of plasma Iodent. *Kukuruza i sorgo* [Corn and sorghum]. 2014. No. 1. Pp. 27–29. (In Russian)

4. Kardashina V.E. Comparative assessment of oat varieties of Ural selection and their parental forms. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology of the agro-industrial complex]. 2021. No. 6. Vol. 35. Pp. 11–14. (In Russian)

5. Perevyazka D.S., Perevyazka N.I., Suprunov A.I. Study of the general combining ability of new early and mid-early autodiploid lines of maize in the conditions of the central zone of the Krasnodar Territory. *Risovodstvo* [Rice farming]. 2021. No. 1(50). Pp. 43–48. (In Russian)

6. Savchenko V.K. *Geneticheskiy analiz v setevykh probnykh skreshchivaniyakh* [Genetic analysis in network trial crosses]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1984. 51 p. (In Russian)

7. Gulnyashkin A.V., Varlamova I.N., Varlamov D.V. *Identifikatsiya novykh samoopylennykh liniy kukuruzy na prinadlezhnost' k geterozigotnoy gruppe zarodeshevoy plazmy* [Identification of new self-pollinated maize lines for belonging to the heterozygous germplasm group]. Materialy Vserosstyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem Belgorodskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skogo khozyaystva. Belgorod. 2016. Pp. 258–263. (In Russian)

8. Sotchenko Yu.V., Galgovskaya L.A. *Izucheniye iskhodnogo materiala v selektsii kukuruzy* [Study of sourcematerial in corn breeding]. *Selektsiya, semenovodstvo, tekhnologiya vozdelyvaniya kukuruzy*. Pyatigorsk, 2009. P. 59. (In Russian)

9. Shmaraev G.E. *Kukuruza* [Corn]. Moscow: Kolos, 1975. 236 p. (In Russian)

Информация об авторах

Галговская Людмила Анатольевна, ст. науч. сотр. отдела селекции, Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы;

357502, Россия, г. Пятигорск, ул Ермолова, 14-о, пом. 1;

e-m252@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-0220

Теркина Ольга Валентиновна, ст. науч. сотр. отдела селекции, Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы;

357502, Россия, г. Пятигорск, ул Ермолова, д. 14-о, пом. 1;

kukuruza.ekologiya.14@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4733-5719;

Романова Анна Николаевна, мл. науч. сотр. отдела селекции, Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы;

357502, Россия, г. Пятигорск, ул Ермолова, 14-о, пом. 1;

an.romanowa2012@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7337-7093

Information about the authors

Galgovskaya Lyudmila Anatolyevna, Senior Researcher at the Department of Selection, All-Russian Research Scientific Institute of Corn;

357502, Russia, Pyatigorsk, 14-o Ermolov street, building 1;

e-m252@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-0220;

Terkina Olga Valentinovna, Senior Researcher at the Department of Selection, All-Russian Research Scientific Institute of Corn;

357502, Russia, Pyatigorsk, 14-o Ermolov street, building 1;

kukuruza.ekologiya.14@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4733-5719;

Romanova Anna Nikolaevna, Junior Researcher at the Department of Selection, All-Russian Research Scientific Institute of Corn;

357502, Russia, Pyatigorsk, 14-o Ermolov street, building 1;

an.romanowa2012@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7337-7093

АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ

УДК 631.445.41 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-270-281
EDN: TEOEXX

Влияние приемов биологизации на урожайность сельскохозяйственных культур и плодородие почвы

Р. В. Бижоев, М. В. Бижоев

Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224

Аннотация. На орошаемых землях при интенсификации сельскохозяйственного производства и значительном применении минеральных удобрений, влияющих на органическое вещество почвы, а также в связи с резким уменьшением применения органических удобрений и различных приемов биологизации наблюдается повсеместное снижение уровня почвенного плодородия и вследствие этого уменьшение урожайности сельскохозяйственных культур. Такое ухудшение плодородия почв по причине интенсивного использования их в производстве требует постоянной компенсации органического вещества за счет внесения большого количества органических удобрений (навоза). В связи с уменьшением в последние годы поголовья сельскохозяйственных животных его образование существенно уменьшилось. Для восполнения потерь органического вещества почвы возникает необходимость разработки различных альтернативных биологических приемов. Актуальное значение приобретает совместное применение на землях биологических ресурсов, являющихся менее энергоемкими и малозатратными приемами, и средств химизации для восполнения органического вещества почвы, обеспечения растений элементами питания и улучшения ее агрохимических, агрофизических, водных и других свойств. На черноземе обыкновенном карбонатном длительного стационарного опыта лаборатории агрохимии и почвенных исследований ИСХ КБНЦ РАН с 1979 г. на трех полях орошаемого зернопропашного севооборота было изучено влияние различных приемов биологизации на повышение урожайности сельскохозяйственных культур. В статье представлены материалы исследований, проводившихся в течение 3 лет (2016–2018 гг.). Данными исследованиями было доказано, что для увеличения плодородия почвы и урожайности сельскохозяйственных культур целесообразно использование таких агротехнических приемов, как внесение органики один раз в пять лет, запашка сидератов и пожнивных остатков, а также совместное, комплексное использование всех приемов биологизации. Также было определено, что использование сидератов и пожнивных остатков снижает, а в сочетании с применением минеральных удобрений повышает урожайность сельскохозяйственных культур и решает актуальную проблему выноса питательных веществ из почвы.

***Ключевые слова*:** приемы биологизации, биологические ресурсы, сидераты, солома, плодородие, урожайность, продуктивность, органическое вещество почвы

Поступила 31.07.2023, одобрена после рецензирования 19.09.2023, принята к публикации 03.11.2023

Для цитирования. Бижоев Р. В., Бижоев М. В. Влияние приемов биологизации на урожайность сельскохозяйственных культур и плодородие почвы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 270–281. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-270-281

© Бижоев Р. В., Бижоев М. В., 2023

Original article

The influence of biologization techniques on crop yields and soil fertility

R.V. Bizhoev, M.V. Bizhoev

Institute of Agriculture –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street

Abstract. On irrigated lands with the intensification of agricultural production and significant use of mineral fertilizers influencing the soil organic matter, as well as due to a sharp decrease in the use of organic fertilizers and various methods of biologization, there is a widespread decrease in the level of soil fertility and, consequently, a decrease in crop yields. Such deterioration of soil fertility, for reasons of their intensive use in production requires constant compensation of organic matter due to the introduction of a large amount of organic fertilizers (manure). Its formation has significantly decreased in recent years due to the decrease in the number of farm animals. To replenish the loss of soil organic matter there is a need to develop various alternative biological techniques. It is becoming urgently important to use biological resources, which are less energy-intensive and expensive, together with chemicalization means to replenish soil organic matter, provide plants with nutrients and improve its agrochemical, agrophysical, water and other properties. On ordinary carbonate chernozem of stationary experience of the Laboratory of Agrochemistry and Soil Research of the Institute of Agriculture of the Russian Academy of Sciences the influence of various methods of biologization on increasing crop yields has been studied since 1979 on in three fields of irrigated grain crop rotation. The article presents the materials of research conducted over 3 years (from 2016 to 2018). These studies have proved that in order to increase soil fertility and crop yields, it is advisable to use such agrotechnical techniques as the application of organic matter once every five years, green manuring and crop residues, as well as the joint, integrated use of all methods of biologization. It was also found out that the use of green manuring and crop residues reduces, and in combination with the use of mineral fertilizers, allows solving topical issues of removal of nutrients from the soil and increases crop yields.

Keywords: biologization techniques, biological resources, green manure crops, straw, fertility, crop yields, productivity, soil organic matter

Submitted 31.07.2023, approved after reviewing 19.09.2023, accepted for publication 03.11.2023

For citation. Bizhoev R.V., Bizhoev M.V. The influence of biologization techniques on crop yields and soil fertility. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 270–281. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-270-281

Введение

В современных условиях хозяйствования и ограничения материально-технических ресурсов повсеместно в России отмечается снижение урожайности сельскохозяйственных культур за счет выноса питательных веществ из почвы с урожаями. Особенно эти негативные изменения заметны в условиях орошаемого земледелия. Для того чтобы минимизировать эти изменения, необходимо рациональное использование приемов биологизации, что будет способствовать повышению уровня почвенного плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур.

Так, менее энергоемкими и малозатратными способами повышения урожайности сельскохозяйственных культур совместно с запашкой пожнивных остатков зерновых колосовых культур и листостебельной массы кукурузы является применение сидератов [1]. Эти биологические технологии позволяют решать не только вопросы снижения воздействия негативных факторов на агробиоценозы, но и предусматривают взаимодействие органических удобрений и растительных остатков с агрохимическими средствами [2].

Д. Н. Прянишников, академик АН ВАСХНИЛ, считал, что «резко выраженный дефицитный характер баланса между выносом питательных веществ с урожаями и возвращением их с удобрениями, когда большая часть выноса возмещается не за счет удобрения, а за счет уменьшения запаса питательных веществ в почве, – несовместим с задачей регулярного поднятия наших урожаев» [3]. Главная роль в обеспечении растений азотом отводилась не техническому азоту, а максимальному использованию биологического азота за счет лучшей организации и накопления навоза, а также широкого использования зеленого удобрения и мобилизации других местных ресурсов [1, 3].

Систематическая запашка соломы, листостебельной массы кукурузы и сидератов на полях севооборота не только обеспечивает почву необходимыми для функционирования агроценоза биофильными элементами, но и способствует обогащению пахотного слоя органическим веществом [2]. Использование пожнивно-корневых остатков, сидератов и соломы зерновых в качестве органических удобрений позволило повысить плодородие почвы в среднем за звено севооборота по всем вариантам опыта [4].

Многолетними исследованиями установлено, что для создания бездефицитного баланса плодородного слоя в полевых зерновых севооборотах Центрального Предкавказья в среднем за 1 год, в зависимости от условий влагообеспеченности почвы, необходимо вносить не менее 8–15 т/га навоза[4], в то время как реально вносится 0,5–0,6 т/га. Показатели минерализации плодородного слоя в среднем составляют под зерновыми культурами – 0,7, под пропашными – 2,4, под парами – 2,8 т/га. Потери органического вещества под многолетними травами были близки к нулю. В условиях орошения эти показатели возрастают в 1,4–1,5 раза [1].

Объем восполнения потерь органического вещества за счет запашки корневых и пожнивных остатков при существующей урожайности на землях Кабардино-Балкарии составляет: под зерновыми культурами – 0,3–0,5, под многолетними травами – 0,8 т/га. Дефицит гумуса, не возмещенный растительными остатками, необходимо компенсировать внесением органики, используя для этого все возможные источники органического вещества [1, 5].

Материалы и методы

Исследования по определению эффективности рациональных приемов биологизации, повышающих плодородие почвы и урожайность сельскохозяйственных культур, проведены в длительном стационарном опыте, заложенном в 1979 г., опыт № 082 в Реестре Геосети опытов с удобрениями на основе 9-польного зернопропашного севооборота со следующим чередованием культур: 1 – горох, 2 – озимая пшеница, 3–4 – кукуруза на зерно, 5 – озимая пшеница, 6 – подсолнечник, 7 – озимая пшеница, 8 – кукуруза на зерно, 9 – озимая пшеница. Опыт заложен в пространстве тремя полями, чередование культур в полях севооборота происходило во времени [1]. Всего вариантов в опыте – 60, делянок – 240, площадь делянки – 189 м^2 при ширине делянки 6,3 м и длине 30,0 м, учетная площадь варьировала от 60,0 до 98,6 м^2 [1, 6].

В условиях орошения изучали два фактора.

Первый фактор – насыщение почвы органическим веществом:

1) без использования органических удобрений;

2) внесение навоза 50 т/га 1 раз в 5 лет;

3) возделывание сидератов после уборки озимой пшеницы;

4) запашка листостебельной массы кукурузы и соломы зерновых культур, возделываемых в опыте, на месте их произрастания;

5) применение всех изучаемых биоресурсов (внесение навоза + возделывание сидератов + запашка листостебельной массы кукурузы и соломы зерновых культур) [1, 6, 12].

Второй фактор – применение агрохимических средств повышения урожайности – минеральных удобрений.

В условиях современной экономики производители сельскохозяйственной продукции вынуждены применять гораздо меньшее количество минеральных удобрений по сравнению с рекомендованными для возделывания нормами, что продиктовано в первую очередь финансовыми затратами на закупку и применение, а также неукомплектованностью рынка необходимыми удобрениями.

Исходя из этого в каждом варианте органических удобрений испытывали следующие нормы минеральных удобрений:

1 – контроль, без минеральных удобрений;

2 – рекомендуемые нормы минеральных удобрений – NPK;

3 – 1/2 часть от рекомендуемой нормы NPK;

4 – 1/3 часть от рекомендуемой нормы NPK.

В качестве рекомендуемых норм применяли: под озимую пшеницу и кукурузу – $N_{90}P_{120}K_{60}$, под горох – $N_{30}P_{60}K_{40}$. Удобрения вносили осенью вручную согласно схеме опыта под основную обработку почвы.

На опытных полях в связи с отсутствием калийной соли и суперфосфата применяли следующие удобрения: аммиачную селитру, аммофос, нитроаммофоску и полуперепревший навоз. Листостебельную массу кукурузы и измельченную солому озимой пшеницы перед заделкой в почву для лучшего перемешивания дважды дисковали тяжелыми дисками [6]. В качестве зеленого удобрения высевали рапс или горчицу белую, так как ко времени уборки – в конце октября – они образовывали высокий урожай биологической массы, в среднем 32,2–33,6 т/га вместе с корневыми остатками, что соответствовало 7,6–8,1 т/га сухого вещества. Основным способом заделки сидератов и навоза являлась дискаторная заделка в два следа на глубину 8–10 см с последующей запашкой. При запашке биомассы зеленого удобрения в почву в среднем поступало 130–140 кг д.в. азота, 50–53 кг фосфора и 170–180 кг калия. С измельченной и запаханной соломы озимой пшеницы (4–4,5 т) в почву в среднем поступало: азота – 35–40 кг, фосфора – 15–18 кг и калия – 45–50 кг, с измельченной листостебельной массой кукурузы: 48–56 кг азота, 22–25 кг фосфора и 96–108 кг калия [1, 7–9].

Почва на опытных участках представляет собой чернозем обыкновенный карбонатный тяжелосуглинистый среднемощный со следующими агрохимическими показателями для пахотного слоя: кислотно-щелочной баланс (pH) – 7,1, исходное содержание подвижного фосфора – 1,9–2,4 (по Мачигину), обменного калия – 30,0–35,0 (в 1%-ной углеаммонийной вытяжке) [10], содержание легкогидролизуемого азота – 4,2–5,0 мг/100 г почвы, содержание гумуса в почве – 3,2–3,3 % (по Тюрину), сумма поглощенных оснований – 28 мг – экв/100 г почвы, $H_г$ – 0,8 мг – экв/100 г почвы, НВ – 25,4 и 25,7 %, плотность сложения – 1,23 г/см^3 [6]. Уровень почвенной влажности в опытах поддерживался с помощью вегетационных поливов и составлял не ниже 75–80 % НВ. Поливная норма изменялась от 400 до 600 м^3/га [1, 4].

Урожайные данные приводили к 14 % (зерно кукурузы, озимой пшеницы, гороха) стандартной влажности и обрабатывали математически методом дисперсионного анализа [11, 12]. Отбор и анализ растительных и почвенных проб проводился в соответствии с методическими разработками Всероссийского НИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова [13–15].

Результаты исследований

Научными исследованиями доказано преимущество совместного внесения органических и минеральных удобрений по сравнению с их раздельным применением. Органические удобрения в этом случае не только оказывали положительное влияние на агрегатное состояние и увеличивали водопрочность структуры чернозема, но также являлись источником элементов питания для растений и резервом энергии в протекающих биологических процессах [16]. Уровень применения органических удобрений в настоящее время в России составляет примерно около 1,0 т/га. По мнению академика Д. Н. Прянишникова, в

той ситуации, когда ресурсное обеспечение хозяйств низкое, а применение навоза небезопасно экологически и энергозатратно, изменение в этом вопросе следует искать в приемах биологизации и экологизации земледелия [3].

Менее энергоемким и наиболее малозатратным способом пополнения органического вещества и естественным источником поступления питательных веществ в почву, позволяющим повысить урожайность сельскохозяйственных культур, является не только применение сидератов, но и запашка листостебельной массы кукурузы и измельченной соломы зерновых колосовых культур [1, 4, 9]. Солома озимой пшеницы измельчалась измельчителем самоходного комбайна «Сампо», а листостебельная масса кукурузы – комбайном «Херсонец 200». Для лучшего перемешивания с почвой измельченную массу перед заделкой дважды дисковали. Данные приемы биологизации не требуют отказа от применения минеральных удобрений, а предусматривают сочетание биологических ресурсов, в частности, органических удобрений, растительных остатков и сидератов с агрохимическими средствами [1, 9]. Более высокое поступление органических веществ и минерального питания в почву оказывало положительное влияние на агрегатное состояние почвы, что определяло ее плодородие [17].

Исследованиями установлено, что урожайность возделываемых культур на полях орошаемого севооборота в вариантах опыта в основном зависела от применяемых систем удобрения и незначительно от климатических условий вегетационного периода, о чем свидетельствуют собственные длительные исследования и работы других ученых.

Климатические условия вегетационного периода трех исследуемых лет (2016–2018 гг.) были не вполне благоприятными для роста и развития всех полевых культур и формирования ими урожая. Так, в среднем за осенний период исследований, с сентября по декабрь включительно, выпало 114,2 мм осадков при норме 110,7 мм, что обеспечило хорошее укоренение и развитие до конца осенней вегетации озимой пшеницы, посеянной в оптимальные сроки. С января по март в среднем осадков выпало 101,3 мм, что почти в 2 раза больше обычного, при температурных показателях, превышающих многолетние. С апреля по август выпало 304,0 мм осадков при норме 291,7 мм. Температурные показатели в летние месяцы были на 1,4 – 2,7° выше средних многолетних, что способствовало созданию дефицита влаги для возделываемых культур. Показатели относительной влажности воздуха во все месяцы вегетации были меньше среднемноголетних величин (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика метеорологических условий вегетационного периода культур за 2016–2018 гг.

Table 1. Characteristics of meteorological conditions during the growing season of crops for 2016–2018

Месяц	Температура воздуха, °С		Сумма осадков за месяц, мм		Относительная влажность, %	
	Средняя за 2016–2018 гг.	Средняя многол.	Средняя за 2016–2018 гг.	Средняя многол.	Средняя за 2016–2018 гг.	Средняя многол.
Сентябрь	20,5	17,3	19,5	36,1	63	74
Октябрь	10,3	10,5	48,6	30,1	76	82
Ноябрь	5,1	3,9	15,6	23,5	78	88
Декабрь	0,9	- 0,9	30,5	21,0	81	90
Январь	-1,9	- 3,1	33,4	17,9	86	89
Февраль	1,8	- 2,4	20,0	17,4	83	86
Март	5,9	2,5	47,9	28,0	79	84
Апрель	12,4	10,7	40,6	43,5	69	74
Май	17,9	16,3	82,6	63,5	72	72
Июнь	22,0	20,6	88,1	77,9	65	69
Июль	25,7	23,1	68,2	59,9	63	67
Август	25,2	22,5	24,6	46,9	61	69
Сентябрь	19,9	17,3	22,3	36,1	64	74

Урожайность озимой пшеницы Южанка и Чегет в контрольном варианте без удобрений в орошаемом севообороте в среднем за 3 изучаемых года (2016–2018) составила 37,3, изменяясь в разные годы от 33,8 до 42,3 ц/га. Урожайность кукурузы без внесения удобрений изменялась в опыте от 21,4 до 26,6 ц/га при средней урожайности 23,8; средняя урожайность гороха составила 26,9 ц/га (25,1–28,8 ц/га за три года). При применении рекомендуемой минеральной системы удобрения в орошаемом севообороте определена средняя за 3 года урожайность культур: озимой пшеницы – 39,0, кукурузы – 42,6, гороха –31,9 ц/га [1, 9].

По эффективности применение органо-минеральных систем удобрения превосходило эффективность органических и минеральных удобрений по отдельности [1]. Так, средняя урожайность озимой пшеницы, кукурузы и гороха за 3 года в полях севооборота при применении навоза и минеральных удобрений (по рекомендуемой норме) составила 57,9, 41,9, 33,1, ц/га; при возделывании сидератов после зерновых колосовых и внесении минеральных удобрений: 57,0, 40,5, 31,2 ц/га; при запашке соломы и минеральных удобрений – 57,7, 42,2, 34,8 ц/; при применении всех изучаемых биоресурсов и минеральных удобрений средняя урожайность озимой пшеницы составила 61,2, кукурузы – 49,6, гороха – 36,4, ц/га (табл. 2) .

Таблица 2. Изменение урожайности орошаемого севооборота при применении биологизированных систем земледелия, ц/га, среднее за 2016–2018 гг.

Table 2. The change in the yield of irrigated crop rotation with the use of biologized farming systems, c/ha, average for 2016–2018

№ варианта	Удобрения		Урожайность культур в среднем за 2016–2018 годы, ц/га		
	органические	минеральные	Горох	Озимая пшеница	Кукуруза
1	0	О	25,1	33,8	21,4
2		NPK	31,9	51,1	39,0
3		1/2 NPK	30,2	46,4	34,6
4		1/3 NPK	28,1	41,6	30,8
5	Навоз 50 т/га 1 раз в 5 лет	О	26,7	36,0	23,5
6		NPK	33,1	57,9	41,9
7		1/2 NPK	31,3	53,0	37,2
8		1/3 NPK	29,4	46,1	32,4
9	Сидераты (рапс)	О	26,8	34,9	23,7
10		NPK	33,0	57,0	40,5
11		1/2 NPK	31,2	52,5	36,6
12		1/3 NPK	29,1	47,0	32,5
13	Солома	О	27,1	39,5	23,6
14		NPK	34,8	57,5	42,2
15		1/2 NPK	32,5	53,1	38,3
16		1/3 NPK	30,5	48,4	32,6
17	Навоз + солома + сидераты	О	28,8	42,3	26,6
18		NPK	36,4	61,2	49,6
19		1/2 NPK	33,9	55,4	44,0
20		1/3 NPK	32,0	50,7	37,5
Средний показатель урожайности культур за 3 года		О	26,9	37,3	23,8
		NPK	33,8	56,9	42,6
		1/2 NPK	31,8	52,1	38,1
		1/3 NPK	29,8	46,8	33,2
$НСР_{05}$ для частных различий			1,34	1,23	1,13
$НСР_{05}$ для органических удобрений			0,66	0,61	0,57
$НСР_{05}$ для минеральных удобрений и взаимодействия			0,58	0,54	0,51
Точность опыта, Sx%			2,67	1,63	2,11

Без применения минеральных удобрений действие и последействие навоза обеспечивало в среднем увеличение продуктивности 1 га севооборота на 10,6–11,0 %, запашка сидератов – на 10,3–11,1 % и соломы – на 10,8–11,7 %; действие и последействие всех изучаемых органических удобрений в комплексе увеличивало продуктивность 1 га на 12,5 % по сравнению с контрольным вариантом без удобрений. Самая большая урожайность культур орошаемого севооборота и его продуктивность были отмечены в вариантах с изучением действия и последействия внесения органических удобрений совместно с рекомендуемой нормой минеральных удобрений – на 13,2–23,2 % больше, чем в контроле без удобрений [1, 18].

При комплексном внесении всех видов органики и применении их с рекомендуемой нормой NPK урожайность культур севооборота возрастала на 23,2 %. Уменьшение вдвое нормы минеральных удобрений (1/2 NPK) в сочетании с органическими удобрениями вело к уменьшению урожайности культур озимой пшеницы, кукурузы, гороха и продуктивности 1 га севооборота на 12,4–20,6 %; при внесении 1/3 от рекомендуемой нормы показатели продуктивности 1 га севооборота и урожайности уменьшались на 11,7–17,5 % по сравнению с показателями при внесении всей рекомендуемой нормы [1, 17].

Урожайность возделываемых сельскохозяйственных культур была тесно связана с применяемыми системами удобрения. Результаты исследований позволили установить, что использование всех видов органических удобрений без внесения минеральных уменьшало потери урожайности сельскохозяйственных культур. Применение рекомендуемых норм минеральных удобрений совместно с использованием приемов биологизации, таких как измельчение и глубокая запашка сидератов, листостебельной массы кукурузы, пожнивных остатков соломы и навоза, обеспечивало повышение урожайности возделываемых культур, а также оказывало положительное влияние на агрегатное состояние почвы. На полях с длительным применением листостебельной массы кукурузы, соломы и сидератов сложился стабильно более высокий уровень биологической активности почвы [1, 18].

Так, применение азотных удобрений на фоне внесения измельченных растительных остатков обеспечивало увеличение суммарной продуктивности зернового и зернопропашного звеньев севооборота на 12,0–17,9 % [9, 10].

В зернопропашном звене заделка растительных остатков с азотным удобрением увеличивала урожайность сельскохозяйственных культур по отношению к контролю. Повышенная продуктивность зернового и зернопропашного звеньев севооборотов в опыте отмечена при внесении растительных остатков и азота. В этих звеньях севооборотов выявлено положительное воздействие азотных удобрений на массу семян и химический состав продукции [1, 19].

Изменение баланса гумуса представлено на основе наблюдений за 3-летний период – с 2016-го по 2018 год. Так, в контрольном варианте без внесения удобрений содержание гумуса уменьшилось с исходных 3,33 % до 2,69–2,73 % на период исследований, т. е. на 19,2 %. При использовании рекомендованной нормы NPK потери гумуса составили 11,7 %, а при внесении 1/2 и 1/3 NPK – 13,2 и 14,9 % соответственно. Использование органических удобрений без внесения минеральных уменьшает потери и способствует сохранению содержания гумуса почвы на уровне незначительно ниже исходной величины: при внесении навоза – на 1,6 %, использовании сидератов – на 3,8 %, соломы – на 3,9 %. При использовании рекомендуемых норм минеральных удобрений совместно с сидератами, соломой и навозом был обеспечен положительный баланс гумуса и увеличилось его содержание на 4,7–8,9 %. При применении всех изучаемых биоресурсов совместно с рекомендуемой нормой NPK отмечено наибольшее увеличение содержания гумуса в почве – на 13,6 % (табл. 3) [4, 7].

Таблица 3. Влияние удобрений и орошения на динамику содержания гумуса в слое почвы 0–20 см, % (опыт заложен в 1979 г.)

Table 3. The influence of fertilizers and irrigation on the dynamics of humus content in the soil layer 0–20 cm, % (experiment started in 1979)

Годы / Варианты	1979	2016	2017	2018
Без удобрений (контроль)	3,33 100	2,73 81,9	2,75 82,6	2,69 80,8
Рекомендуемые минеральные удобрения (NPK)	3,33 100	3,00 90,1	2,91 87,3	2,94 88,3
1/2 NPK	3,33 100	2,97 89,1	2,86 86,0	2,89 86,8
1/3NPK	3,33 100	2,94 88,4	2,82 84,6	2,83 85,1
Навоз (10 т/га в год)	3,33 100	3,29 98,7	3,23 96,9	3,28 98,4
Навоз + NPK	3,33 100	3,60 108,2	3,53 106,1	3,59 108,9
Сидераты	3,33 100	3,23 97,1	3,22 96,6	3,20 96,2
Сидераты +NPK	3,33 100	3,51 105,3	3,48 104,4	3,50 105,2
Солома	3,33 100	3,22 96,6	3,19 95,7	3,20 96,1
Солома + NPK	3,33 100	3,47 104,2	3,44 103,3	3,49 104,7
Навоз + сидераты + солома	3,33 100	3,41 102,3	3,39 101,9	3,49 104,8
Навоз + сидераты + солома + NPK	3,33 100	3,73 111,9	3,75 112,7	3,78 113,6

Наблюдения позволили установить незначительные изменение динамики содержания гумуса в почве в зависимости от применяемой системы удобрений и климатических условий. Установлено, что применение органических удобрений в севообороте – внесение навоза, возделывание и запашка сидератов, заделка в почву соломы озимой пшеницы и листостебельной массы кукурузы на месте их произрастания – способствовало сохранению гумуса в почве практически на уровне исходной величины.

Водный режим почвы на полях опыта также является одним из основных факторов, определяющих урожайность сельскохозяйственных культур. В орошаемых условиях КБР, на черноземе обыкновенном карбонатном уровень почвенной влажности, способствующий получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур, составляет не ниже 75–80% НВ. Такой режим почвенной влажности поддерживался с помощью влагозарядковых и вегетационных поливов. Поливные нормы изменялись в зависимости от биологических особенностей возделываемой культуры и климатических условий года. Так, за исследуемые три года средние значения поливных норм в зависимости от климатических условий колебались для: озимой пшеницы – от 780 до 1950 $м^3$/га, гороха – от 440 до 580 $м^3$/га, кукурузы – от 470 до 600 $м^3$/га, что положительно влияло на развитие и повышение урожайности сельскохозяйственных культур [6, 9, 18].

Исследования показали, что производство сельскохозяйственной продукции при применении высокоэффективных приемов биологизации, таких как запашка соломы и листостебельной массы кукурузы с рекомендуемой нормой минеральных удобрений и комплексным вне-

сением всех изучаемых видов органических удобрений совместно с NPK, более рентабельно, чем применение одних только минеральных удобрений. Их положительное воздействие возрастает в связи с тем, что совместное применение биоресурсов с минеральными удобрениями способствует получению более высоких урожаев полевых культур хорошего качества, а также влияет на сохранение и воспроизводство плодородия почвы [1, 4, 20].

Заключение

Таким образом, нашими исследованиями определено, что с целью повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий в условиях орошаемого земледелия, а также для сохранения и воспроизводства почвенного плодородия производители сельскохозяйственной продукции должны использовать все возможные источники поступления органического вещества в почву, а именно: внесение навоза под пропашные культуры севооборотов нормой не менее 30 т/га, запашку измельченной соломы колосовых культур и листостебельной массы кукурузы на месте их произрастания, возделывание и заделку сидеральных культур после уборки колосовых и других раноубираемых предшественников совместно с рекомендуемой нормой минеральных удобрений. Данные биологические приемы способствуют получению урожая зерна озимой пшеницы – 57–61,2 ц/га, кукурузы – 40,5–49,6 ц/га, гороха – 31,2–36,4 ц/га.

Исследования, проведенные за трехлетний период (2016–2018 гг.), показали, что эффективность приемов биологизации при совместном внесении рекомендуемых норм минеральных удобрений под возделываемые культуры существенно возрастала, что положительно сказалось на продуктивности и улучшении комплексных свойств почвы, определяющих ее плодородие, а также на урожайности возделываемых в опыте культур.

В результате наблюдений были установлены незначительные изменения динамики содержания гумуса в почве в зависимости от применяемой системы удобрений и климатических условий. Из наблюдений видно, что применение органических удобрений в севообороте способствовало сохранению гумуса в почве практически на уровне исходной величины. Использование рекомендуемых норм минеральных удобрений совместно с сидератами, соломой и навозом обеспечило положительный баланс гумуса и увеличило его содержание в почве.

Также было выявлено, что на черноземе обыкновенном карбонатном в орошаемых условиях КБР поддержание почвенной влажности с помощью влагозарядковых и вегетационных поливов не ниже уровня 75–80 % НВ является одним из основных факторов, определяющих получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лифаненкова Т. П., Бижоев Р. В.* Роль биологических ресурсов в воспроизводстве плодородия чернозема обыкновенного в Центральном Предкавказье // Земледелие. 2019. № 2. С. 20–23.

2. *Котяк П. А., Чебыкина Е. В., Воронин А. Н.* Формирование показателей плодородия почвы в зависимости от различных систем удобрения вико-овсяной смеси // Международная научно-практическая конференция «Технологические аспекты возделывания сельскохозяйственных культур», 20–21 декабря 2019 г., Горки, Беларусь.

3. *Прянишников Д. Н.* Азот в жизни растений и в земледелии СССР. Юбилейный выпуск. Москва: Тип. В.И.П. Арт, 2015.

4. *Лифаненкова Т. П.* Использование биологических ресурсов и средств химизации при воспроизводстве плодородия орошаемого чернозема обыкновенного карбонатного // Международные научные исследования. 2015. № 3(24). С. 159–162.

5. *Лифаненкова Т. П., Бижоев Р. В.* Влияние систематического применения удобрений на продуктивность пашни и плодородие чернозема обыкновенного // Материалы международ-

ной научно-практической конференции «Приемы повышения плодородия почв и эффективности удобрений». 18–20 декабря 2018 года. Горки. Респ. Беларусь. 2019. Часть 1. С. 79–82.

6. *Лифаненкова Т. П., Бижоев Р. В, Бижоев М. В.* Мониторинг плодородия чернозема обыкновенного при длительном орошении и применении систем удобрения в агроландшафтном земледелии Кабардино-Балкарии / Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями Российский Федераций (к 70-летию Геосети). Москва, 2011. С. 352–368.

7. *Лифаненкова Т. П., Бижоев Р. В.* Свойства орошаемого чернозема обыкновенного при биологизации приемов воспроизводства плодородия // Земледелие. 2012. № 6. С. 24–26.

8. *Русакова И. В., Кулинский Н. А., Мосалева А. А.* Солома как важный фактор биологизации // Земледелие. 2003. № 1. С. 9.

9. *Бижоева Т. П., Бижоев Р. В., Сарбашева А. И., Кушхабиев А. З.* Формирование урожая сельскохозяйственных культур зернотравянопропашного и зернопропашного севооборотов в различных условиях водного и минерального питания в степной зоне Центрального Предкавказья // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 133–144.

10. *Лифаненкова Т. П.* Изменение водно-физических свойств обыкновенного карбонатного чернозема и продуктивности орошаемого севооборота под действием удобрений и обработки почвы в условиях степной зоны Кабардино-Балкарии // Агрохимия. 1989. № 8. С. 35–42.

11. *Бижоева Т. П.* Комплексное использование средств химизации и биологических ресурсов при воспроизводстве плодородия орошаемого чернозема обыкновенного карбонатного в степной зоне Центрального Предкавказья // Сборник научных докладов Всероссийской научно-практической конференции «Состояние почв Центрального Черноземья России и проблема воспроизводства их плодородия» 23–24 июня 2015 г. Каменная степь. С. 92–96.

12. *Доспехов Б. А.* Планирование полевого опыта и статистическая обработка данных. Москва: Колос, 1972. 207 с.

13. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат, 1985. 352 с.

14. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Часть 1. Методика проведения опытов и анализ почв. Москва: ВАСХНИЛ, ВИУА, 1975. 168 с.

15. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Часть 2. Программа и методы исследования почв. М.: ВАСХНИЛ, ВИУА, 1983. 172 с.

16. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Часть 3. Анализ растений. Москва: ВАСХНИЛ, ВИУА, 1985. С. 132.

17. *Харитонов В. В., Шахов С. С.* Оценка влияния сидератов на агрохимические показатели почвы // Агрохимический вестник. 2016. № 3. С. 39–43.

18. *Бижоев В. М.* Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы, баланс питательных веществ и продуктивность севооборота в степной зоне Кабардино-Балкарской АССР // Агрохимия. 1988. № 5. С. 37–44.

19. *Науметов Р. В.* Влияние различных систем удобрений на динамику изменения баланса питательных веществ в звене севооборота // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние почвенного покрова, сохранение и воспроизводство плодородия почв», 14–15 августа 2018 г., Махачкала. С. 75–78.

20. *Бижоева Т. П., Бижоев Р. В.* Особенности системы применения удобрения озимой пшеницы в неорошаемых и орошаемых условиях степной зоны Центрального Предкавказья в связи с изменением климата // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2017. № 4(78). С. 118–124.

REFERENCES

1. Lifanenkova T.P., Bizhoev R.V. The role of biological resources in the reproduction of the fertility of ordinary chernozem in the Central Ciscaucasia. *Zemledelie* [Agriculture]. 2019. No. 2. Pp. 20–23. (In Russian)

2. Kotyak P.A., Chebykina E.V., Voronin A.N. Formation of soil fertility indicators depending on various fertilizer systems of vetch-oat mixture. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Tekhnologicheskiye aspekty vozdelyvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur". 20–21 dekabrya 2019*. Gorki, Belarus. (In Russian)

3. Pryanishnikov D.N. Nitrogen in the life of plants and in agriculture of the USSR. Anniversary issue. Moscow: V.I.P. Art, 2015. (In Russian)

4. Lifanenkova T. P. The use of biological resources and chemicalization means in reproducing the fertility of irrigated ordinary carbonate chernozem. *Mezhdunarodnyye nauchnyye issledovaniya.* [International scientific research]. 2015. No. 3(24). Pp. 159–162. (In Russian)

5. Lifanenkova T.P., Bizhoev R.V. The influence of the systematic use of fertilizers on the productivity of arable land and the fertility of ordinary chernozem. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Priyemy povysheniya plodorodiya pochv i effektivnosti udobreniy". 18–20.12. 2018.* Gorki, Belarus. 2019. Part 1. Pp. 79–82. (In Russian)

6. Lifanenkova T.P., Bizhoev R.V., Bizhoev M.V. Monitoring the fertility of ordinary chernozem with long-term irrigation and the use of fertilizer systems in agrolandscape farming in Kabardino-Balkaria. *Rezul'taty dlitel'nykh issledovaniy v sisteme Geograficheskoy seti opytov s udobreniyami Rossiyskiy Federatsiy (k 70-letiyu Geoseti)*. [Results of long-term studies in the system of the Geographical Network of Experiments with Fertilizers Russian Federation (to the 70th anniversary of the Geonetwork)]. Moscow, 2011. Pp. 352–368. (In Russian)

7. Lifanenkova T.P., Bizhoev R.V. Properties of irrigated ordinary chernozem during biologization of fertility reproduction methods]. *Zemledelie* [Agriculture]. 2012. No. 6. Pp. 24–26. (In Russian)

8. Rusakova I.V., Kulinsky N.A., Mosaleva A.A. Straw as an important factor of biologization. *Zemledelie* [Agriculture]. 2003. No. 1. P. 9. (In Russian)

9. Bizhoeva T.P., Bizhoev R.V., Sarbasheva A.I., Kushkhabiev A.Z. Formation of the yield of agricultural crops in grain-grass-row-crop and grain-row crop rotations under various conditions of water and mineral nutrition in the steppe zone of the Central Ciscaucasia. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2020. No. 6(98). Pp. 133–144. (In Russian)

10. Lifanenkova T.P. Changes in the water-physical properties of ordinary carbonate chernozem and the productivity of irrigated crop rotation under the influence of fertilizers and soil cultivation in the conditions of the steppe zone of Kabardino-Balkaria. *Agrokhimiya*. 1989. No. 8. Pp. 35–42. (In Russian)

11. Bizhoeva T.P. Integrated use of chemicalization means and biological resources in reproducing the fertility of irrigated ordinary carbonate chernozem in the steppe zone of the Central Ciscaucasia. *Sbornik nauchnykh dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sostoyaniye pochv Tsentral'nogo Chernozem'ya Rossii i problema vosproizvodstva ikh plodorodiya". 23–24.06.2015.* Kamennaya step, 2015. Pp. 92–96. (In Russian)

12. Dospehov B.A. *Planirovaniye polevogo opyta i statisticheskaya obrabotka dannykh* [Planning of field experience and statistical data processing]. Moscow: Kolos, 1972. 207 p.

13. Dospehov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Methodology of field experience]. Moscow: Agropromizdat, 1985. 352 p.

14. *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu issledovaniy v dlitel'nykh opytakh s udobreniyami* [Guidelines for conducting research in long-term experiments with fertilizers]. Part 1. *Metodika provedeniya opytov i analiz pochv* [Experimental methodology and soil analysis]. Moscow: VASKHNIL, VIUA, 1975. 168 p.

15. *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu issledovaniy v dlitel'nykh opytakh s udobreniyami* [Guidelines for conducting research in long-term experiments with fertilizers]. Part 2. *Programma i metody issledovaniya pochv* [Soil research program and methods]. Moscow: VASKHNIL, VIUA, 1983. 172 p.

16. *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu issledovaniy v dlitel'nykh opytakh s udobreniyami* [Guidelines for conducting research in long-term experiments with fertilizers]. Part 3. *Analiz rasteniy* [Plant analysis]. Moscow: VASKHNIL, VIUA, 1985. P. 132.

17. Kharitonov V.V., Shakhov S.S. Assessment of the influence of green manure on the agro-chemical indicators of the soil. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin]. 2016. No. 3. Pp. 39–43.

18. Bizhoev V.M. The influence of long-term use of fertilizers on soil fertility, nutrient balance and crop rotation productivity in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Autonomous Soviet Socialist Republic. *Agrokhimiya*. 1988. No. 5. Pp. 37–44.

19. Naumetov R.V. The influence of various fertilizer systems on the dynamics of changes in the balance of nutrients in the crop rotation. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennoye sostoyaniye pochvennogo pokrova, sokhraneniye i vosproizvodstvo plodorodiya pochv". 14–15.08.2018*. Makhachkala, Dagestan. Pp. 75–78.

20. Bizhoeva T.P., Bizhoev R.V. Features of the system for applying winter wheat fertilizer in rain-fed and irrigated conditions of the steppe zone of the Central Ciscaucasia in connection with climate change. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* No. 4(78). 2017. Pp. 118–124.

Информация об авторах

Бижоев Руслан Валерьевич, науч. сотр., Институт сельского хозяйства – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;
bizhoeva49@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5408-3006
Бижоев Мурат Валерьевич, науч. сотр., Институт сельского хозяйства – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7665-3719

Information about the authors

Bizhoev RuslanValerievich, Researcher, Institute of Agriculture – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;
bizhoeva49@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5408-3006
Bizhoev Murat Valerievich, Researcher, Institute of Agriculture – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7665-3719

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЭКОНОМИКЕ

УДК 330.4 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-282-289
EDN: TKALZS

Экономико-математическое моделирование загрязнения окружающей среды региональных территорий*

С. И. Шагин, А. Г. Езаова

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

Аннотация. Статья посвящена построению производственных функций методами теории дробных производных, применяемых для оценки факторов загрязнения окружающей среды с учетом совокупности глобальных экологических и экономических вызовов. При построении изучаемой экономико-математической модели учитываются два основных критерия зеленой экономики: обеспечение сохранности окружающей среды и повышение качества жизни населения. Впервые при моделировании подобных задач вместо классической целевой функции в модели участвует двухфакторная производственная функция Кобба–Дугласа специального вида, учитывающая фрактальность пространства окружающей среды. В работе доказано, что модель можно свести к дифференциальному уравнению с дробной производной типа Капуто, имеющему при определенных значениях коэффициентов и показателей степени производственной функции регулярное решение.

Ключевые слова: функция Кобба–Дугласа, загрязнение окружающей среды, производная Капуто, моделирование, зеленая экономика, оператор дробной производной Римана–Лиувилля

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 04.12.2023, принята к публикации 09.12.2023

Для цитирования. Шагин С. И., Езаова А. Г. Экономико-математическое моделирование загрязнения окружающей среды региональных территорий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 282–289. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-282-289

JEL: C32 Original article

Economic and mathematical modeling of environmental pollution of regional territories*

S.I. Shagin, A.G. Ezaova

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

Abstract. The article is devoted to the construction of production functions using the methods of the theory of fractional derivatives used to assess environmental pollution factors, taking into account the totality of global environmental and economic challenges. When constructing the economic and mathematical model under study, two main criteria of a green economy are taken into account: ensuring the preservation of the environment and improving the quality of life of the population. For the first time, when modeling such problems, instead of the classical objective function, the model uses a two-factor Cobb–Douglas production function of a special type, taking into account the fractal nature of the

© Шагин С. И., Езаова А. Г., 2023

* Работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030»

* The work was carried out within the framework of the Priority 2030 program

environmental space. The work proves that the model can be reduced to a differential equation with a fractional derivative of the Caputo type, which has a regular solution for certain values of the coefficients and exponents of the production function.

Keywords: Cobb–Douglas function, environmental pollution, Caputo derivative, modeling, green economy, Riemann–Liouville fractional derivative operator

Submitted 27.11.2023, approved after reviewing 04.12.2023, accepted for publication 09.12.2023

For citation. Shagin S.I., Ezaova A.G. Economic and mathematical modeling of environmental pollution of regional territories. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 282–289. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-282-289

Введение

Борьба с загрязнением окружающей среды – одна из главнейших целей зеленой экономики. Благодаря современным производственным и искусственным технологиям в окружающую среду поступает неимоверное количество органических и неорганических веществ, микроорганизмов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Продукты жизнедеятельности человека, отходы работы промышленности скапливаются в несвойственных природе концентрациях, превышающих фоновые значения в воздухе, ландшафтах, почвах, геологической среде, природных водах, угрожая всему живому на территории. Несмотря на то, что загрязнение окружающей среды может быть обосновано и естественными причинами, авторы при моделировании ситуации будут рассматривать только техногенные характеристики загрязнения. Промышленность, энергетика, транспорт, деятельность жилищно-коммунального хозяйства являются главными производящими загрязнение формами экономики Кабардино-Балкарской Республики.

Построение математической модели

Рассмотрим подробнее ситуацию, которая сложилась в указанном регионе. В условиях требований природно-климатического благополучия региона вопросу очистки воздушного пространства республики уделяется особое внимание. Главная цель – уменьшение концентрации диоксидов углерода и серы, метана, оксида азота. Их наличие влияет в первую очередь на туристическо-рекреационный кластер региона. В Кабардино-Балкарии базовыми источниками воздушного загрязнения (60–70 % из которых химические) являются промышленные предприятия, строительные фирмы, дорожный и транспортный комплекс. Нельзя забывать и о транспорте. Уровень автомобилизации в КБР за весь исследуемый период был ниже общероссийского, однако темпы автомобилизации населения выше общероссийских. Так, с 2015-го по 2019 год уровень автомобилизации в КБР поднялся более чем на 16 % от среднего в целом по стране. По другим данным, это 280 легковых автомобилей на 1000 жителей. На сегодняшний день в республике зарегистрировано более 317 113 единиц автотранспорта.

В последние годы загрязненность воздуха стационарными источниками значительно снизилась. На это повлияли спад промышленности, прекращение производственной деятельности. Так, например, за 2020 год в атмосферный воздух КБР от стационарных источников поступило 3 297 тонн вредных (загрязняющих) веществ, что на 10 % меньше, чем в 2018 году. В КБР практикуется для снижения вредных выбросов в атмосферу применение инновационных технологий и актуального научного оборудования. Например, на некоторых предприятиях промышленности установлены системы очистки отходящих газов, позволяющие улавливать и обрабатывать вредные вещества. Для борьбы с загрязнением атмосферы от автомобильных выхлопов в Кабардино-Балкарской республике проводятся мероприятия по развитию общественного транспорта и

популяризации экологически чистых видов транспорта, таких как электромобили. Также осуществляется контроль за содержанием вредных веществ в выхлопных газах автомобилей и проводятся проверки на соответствие экологическим нормам. Однако, несмотря на предпринимаемые меры, проблема загрязнения атмосферы остается актуальной. Для решения этой проблемы необходимо дальнейшее совершенствование технологий и внедрение более эффективных методов очистки выбросов, а также осознанное использование автомобилей и других источников загрязнения с целью сокращения их влияния на окружающую среду.

Обозначим через $x_1 = x_1(t)$ уровень загрязнения воздушного бассейна в регионе. Здесь $t -$ время, естественно, эта переменная положительная, поскольку речь идет о физической модели в реальном времени. Тогда скорость роста уровня загрязнения атмосферы будет равна $\frac{dx_1}{dt}$. Предположим, что загрязнение происходит с определенной зависимостью n_1 -й степени. Т.е. уровень загрязнения возводится в степень n_1. Поскольку против загрязнения проводятся специальные меры, которые уменьшают уровень загрязнения, то легко можно показать, что функция $x_1 = x_1(t)$ является решением уравнения Бернулли вида:

$$\frac{dx_1}{dt} = Q_1(t)x_1^{n_1}(t) - P_1(t)x_1(t),$$

где $Q_1(t) -$ функция – коэффициент загрязнения, а $P_1(t) -$ функция – коэффициент предотвращения загрязнения, построенные на основе экспериментальных данных с использованием, например, метода наименьших квадратов.

Второй экологический фактор – загрязнение водных ресурсов. Сброс в воду различных веществ дает физические, биологические и химические загрязнения в жидких, твердых и газообразных формах. В процессе моделирования учитываются механические, химические, тепловые, бактериальные и биологические типы загрязнений. При определении параметров загрязнения учитываются также источники загрязнения внутренних вод. Отметим, что наибольшим уровнем промышленного загрязнения в КБР выделяется река Баксан. Учитывая сказанное, по длине русла установлено 12 водостоков, позволяющих наблюдать за показателями качества. Общая протяженность трубопроводов в республике – 3550 км с изношенностью 65–70 %.

Вводя аналогичные предположения, строим модель загрязнения водного бассейна КБР. По аналогии со сказанным выше обозначим через $x_2 = x_2(t)$ уровень загрязнения водного бассейна. Тогда будет иметь место следующее уравнение:

$$\frac{dx_2}{dt} = Q_2(t)x_2^{n_2}(t) - P_2(t)x_2(t),$$

где $Q_2(t) -$ функция – коэффициент загрязнения, а $P_2(t) -$ функция – коэффициент предотвращения загрязнения, построенные на основе экспериментальных данных с использованием, например, метода наименьших квадратов.

Особое внимание при моделировании необходимо уделить уровню загрязнения почв КБР. Нужно отметить, что эрозии подвержены более половины земель республики. На пастбищах присутствуют эффект изреженности, обнищание геоботанического состава травостоя. Наиболее загрязнены почвы Прохладненского района. Еще одним важным параметром моделирования является лесная зона республики. В основном это широколиственные, хвойные и дикоплодовые деревья и кустарники. Вся зона относится к защитным лесам. Ежегодно при разливе горных рек затапливается более 8 тысяч гектаров леса. Серьезная проблема загрязнения окружающей среды – наличие в республике нерегулируемых мусорных полигонов, помимо 112 свалок и 2 полигонов, внесенных

в реестр. Их общая площадь составляет 202,91 га. Ни один из них не отвечает современным требованиям природоохранного законодательства. Более того, 80 % несанкционированных свалок находятся в природоохранных зонах водоемов. По мнению экспертов, в регионе сложилась сложная ситуация с вывозом и переработкой мусора. И все это требует повышенного внимания специалистов. Важное значение в таком случае имеет возможность смоделировать создавшуюся ситуацию.

Таким образом обозначим $x_1 = x_1(t)$ – загрязнение воздуха; $x_2 = x_2(t)$ – загрязнение воды; $x_3 = x_3(t)$ – вырубка леса; $x_4 = x_4(t)$ – истощение полезных ископаемых; $x_5 = x_5(t)$ – увеличение количества мусора; $x_6 = x_6(t)$ – захоронение ядерных отходов; $x_7 = x_7(t)$ – глобальное потепление; $x_8 = x_8(t)$ – сокращение биоразнообразия; $x_9 = x_9(t)$ – звуковое разнообразие.

Система уравнений

$$\frac{dx_i}{dt} = Q_i(t)x_i^{n_i}(t) - P_i(t)x_i(t),$$

где $i = 1,2,\dots,9$; $Q_i(t)-$ функция – коэффициент загрязнения, а $P_i(t)-$ функция – коэффициент предотвращения загрязнения, построенные на основе экспериментальных данных с использованием, например, метода наименьших квадратов, моделирует систему защиты региона по уровням основных загрязнений. Решая систему, мы находим $x_i = x_i(t)$ – уровни загрязнения.

Совокупность всех угроз можно представить в виде функциональной матрицы: $X(t) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9)$, компоненты которой – неотрицательные числа, где t – положительная переменная времени.

Введем в рассмотрение величину $L = L(t)$ – функцию затрат на ликвидацию последствий загрязнения окружающей среды. Тогда производственную функцию состояния окружающей среды можно определить, как функцию вида:

$$y(t) = f\big(X(t), L(t)\big), \tag{1}$$

где $y(t)$ – состояние окружающей среды, $X(t)$ – вектор-функция факторов угроз, $L(t)$ – капиталовложение на ликвидацию влияния факторов угроз, причем значения всех переменных (y, X, L) – неотрицательные. Функция (1) должна быть положительной и возрастающей по всем компонентам. Попытаемся определить внешний вид функции, стоящей в правой части (1).

Так как функция угроз $X(t)$ возрастает с течением времени, то функция затрат $L(t)$ также будет возрастать с течением времени, а следовательно, возрастает и функция $y(t)$.

Область определения модельной функции $y(t)$ назовем экономической областью модели, а функцию $f(X(t), L(t))$ назовем положительно однородной степенью μ, если выполняется тождество $f(tX, tL) = t^{\mu} f(X, L)$.

Состояние окружающей среды представляет собой сложную открытую экосистему, в которую входят множество компонентов. Именно поэтому построение идеальной модели не представляется возможным. Попробуем представить правую часть (1) в виде функции Кобба–Дугласа [5]. Производственная функция Кобба–Дугласа устанавливает зависимость факторов угроз и капиталовложения [6]. В этом случае мы должны понимать, что выбранная нами функция не учитывает такие моменты, как процесс влияния всех факторов на состояние окружающей среды, в связи с чем применение ее не дает абсолютно точных результатов. Если же говорить об обобщенных экономических моделях, то нельзя не подчеркнуть, что функция Кобба–Дугласа получила широкое распространение в моделировании экономических задач, в том числе и зеленой экономики [7].

Рассмотрим производственную функцию *y(t)* в виде функции Кобба–Дугласа:

$$y(t) = f\big(X(t), L(t)\big) = A \cdot X^a \cdot L^b, \quad (2)$$

где функция $y(t)$ – функция положительно однородной степени $\mu = a + b$, причем $0 < a < 1$ – коэффициент эластичности по фактору угроз; $0 < b < 1$ – коэффициент эластичности по капиталовложению; A – коэффициент пропорциональности, он учитывает влияние факторов, не вошедших в уравнение (2), их конкретные числовые значения определяются на основе статистических данных с помощью численных методов.

Параметры a и b играют важную роль при расчетах эластичности факторов и отражают пропорцию, в которой изменения соотношения факторов угроз влияют на капиталовложение при прочих равных условиях. При этом необходимо учитывать три возможных варианта:

1. В случае, когда $\mu = 1$, состояние окружающей среды не ухудшается, но и не улучшается. При росте факторов угроз и капитала состояние окружающей среды изменяется прямо пропорционально входящим в уравнение переменным. В этом случае производственная функция является линейно-однородной.

2. Если $\mu > 1$, состояние окружающей среды улучшается. Наблюдается положительная динамика состояния окружающей среды.

3. При $\mu < 1$ состояние окружающей среды ухудшается. Отрицательная динамика состояния окружающей среды.

Каждый из рассматриваемых параметров характеризуется средней и предельной величиной. Функции вида

$$\frac{y}{X} = A \cdot X^{a-1} \cdot L^b, \qquad \frac{y}{L} = A \cdot X^a \cdot L^{b-1}$$

называются средними переменными по увеличению факторов угроз и затрат.

Показатели предельной скорости изменения факторов угроз и предельной фондоотдачи определяются как частные производные

$$\frac{\partial y}{\partial X} = A \cdot a \cdot X^{a-1} \cdot L^b, \quad \frac{\partial y}{\partial L} = A \cdot b \cdot X^a \cdot L^{b-1}.$$

Как видно из выражений, предельная фондоотдача и предельная скорость изменения факторов угроз отличаются от средних лишь на множители b и a. Так как эти множители меньше 1, то предельная фондоотдача и предельная скорость изменения факторов угроз в производственной функции Кобба–Дугласа ниже средней.

Эластичность по факторам угроз и по затратам соответственно определяется выражениями

$$a = \frac{\partial y}{\partial X} \cdot \frac{X}{y} = \frac{\partial lny}{\partial lnX}, \quad b = \frac{\partial y}{\partial L} \cdot \frac{L}{y} = \frac{\partial lny}{\partial lnL}.$$

Свойство вогнутости класса функций (2) устанавливается анализом изоквант и вторых производных, составляющих матрицу Гессе.

Матрица Гессе для функции вида (2) принимает вид:

$$H(X,L) = \begin{vmatrix} \frac{a(a-1)}{X^2} & \frac{ab}{XL} \\ \frac{ab}{XL} & \frac{b(b-1)}{L^2} \end{vmatrix} \cdot y(X,L).$$

Взаимодействующие в рамках производственной функции параметры в известном смысле могут замещать друг друга. На основе производственной функции можно рассчитать предельную норму замещения. Так, предельные нормы замещений для функции вида (2) равны

$$\frac{\partial X}{\partial L} = \left(\frac{y}{A}\right)^{\frac{1}{a}} \cdot L^{-\frac{b}{a}}, \quad \frac{\partial L}{\partial X} = \left(\frac{y}{A}\right)^{\frac{1}{b}} \cdot X^{-\frac{a}{b}}.$$

Изокванты

$$E(y) = \{(X, L) \geq 0 : y = f(X, L\}$$

функции (2) представляются функциями замещения угроз затратами $X_y(L)$ или затрат угрозами $L_y(X)$.

Усложним внешний вид функции Кобба–Дугласа:

$$y = A(\delta X^a + (1 - \delta)L^b)^\gamma, \tag{3}$$

где $y = y(t)$ – функция, описывающая состояние окружающей среды, причем положительно однородной степени $\mu = a + b$, $0 < \mu < 1$; $X(t)$ – вектор-функция факторов угроз, $L(t)$ – капиталовложение на ликвидацию влияний факторов угроз, $0 < a < 1$ – коэффициент эластичности по фактору угроз; $0 < b < 1$ – коэффициент эластичности по капиталовложению; $\gamma = \frac{\mu}{ab}$ – ненулевая постоянная; A – коэффициент пропорциональности, он учитывает влияние факторов, не вошедших в уравнение (3), их конкретные числовые значения определяются на основе статистических данных с помощью численных методов.

Из выражения (3) выразим функцию $L(t)$ – капиталовложение в следующем виде:

$$\delta X^a + (1 - \delta)L^b = \left(\frac{y}{A}\right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (1 - \delta)L^b = \left(\frac{y}{A}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \delta X^a,$$

$$L^b = \frac{1}{1 - \delta}\left(\frac{y}{A}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \frac{\delta}{1 - \delta}X^a.$$

Производные нецелого порядка могут применяться для описания различных экономических процессов. Одной из отличительных особенностей производной Капуто является то, что ее действие на постоянную функцию дает ноль. Применение производной Капуто в экономическом анализе позволяет получать нулевые значения предельного индикатора нецелого порядка для постоянной функции. Известны левосторонние и правосторонние производные Капуто. Мы рассмотрим только левостороннюю производную, так как экономический процесс в момент времени зависит только от изменений состояния этого процесса в прошлом.

Используя левостороннюю производную, можно определить среднюю величину капиталовложений, учитывая при этом эффекты памяти в рассматриваемом процессе.

Функции y и L зависят от времени $t \in [0, T]$, причем $y', L' \epsilon L[0; T]$ [1]. Тогда функция, характеризующая экономический процесс загрязнения окружающей среды, может быть описана уравнением

$$\partial_{0t}^{\alpha} L^b(t) = f(X, y), \tag{4}$$

где

$$f(X, y) = \frac{1}{1 - \delta}\left(\frac{y}{A}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \frac{\delta}{1 - \delta}X^a.$$

Здесь $\partial_{0t}^{\alpha} f$ – оператор дробной производной в смысле Капуто с параметром $0 < \alpha < 1$ [1, 2].

Предположим, что начальное значение функции загрязнения $L = L(t)$, т.е. в начальный момент времени $t = 0$ равно определенному значению, не равному нулю, и скорость загрязнения в начальный момент времени соответствует другой константе, также не равной нулю, т.е. имеет место краевое условие

$$L(0) = L_1 \neq 0, \;\; L'(0) = L_2 \neq 0. \tag{5}$$

Уравнение (4) преобразуем, действуя оператором дробной производной Римана–Лиувилля $D_{0t}^{-\alpha}$. Получим

$$D_{0t}^{-\alpha}\partial_{0t}^{\alpha}L^b(t) = D_{0t}^{-\alpha}f(X,y). \tag{6}$$

Рассмотрим левую часть выражения (6). С учетом равенства [3]

$$\partial_{0t}^{\alpha}L^b(t) = D_{0t}^{\alpha}L^b(t) - \frac{L^b(0)}{\Gamma(1-\alpha)}t^{-\alpha} - \frac{(L^b(t))'|_{t=0}}{\Gamma(2-\alpha)}t^{1-\alpha}$$

левая часть выражения (6) принимает вид:

$$D_{0t}^{-\alpha}\partial_{0t}^{\alpha}L^b(t) = D_{0t}^{-\alpha}D_{0t}^{\alpha}L^b(t) - \frac{L^b(0)}{\Gamma(1-\alpha)}D_{0t}^{-\alpha}t^{-\alpha} - \frac{bL^{b-1}(0)L'(0)}{\Gamma(2-\alpha)}D_{0t}^{-\alpha}t^{1-\alpha}.$$

Рассмотрим каждое слагаемое, входящее в последнее равенство, в отдельности [1, 3]:

$$D_{0t}^{-\alpha}D_{0t}^{\alpha}L^b(t) = L^b(t);$$

$$D_{0t}^{-\alpha}t^{-\alpha} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t \tau^{-\alpha}(t-\tau)^{\alpha-1}d\tau = \Gamma(1-\alpha);$$

$$D_{0t}^{-\alpha}t^{1-\alpha} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t \tau^{1-\alpha}(t-\tau)^{\alpha-1}d\tau = t\Gamma(2-\alpha),$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера [4].

С учетом полученных равенства и краевых условий (5) левая часть равенства (6) принимает вид:

$$D_{0t}^{-\alpha}\partial_{0t}^{\alpha}L^b(t) = L^b(t) - L^b(0) - bL^{b-1}(0)L'(0)t. \tag{7}$$

Зная значения функции $f(X,y)$

$$f(X,y) = \frac{1}{1-\delta}\left(\frac{y}{A}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \frac{\delta}{1-\delta}X^a,$$

правую часть выражения (6) можно переписать в виде:

$$D_{0t}^{-\alpha}f(X,y) = \frac{1}{1-\delta}\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{\gamma}}D_{0t}^{-\alpha}y^{\frac{1}{\gamma}}(t) - \frac{\delta}{1-\delta}D_{0t}^{-\alpha}X^a(t). \tag{8}$$

Приравнивая выражения (7) и (8), получаем уравнение с дробной производной Римана–Лиувилля, решение которого при определенных параметрах δ, γ, A имеет аналитическое решение. В общем случае уравнение решается численными методами.

Заключение

Таким образом, можно справедливо утверждать, что для анализа функций загрязнения окружающей среды логично использовать производственную функцию, в том числе функцию Кобба–Дугласа, выраженную посредством дробной производной, в том числе по Капуто.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нахушев А. М.* Дробное исчисление и его применение. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 272 с.
2. *Нахушев А. М.* Уравнения математической биологии. Москва: Высшая школа, 1995. 301 с.

3. *Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.

4. *Лебедев Н. Н.* Специальные функции и их приложения. Москва-Ленинград, 1953. 379 с.

5. *Клейнер Г. Б.* Производственные функции: теория, методы, применение. Москва: Финансы и статистика, 1986. 239 с.

6. *Горбунов В. К.* Производственные функции: теория и построение. Ульяновск, 2013. 85 с.

7. *Ашманов С. А.* Математические методы и модели в экономике. Москва: МГУ, 1980. 199 с.

REFERENCES

1. Nakhushev A.M. *Drobnoe ischislenie i ego primenenie* [Fractional calculus and its application]. Moscow: FIZMATLIT, 2003. 272 p. (In Russian)

2. Nakhushev A.M. *Uravneniya matematicheskoj biologii* [Equations of mathematical biology]. Moscow: Higher school, 1995. 301 p. (In Russian)

3. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. *Integraly i proizvodnye drobnogo poryadka i nekotorye ih prilozheniya* [Integrals and derivatives of fractional order and some of their applications]. Minsk: Science and Technology, 1987. 688 p. (In Russian)

4. Lebedev N.N. *Special'nye funkcii i ih prilozheniya* [Special functions and their applications]. Moscow-Leningrad, 1953. 379 p. (In Russian)

5. Kleiner G.B. *Proizvodstvennye funkcii: Teoriya, metody, primenenie* [Production functions: Theory, methods, application]. Moscow: Finance and Statistics, 1986. (In Russian)

6. Gorbunov V.K. *Proizvodstvennye funkcii: teoriya i postroenie* [Production functions: theory and construction]. Ulyanovsk, 2013. 85 p. (In Russian)

7. Ashmanov S.A. *Matematicheskie metody i modeli v ekonomike* [Mathematical methods and models in economics]. Moscow: MSU, 1980. 199 p. (In Russian)

Информация об авторах

Шагин Сергей Иванович, д-р геогр. наук, профессор кафедры биологии, геоэкологии и молекулярно-генетических основ живых систем Института химии и биологии, помощник ректора, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова;

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

uniid-sergey@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1784-5742

Езаова Алена Георгиевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры алгебры и дифференциальных уравнений, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова;

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

alena_ezaova@mail.ru

Information about the authors

Shagin Sergey Ivanovich, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Biology, Geoecology and Molecular Genetic foundations of living systems, Institute of Chemistry and Biology, Assistant Rector, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

uniid-sergey@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1784-5742

Ezaova Alena Georgievna, Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Algebra and Differential equations, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

alena_ezaova@mail.ru

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 338.26; 631.158, Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-290-306
EDN: TNCDNI

Модели развития «умных деревень» и механизм их внедрения на территории КБР

О. З. Загазежева, С. Х. Шалова, М. И. Мисостишхова

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможности решения проблем обезлюдивания сельских территорий и достижения устойчивого развития посредством внедрения технологий «умных деревень». Проведен демографический анализ сельских территорий РФ и, в частности, Кабардино-Балкарии, изучены принципы устойчивого развития и роль цифровизации на пути его достижения. Подробное внимание уделено концепции «Умная деревня» с рассмотрением примеров ее реализации и на основе этого определением ее ключевых характеристик. Дана оценка сельских территорий Кабардино-Балкарской Республики как потенциальной платформе для внедрения данной концепции. В статье авторами отмечена потребность в учете социальных, экономических, экологических и культурных аспектов территорий при внедрении концепции «Умная деревня».

Ключевые слова: «Умная деревня», смарт-фермерство, устойчивое развитие, сельские территории, депопуляция сельских территорий, обезлюдивание деревень, цифровизация

Поступила 17.11.2023, одобрена после рецензирования 28.11.2023, принята к публикации 04.12.2023

Для цитирования. Загазежева О. З., Шалова С. Х., Мисостишхова М. И. Модели развития «умных деревень» и механизм их внедрения на территории КБР // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 290–306. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-290-306

JEL: R11 Original article

Models for the development of “Smart Villages” and the technique of their implementation on the territory of the KBR

O.Z. Zagazezheva, S.Kh. Shalova, M.I. Misostishkhova

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article is devoted to the study of the possibility of solving the problems of “depopulation” of rural areas and achieving sustainable development through the introduction of “Smart Villages” technologies. A demographic analysis of rural territories of the Russian Federation and, in particular, Kabardino-Balkaria was carried out, the principles of sustainable development and the role of digitalization on the way to its achievement were studied. Detailed attention is paid to the concept of “Smart Village”, with consideration of examples of its implementation and, based on this, determination of its key characteristics. The assessment of rural territories of the Kabardino-Balkarian Republic as a potential platform for the implementation of this concept was given. In the article, the

© Загазежева О. З., Шалова С. Х., Мисостишхова М. И., 2023

authors noted the need to take into account the social, economic, environmental and cultural aspects of territories when implementing the concept of a “Smart Village”.

Keywords: “Smart Village”, smart farming, sustainable development, rural areas, depopulation of rural areas, depopulation of villages, digitalization

Submitted 17.11.2023, approved after reviewing 28.11.2023, accepted for publication 04.12.2023

For citation. Zagazezheva O.Z., Shalova S.Kh., Misostishkhova M.I. Models for the development of "Smart Villages" and the technique of their implementation on the territory of the KBR. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 290–306. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-290-306

Введение

Процесс урбанизации в России начал активно развиваться в середине 20 века в связи с индустриализацией страны и переходом к плановой экономике. С начала 1990-х годов в экономической и политической системе страны произошли кардинальные изменения, что привело к дальнейшему ускорению урбанизации: в поисках лучшего качества жизни сельское население стало мигрировать в города. Сейчас Россия является одной из самых урбанизированных стран мира, где на сельских территориях проживает лишь около 25 % населения.

Проблема обезлюдивания деревень на сегодняшний день является одной из актуальных социально-экономических проблем современной России. Государственные инициативы по достижению устойчивого развития призваны создать благоприятные условия для жителей села, поддерживать развитие сельского хозяйства.

Предметом научного исследования стало изучение концепции «Умная деревня» и вариантов ее реализации на практике.

Объектом является возможность апробации рассмотренных моделей на сельских территориях Кабардино-Балкарской Республики.

Достижение поставленной цели предполагается при решении значимых **задач**:

1. Демографическая оценка сельских территорий РФ.
2. Исследование концепции «Умная деревня» и примеров ее реализации с последующим выявлением ключевых особенностей.
3. Комплексная оценка сельских территорий КБР.
4. Описание особенностей внедрения моделей «Умных деревень» на сельских территориях Кабардино-Балкарии.

Методологической основой послужило исследование отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных проблемам развития сельских территорий, изучение докладов международных организаций на тему устойчивого развития, анализ статистических данных, а также методы логического и сравнительного анализа.

Проблема обезлюдивания деревень

Сокращение численности сельского населения является серьезной проблемой для многих стран. Это может привести к негативным социально-экономическим последствиям как для села, так и для города. За последние 10 лет наблюдается активное сокращение численности населения (рис. 1) и уровня рождаемости, а также увеличение уровня смертности на территориях сельских поселений (рис. 2).

Для сельских населенных пунктов следствием депопуляции становится ухудшение инфраструктуры, увеличение социальных проблем, уменьшение социально-экономической активности и аграрного производства, что непосредственно влияет на продовольственную

безопасность страны. В контексте крупных городов процессы миграции сельского населения увеличивают нагрузку на городскую инфраструктуру и рынки труда.

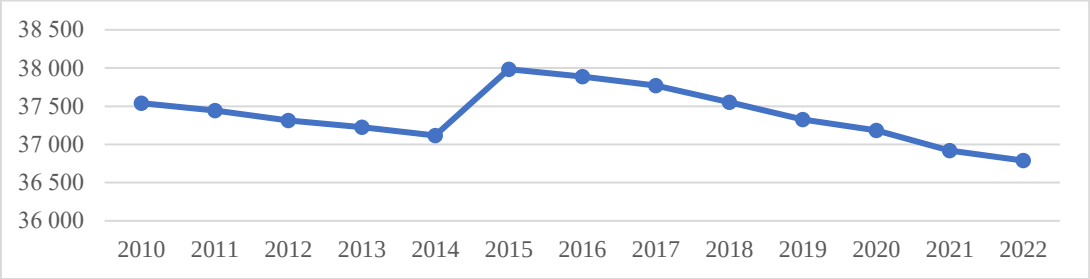


Рис. 1. *Динамика численности сельского населения РФ (тыс. чел.)*[1]

Fig. 1. *Dynamics of the rural population of the Russian Federation (thousand people)*

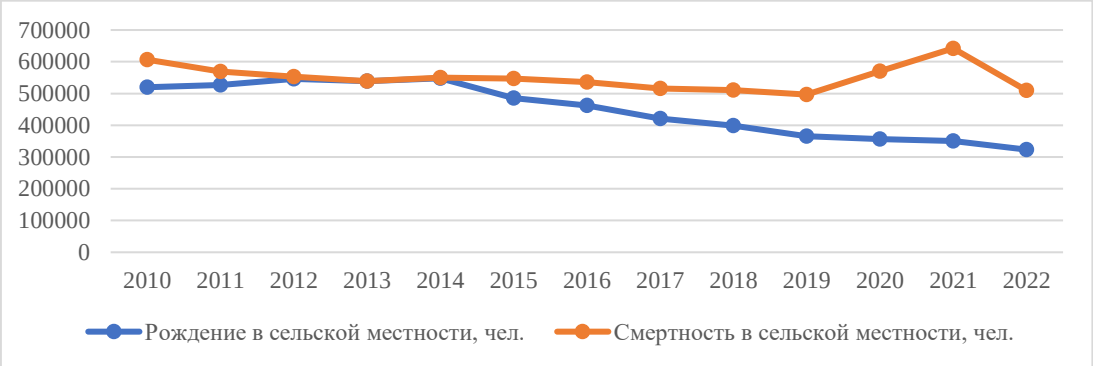


Рис. 2. *Динамика рождаемости и смертности в сельской местности РФ (чел.)*[1]

Fig. 2. *Dynamics of fertility and mortality in rural areas of the Russian Federation (persons)*

По данным переписи населения 2021 года, общее количество сельских населенных пунктов (СНП) составляет 153 157, в 24 751 из них (16 %) постоянное население отсутствует. По сравнению с данными переписи за 2010 год этот показатель возрос на 4 % (19 439 СНП без постоянного населения – 12 %). Средняя людность СНП по России составляет 242 чел./СНП по сравнению с 245,2 чел./СНП в 2010 г. Данный показатель варьирует в зависимости от региона: самые большие показатели демонстрируют регионы Северо-Кавказского и Южного федеральных округов, самые низкие – регионы Северо-Западного и Центрального федеральных округов, что обусловлено географическими, климатическими и экономическими особенностями этих регионов. В целом мы видим отрицательную динамику численности населения сельских территорий.

Депопуляция сельских территорий вызвана не только естественной убылью населения, но и возрастающим миграционным оттоком. Причины подобной картины кроются в структурных проблемах в сферах сельской экономики и в более низком уровне предоставления социальных благ: низкий уровень занятости, недостаточная развитость социальной инфраструктуры, изношенность инженерной инфраструктуры, социальная уязвимость жителей, более низкий уровень благосостояния. Отсутствие жилищно-коммунальных благ, ограниченный доступ к социальным услугам и другие факторы усугубляют разрыв между качеством жизни в городе и на селе. Уровень бедности сельских жителей выше уровня бедности среди всего

[1]Демографический ежегодник России. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/dem21.pdf.

населения в целом, а уровень безработицы на август 2023 г. среди сельских жителей (4 %) превышает уровень безработицы среди городских жителей (2,6 %)[2].

По данным опроса ВЦИОМ[3], проведенного в 2023 году, большая часть населения предпочитает жизнь в городе: 24 % в качестве места жительства для своих детей выбрали Москву или Санкт-Петербург, 21 % – другой крупный город и лишь 10 % – сельскую местность. Согласно мнению опрошенных, столица располагает большими возможностями для обеспечения материального благополучия (53 % опрошенных), получения хорошего образования (42 %), обретения влиятельности (39 %). Уровень развитости социальной сферы и общественных благ – главные аттрактивные факторы любой территории для проживания [1]. Сельские территории значительно уступают городам в уровне предоставления общественных благ.

Таким образом, современные сельские территории представляют собой уязвимую категорию, особо нуждающуюся в устойчивом развитии. Без формирования комфортной и экономически эффективной среды, отвечающей потребностям и нуждам населения, процесс депопуляции сельских территорий будет невозможно остановить.

Устойчивое развитие сельских территорий

Для решения проблем сельских территорий государством был сформирован комплекс мер устойчивого развития сельских территорий, который основан на комплексном анализе и адаптации Целей устойчивого развития ООН для всех стран на 2016–2030 годы. «Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности, улучшение питания и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства»[4] является одной из семнадцати приоритетных целей в данном списке.

Устойчивое развитие (УР) – концепция интенсивного развития экономики, основанная на рациональном и эффективном использовании ресурсов с учетом потребностей будущих поколений. В основе устойчивого развития лежит баланс экономического роста, социальной и экологической ответственности – неравномерное влияние на одну из сторон может привести к негативным последствиям, например, экстенсивное развитие сельскохозяйственных территорий за счет охвата больших площадей может нарушить экосистему и спровоцировать загрязнение водных ресурсов, что в свою очередь станет угрозой продовольственной безопасности. Суть проблемы УР заключается в необходимости достижения высокой эффективности производства в условиях ограниченности и исчерпаемости природных и энергетических ресурсов, чего невозможно достичь на устаревшей технологической базе.

Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) были установлены принципы устойчивого ведения сельского хозяйства[5]:

1. Повышение эффективности использования ресурсов.
2. Сохранение, защита и улучшение природных ресурсов.
3. Обеспечение справедливости и благополучия сельского населения.
4. Повышение устойчивости к внешним воздействиям у людей, сообществ и экосистем.
5. Эффективное управление.

[2]ТАСС. Уровень безработицы в России в августе составил 3 % (от 27.09.202). URL: https://tass.ru/ekonomika/18857641/ (Дата обращения 10.11.2023).

[3] ВЦИОМ. Жить, учиться и зарабатывать в Москве (от 05.09.2023). URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/zhit-uchitsja-i-zarabatyvat-v-moskve/ (Дата обращения: 10.11.2023).

[4]ООН: Цели в области устойчивого развития. Официальный сайт ООН. https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/hunger/ (Дата обращения: 10.11.2023).

[5]Продовольственная и сельскохозяйственная Организация Объединенных Наций: Разработка единой концепции устойчивого производства продовольствия и ведения сельского хозяйства. https://www.fao.org/3/i3941r/i3941r.pdf (Дата обращения: 10.11.2023).

В вопросе достижения УР сельских территорий особое внимание уделяется необходимости модернизации социальной инфраструктуры: рассматривается их благоустройство путем создания агрогородков, культурных центров, медицинских пунктов, образовательных центров, расширения масштабов индивидуального жилищного строительства, выделения экологически устойчивых зон и т.д. Также отмечается потребность повышения уровня жизни сельского населения посредством увеличения оплаты труда, количества рабочих мест, уровня финансирования сельской инфраструктуры.

В свою очередь мы хотим отметить ключевую роль цифровизации в достижении УР сельских территорий. Развитие цифровых технологий и переход к информационному обществу способствуют сокращению уровня нерационального использования ресурсов окружающей среды: открывая новые нематериальные среды для функционирования экономики и производственной деятельности (информационные продукты, финансы, интеллектуальная собственность и т.д.), они стимулируют сокращение производства материальных ресурсов и являются главными двигателями на пути к достижению УР.

Цифровизация и роботизация аграрного сектора могут стать мощным катализатором устойчивого развития в сельском хозяйстве. Одной из главных задач цифровизации сельских инфраструктур является улучшение уровня жизни населения за счет доступного и качественного образования, медицинского обслуживания, транспортных связей и др., а переход к умному сельскому хозяйству (смарт-фермерство) призван способствовать рационализации труда, повышению эффективности производства и минимизации негативного влияния на окружающую среду. Технологии смарт-фермерства представляют собой автоматизированные специализированные системы, действующие на основе IoT-технологии (интернета вещей) и применяемые во всех аспектах сельского хозяйства – от посева и ухода за посевами до сбора урожая и его продажи[6]. Системы мониторинга посевов, средства автоматизации процессов удобрения и обработки почвы, дроны, контролирующие состояние посевов и животных, аналитика данных и др. повышают урожайность и качество продукции, а также сокращают затраты на ее производство, транспортировку и хранение. В частности, применение дронов упрощает процессы внесения удобрений и инсектицидов, ирригационное картографирование, мониторинг состояния полей, контроль и управление животноводческими комплексами, обеспечение охраны территорий в труднодоступных местах [2]. Внедрение новых технологий в единую киберфизическую экосистему позволит выйти на новый технологический уклад [3].

Устойчивое развитие сельских территорий охватывает экономические, социальные и экологические аспекты развития. Целью является поддержание высокого уровня жизни населения, сохранение культурного наследия и окружающей среды, а также обеспечение равных возможностей для всех жителей.

В экономическом аспекте необходимо развитие сельского предпринимательства. Это возможно при поддержке различных форм предпринимательской деятельности, которая способствует повышению экономической активности на сельских территориях. В особенности это касается поощрения внедрения инновационной деятельности, так как не всегда традиционные виды хозяйственной деятельности могут привести к созданию конкурентоспособной продукции для сохранения устойчивого развития данных территорий.

В аспекте поддержания и развития инфраструктуры возникает необходимость создания и модернизации транспортной, социальной и энергетической инфраструктуры, которая способна улучшить инвестиционный климат сельских поселений для жителей и бизнеса.

[6] Что такое смарт ферма. Источник: https://mealblog.ru/cto-takoe-smart-ferma/ (Дата обращения: 11.11.2023).

В контексте социального аспекта речь в первую очередь идет об обеспечении доступности в сфере образования и медицинских услуг в сельских районах, включая использование дистанционных технологий. Таже необходимо развитие социокультурной сферы путем поддержки культурных и образовательных инициатив. Это будет способствовать сохранению культурного наследия и привлекательности для жизнедеятельности на данных территориях.

В экологическом аспекте возникает необходимость внедрения ресурсосберегающих и экологически чистых технологий для устойчивого использования окружающей среды. Это необходимо для сохранения и восстановления экосистем сельских территорий. Внедрение технологических инноваций – умных автоматизированных и роботизированных систем – необходимо для повышения эффективности и уменьшения воздействия на окружающую среду.

Устойчивое развитие сельских территорий требует комплексного подхода и тщательного изучения специфики каждой конкретной территории.

Концепция «Умная деревня» и ее применение в мировой практике

Одной из перспективных альтернатив достижения целей устойчивого развития сельских территорий является концепция «Умная деревня» – синтезирующая концепция в парадигме умного развития территорий, основанная на базе концепций «Умный город» и «Восходящее развитие» и заключающаяся в стратегическом развитии сельских территорий за счет эффективного использования имеющихся у них ресурсов с внедрением технологий «смарт-фермерства», средств цифровизации и развития инфраструктуры.

«Умная деревня» и «Умный город» имеют разные цели и задачи, разные масштабы и специфику применения технологий, но оба направлены на использование инновационных подходов для улучшения жизни людей и устойчивого развития территорий. «Умный город» обычно ориентирован на решение проблем, связанных с аспектами жизни в крупных городах, с использованием современных технологий для оптимизации управления ресурсами, повышения эффективности и улучшения качества жизни горожан. В концепции «Умная деревня» в свою очередь фокус направлен на развитие сельских территорий и обеспечение их устойчивого развития: решение проблем сельского хозяйства, развитие местной инфраструктуры, обеспечение доступа к образованию и здравоохранению, улучшение качества воды и воздуха, а также создание новых возможностей для жизни и работы в сельской местности и т.д.

Основной целью «Умных деревень» является сокращение уровня миграции из сел в города [4] посредством создания экономически стабильных и социально ответственных сообществ, которые, с одной стороны, способны обеспечивать свои потребности за счет ресурсного потенциала территории без негативного воздействия на окружающую среду, с другой стороны, располагают условиями жизни, экономическими возможностями и социальной поддержкой, не уступающими городским. Таким образом, в концепции «Умная деревня» различие между сельскими и городскими территориями в плане доступности услуг, трудоустройства, получения прибыли и других показателей качества жизни должно быть нивелировано [4].

Современная мировая практика знает успешные примеры реализации данной концепции на деле, в рамках нашей работы мы представим некоторые из них.

В 2022 г. на территории поселения Агалы в Азербайджане было обустроено современное «умное село», в основе которого лежат пять компонентов современного качества жизни: «жилье, объекты соцобеспечения, аграрные функции, производство и экология»[7]. Поселение энергетически автономно: потребность в энергоресурсах обеспечивается за счет

[7]News.ru: Великое возвращение: азербайджанцы заселят «умное село» в Карабахе https://news.ru/cis/velikoe-vozvrashenie-azerbajdzhancy-zaselyat-umnoe-selo-v-karabahe/ (Дата обращения: 12.11.2023).

собственных солнечных батарей, ветряных и гидроэлектростанций. Инновации в области сельского хозяйства, такие как оросительные системы на полях и станции по контролю сельскохозяйственных вредителей, управление и контроль с помощью дронов, «умные фермы», позволят повысить производство сельскохозяйственной продукции в селах и наладить процесс переработки в соответствии с современными требованиями [4]. Развитие инфраструктуры является неотъемлемым направлением развития в рамках данного проекта. Созданы предприятия для постоянной поддержки социального благополучия граждан, такие как Государственное агентство по оказанию услуг гражданам и социальным инновациям, агентство устойчивого и оперативного социального обеспечения, компания телефонной связи, банк, общеобразовательная школа и др. Для обеспечения трудовой занятости планируется возведение швейной фабрики, сыроварен, мясокомбинатов, рассматривается перспектива развития сельского туризма. Авторы проекта особое внимание уделяют его экологической составляющей. Помимо выбора возобновляющихся энергетических ресурсов для жизнеобеспечения села, было высажено 20 тысяч платанов и около тонны семян дубов для восстановления экосистемы территории.

Китай по достоинству является признанным амбассадором цифровизации деревень. Будучи аграрно-индустриальной страной, Китай занимает первое место в мире по сельскохозяйственному производству, а цифровизация стала ключевым фактором, стимулирующим национальное экономическое развитие Китая с долей вклада в ВВП 67,9 % (2018 г.) [5]. С запуска национальной программы «Интернет + сельское хозяйство» в 2015 году китайские власти активно внедряют цифровые технологии в сельском хозяйстве, образовании, здравоохранении и других сферах жизни деревенского населения. Особое внимание уделяется развитию «умных» деревень и сел.

Деревня Душиюань, расположенная в заливе Танчжоу на севере устья реки Янцзы в Китае, использует уникальные ресурсы своей водной местности для создания новой модели, которая объединяет современное и эффективное сельское хозяйство, индивидуализированную сельскохозяйственную деятельность, а также услуги экологического и культурного досуга. Деревня располагает более 186 гектарами земли, водосборной площадью 7,84 км^2 и 60 га экологических лесов. Действуют три крупные семейные фермы, где производятся такие популярные сельскохозяйственные продукты, как ферментированный тофу, сушеные креветки, пирог Цзяогао и жареный гусь. Живописная рыбацкая бухта Душиюань имеет глубокую историю и богатые туристические ресурсы. Место признано национальной туристической достопримечательностью уровня 2А, базой экологического туризма Цзянхая и агроразвлекательной базой Наньтуна. В 2018 году было принято 142 000 туристов, что обеспечило доход в 529 363 доллара США. Администрация планирует выделить в будущем около 66 га земли под проекты сельского туризма[8]. Для стимулирования возрождения сельской местности был запущен проект «Шивай Таоюань», ориентированный на традиционную культуру и сельский туризм. Помимо сельскохозяйственных угодий, ведется строительство лабиринта из зеленых растений и цветов, базы популяризации сельскохозяйственной науки, уникальных гостевых домов и других объектов, разрабатывается платформа электронной коммерции[9]. Также планируется построить онлайн-оффлайн центр по торговле рисом и обновить инфраструктуру деревни, включая дороги, водные пути, канализационные сети и систему вывоза мусора, чтобы превратить территорию в национальную туристическую достопримечательность уровня 3А и стать моделью сельского развития.

[8]Tongzhou village recognized as national beautiful leisure village http://en.nantong.gov.cn/2020-09/03/c_533736.htm/ (Дата обращения: 12.11.2023).

[9] 'Phoenix' created on Tongzhou farmland https://subsites.chinadaily.com.cn/nantong/2021-11/22/c_684836.htm/ (Дата обращения: 12.11.2023).

В штате Флорида (США) существует «Умная деревня» Babcock Ranch, развивающаяся на точке пересечения передовых технологий (с акцентом на ответственное использование природных ресурсов) и инновационной экономики. Устойчивость Бэбкока основана на управлении водными и энергетическими ресурсами, «зеленом строительстве» и сохранении земель. Бэбкок является первой в США «Умной деревней», которая полностью работает на солнечной энергии. Система солнечных батарей и солнечная электростанция мощностью 150 МВт на объекте производят достаточно энергии, чтобы обеспечить электроэнергией все сообщество[10], а работа компании Babcock Ranch: Town & Country Utilities обеспечивает водоснабжение деревни и очистку сточных вод для их повторного использования в ирригации. На территории площадью более 7 тыс. га с 50 % зеленых насаждений развивается инновационное сообщество: жилые дома, садики, школы, магазины, рестораны, медицинские центры, офисы, предприятия легкой промышленности и развлекательные предприятия – все здания энергоэффективны и построены из экологически чистых материалов. Устойчивое развитие Бэбкока напрямую связано с инфраструктурой. Проведен высокоскоростной оптоволоконный интернет, используются новые технологии для управления транспортом, системами безопасности и другими городскими системами. Сельское хозяйство и обработка земли обеспечивают материалы и продуктовые запасы. Местные фермеры предоставляют продукцию жителям и ресторанам. Согласно данным официального сайта[11], за последние 5 лет количество населения Бэбкока выросло на 13 %. В ближайшие 20 лет планируется создание 20 000 постоянных рабочих мест на территории и возведение 19 500 домов для проживания 50 000 человек.

Проанализировав данные примеры, мы можем сделать вывод о ключевых характеристиках «Умных деревень»:

– Смарт-фермерство и современные технологии: внедрение автоматизированных технологических средств, действующих в IoT-среде, на разных уровнях сельскохозяйственной деятельности, а также в повседневной жизни, прежде всего предоставление повсеместного доступа в интернет.

– Стремление к автономности: удовлетворение спроса на ресурсы за счет их местного производства.

– Экологическая устойчивость: умные деревни должны быть построены с учетом экологической устойчивости, включая использование возобновляемых источников энергии, утилизацию отходов, сохранение природных ресурсов и т.д. Формирование особой модели развития местности с учетом ее географических, культурных и демографических особенностей.

– Инфраструктура и общественные услуги: «Умные деревни» должны иметь развитую инфраструктуру, включая дороги, общественный транспорт, медицинские и образовательные учреждения, торговые центры и другие общественные услуги.

– Цифровая интеграция: «Умные деревни» должны быть интегрированы в единую цифровую систему, что позволит жителям получать доступ к информации и услугам через цифровые технологии.

– Управление ресурсами: «Умные деревни» должны иметь системы управления ресурсами, которые позволят эффективно использовать энергию, воду, отходы и другие ресурсы.

– Участие сообщества: создание умных деревень должно быть основано на участии и потребностях местного сообщества, чтобы обеспечить социальную и экономическую устойчивость.

[10]TechInsider: Ранчо Бэбкок: город будущего на солнечных батареях https://www.techinsider.ru/ technologies/news-406192-rancho-bebkok-gorod-budushchego-na-solnechnyh-batareyah/ (Дата обращения: 12.11.2023).

[11]Официальный сайт Babcockranch https://babcockranchforbusiness.com/competitive-advantages/ infrastructure/ (Дата обращения: 12.11.2023).

– Развитие новых отраслей экономики: формирование конкурентоспособного рынка труда будет возможно при условии, что рынок труда не ограничен профессиями, связанными с аграрной деятельностью: необходимо предоставить рабочие места для представителей актуальных профессий в области IT, науки и инноваций, творчества и т.д. Подобные качественные изменения в структуре трудоустройства поспособствуют притоку молодежи из центра в сельские территории.

Модели «умного» развития сельских территорий получают все более широкую актуальность и на территории России. Так, например, в Татарстане наряду с уже имеющимися IT-парками, «Смарт сити» и Иннополисами рассматривается вопрос о необходимости создания модели умных деревень «Смарт-аул». По словам «одного из «архитекторов» современного Татарстана» Рафаэля Хакимова, для предотвращения деградации и сохранения численности населения село должно адаптироваться под потребности развивающегося общества, быть открытым внешнему миру, надо понимать село как агрохолдинг, сфокусированный на производстве одной продукции, необходимо развивать различные отрасли[12].

В настоящее время существуют успешные ***модели развития «Умных деревень»***, основанные на использовании инновационных технологий с целью улучшения качества жизни на сельских территориях. Таковыми являются:

1. Умная инфраструктура – это модель, основанная на развитии современной инфраструктуры, включающая умные системы управления энергопотреблением, водоснабжением, утилизацией отходов и транспортной инфраструктурой.

2. Цифровизация социальной сферы – это модель применения автоматизированных технологий в сфере образования, здравоохранения и доступности государственных и коммерческих услуг.

3. Умное сельское хозяйство – это модель, которая включает в себя внедрение цифровых и роботизированных технологий с целью повышения эффективности и производительности сельскохозяйственного производства.

Существуют и другие модели развития «Умных деревень», для обеспечения устойчивого развития сельских территорий.

В ближайшие годы в России планируются разработка и расширение цифровых решений для агропредприятий, включая «умную ферму», «умное поле», «умное стадо», «умную теплицу», «умную переработку», «умный склад» и «умный агроофис». Планируется создать систему «единого окна» для аграриев, а также внедрить систему «личного кабинета» с доступом к ресурсам и государственным услугам Минсельхоза, Минфина, Федерального казначейства, ФНС и других исполнительных органов.

Интеграция хотя бы трех аспектов точного земледелия позволит сэкономить 20–40 % ресурсов по сравнению с традиционными методами [6].

Оценка потенциала сельских территорий Кабардино-Балкарской Республики для внедрения «Умной деревни»

Мы считаем, что сельские территории Кабардино-Балкарской Республики обладают достаточным потенциалом для успешного внедрения моделей развития «Умных сел».

В состав Кабардино-Балкарской Республики (КБР) входит 170 сельских населенных пунктов с общей численностью населения 435 622 человек (на 1 января 2023 года), что составляет 48 % от населения КБР и ставит республику на второе место по средней людности СНП регионов РФ[13]. Большая часть населения проживает в равнинных и предгорных зонах региона. Республика граничит со Ставропольским краем, Северной Осетией, Грузией и Карачаево-Черкесией.

[12]БИЗНЕС Online: Рафаэль Хакимов https://www.business-gazeta.ru/article/337013/ (Дата обращения: 12.11.2023).

[13]Российский статистический ежегодник. Москва, 2022 (Дата обращения: 10.11.2023).

Географическое положение республики, климатические, ландшафтные, культурные и экономические особенности обусловливают уникальность и перспективность ее потенциала.

Кабардино-Балкария – преимущественно горная республика, занимающая горную (51 %), равнинную (33 %) и предгорную (16 %) геоморфологические зоны с их разными климатическими и ландшафтными особенностями, что обусловливает богатое разнообразие местной флоры и фауны. На территории находятся вершины-пятитысячники (в том числе и самая высокая точка Европы – Эльбрус), пять основных хребтов Большого Кавказа, 294 ледника, 206 рек, более 100 озер, водопады. Леса, представленные более 50 видами широколиственных, хвойных и дикоплодовых пород, занимают 1/10 часть территории (191,9 тыс. га) и выполняют набор экологических функций (средообразование, водоохрана, защита, рекреация, биоразнообразие и т.д.). Благоприятные географические условия, наличие богатого исторического прошлого, археологического и этнокультурного наследия дают Кабардино-Балкарии мощный потенциал для развития туристическо-рекреационного бизнеса. КБР – международный край туризма, альпинизма и горнолыжного спорта[14] и признанная санаторно-курортная зона страны. На базе лечебных минеральных источников действует курортно-рекреационный комплекс. За последние 10 лет удалось проделать большую работу по развитию отрасли в части развития инфраструктуры курортов.

КБР является месторождением 170 видов минеральных ресурсов и полезных ископаемых: природные строительные материалы (гипс, цемент, песок, горные породы, керамзитовое и кирпичное сырье, карбонатные породы и мн. др.), топливно-энергетическое сырье, металлические и неметаллические полезные ископаемые, лечебные грязи, гидроминеральные ресурсы и т.д., что делает регион благоприятным местом для развития производства, науки. В республике действуют промышленные предприятия в области машиностроения, металлообработки, металлургии, легкой промышленности (производство одежды, кожи и изделий из кожи), химической промышленности, производства резиновых и пластмассовых изделий, деревообработки и др., расположенные главным образом на городских территориях. Есть несколько гидроэлектростанций.

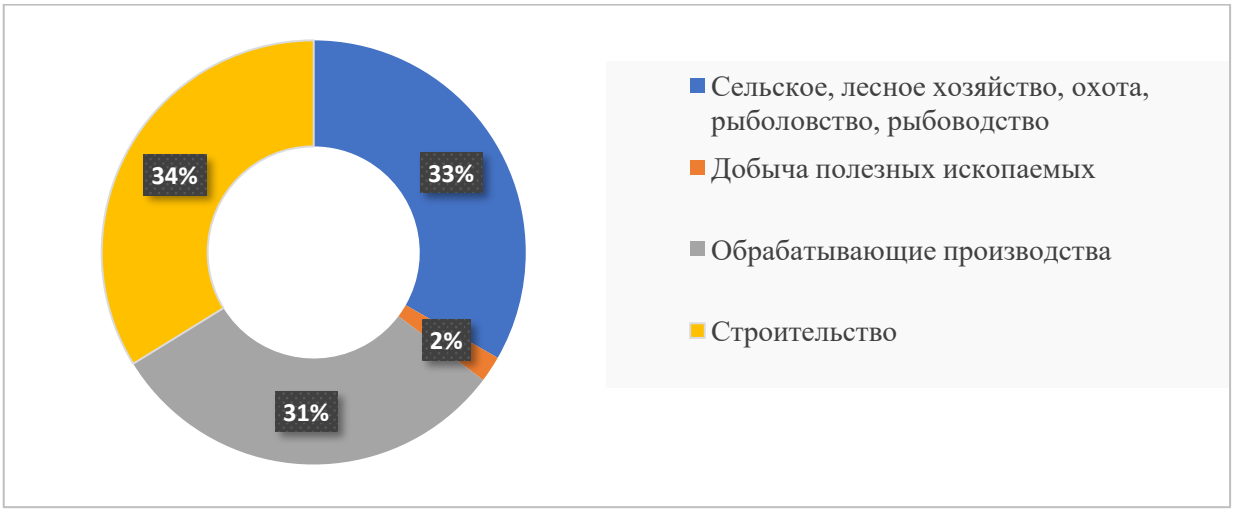


Рис. 3. *Число предприятий и организаций отдельных видов экономической деятельности в КБР в 2021 г*

Fig. 3. *Number of enterprises and organizations of certain types of economic activity in the KBR in 2021*

[14]СОТИ Система обмена туристской информацией: Кабардино-Балкарская Республика https://www.nbcrs.org/regions/kabardino-balkarskaya-respublika/general-information/ (Дата обращения: 12.11.2023).

Основой экономики КБР является сельское хозяйство, доля занятых, по данным Росстата на 2019 год, составляет 19 %[15], данный факт обусловлен природно-климатическими условиями республики и высокой долей сельского населения.



Рис. 4. *Среднегодовая численность занятых по видам экономической деятельности в КБР в 2019 году, % от общей численности занятых в экономике*

Fig. 4. *Average annual number of employees by type of economic activity in the KBR in 2019, % of the total number of people employed in the economy*

Основные отрасли сельского хозяйства в республике включают в себя производство зерновых, овощей, фруктов, мяса и молока. В КБР развито растениеводство, в том числе выращивание пшеницы, кукурузы, ячменя, проса, подсолнечника, бобовых, овощей, фруктов и ягод. Также в регионе занимаются животноводством, включая производство мяса (коровы, овцы, бараны, козы, птица), молока и яиц. Республика занимает лидирующее место в СКФО по производству молока.

В рамках реализации государственных программ «Комплексное развитие сельских территорий Кабардино-Балкарской Республики» и «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Кабардино-Балкарской Республике» оказывается государственная поддержка АПК. В 2021 году началось строительство тепличного комплекса для круглогодичного производства овощной продукции в Чегемском районе.

Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников сельского хозяйства на 2019 год составляет 18 109 руб., что на 35 % ниже среднего значения по всем отраслям деятельности по КБР (27 466 руб.). Основная сфера деятельности на сельских территориях – сельскохозяйственная. Сложное социально-экономическое положение на селе приводит к высокому уровню безработицы, что провоцирует отток сельского населения в города: чем больше удельный вес сельского населения, тем больше удельный вес безработных среди сельских жителей [8].

[15]ВШЭ: Обзор рынка труда Кабардино-Балкарской Республики. Москва, 2022. https://lirt.hse.ru/data/2022/04/15/1789611886/KBR_labour_market.pdf/ (Дата обращения: 10.11.2023).

На данный момент уровень цифровизации сел в КБР остается довольно низким. Большинство сельскохозяйственных предприятий и фермеров используют традиционные методы ведения хозяйства, не применяя современные технологии. Кабардино-Балкария относится к числу регионов с низким уровнем цифровой зрелости. Цифровая зрелость – это показатель, характеризующий степень цифровой трансформации отраслей, достигнутый организациями, государственными и муниципальными органами власти [9].

Таблица 1. Цифровая зрелость по отраслям в КБР на 2023 г. [9], в %

Table 1. Digital maturity by industry in the KBR for 2023 [9], %

Здравоохранение	Образование	Городское хозяйство	Общественный транспорт	Государственное управление	Общий показатель динамики по всем отраслям (сумма)
40,9	32,0	46,1	32,0	55,3	41,3

Индикаторы цифровой зрелости отражают удельный вес процессов в отдельных отраслях, в которых задействованы цифровые технологии. В рейтинге регионов России Кабардино-Балкария занимает 69-е место по индексу цифровой зрелости. Для внедрения цифровых технологий необходимы технологический задел и компетенция в аграрной отрасли, следует сформировать цифровые рынки для реализации сельскохозяйственной продукции в регионе и включить агропроизводителей в цифровую систему, чтобы они могли своевременно реагировать на изменения цен, спроса на тот или иной товар и т.д. [10]. Для достижения положительного эффекта цифровизации сельских территорий требуются масштабное и планомерное внедрение и распространение облачных технологий, единых информационных платформ и инфокоммуникаций в сельские территории [11]. Также необходим пересмотр системы образования: навыками работы с цифровыми технологиями должны обладать не только специалисты, но и рядовые жители села [12].

В последние годы Правительство КБР начало активно поддерживать развитие цифровизации сельского хозяйства. В рамках различных программ и проектов предоставляются субсидии и гранты для внедрения современных технологий, обучения фермеров и закупки цифрового оборудования. Каждый год села подключают к современным цифровым сервисам, в отдаленных населенных пунктах появляется связь.

Таким образом, мы можем оценить сельские территорий КБР как богатую на ресурсы местность с выгодными географическими и климатическими условиями, основу экономики которой составляет сельское хозяйство и туристическо-рекреационный бизнес, полной реализации потенциала которой мешает единообразие трудовых отраслей, недостаток рабочих мест, низкий уровень заработной платы и низкая цифровая зрелость. Чтобы обеспечить реализацию концепции «Умная деревня», следует уделить внимание подготовке технологий, организации и экологической готовности [13].

При формировании стратегий развития сельских территорий необходимо избегать универсального подхода: шаблонное решение для проблем сельских территорий без учета специфики разных регионов может свести управленческие действия по социально-экономическому развитию к формализму. Необходимо исходить из имеющихся ресурсов, потенциала и экономических потребностей отдельных сельских территорий [14].

Также в привлечении населения на сельские территории немаловажную роль играет и престижность жизни на селе. Помимо перечисленных критериев «Умных деревень» – развитие социальной и инженерной инфраструктуры, доступное образование, создание рабочих мест с достойной заработной платой, обеспечение жилья, доступа в интернет и пр. – для повышения привлекательности сельских территорий для проживания селу необходимо избавиться от негативного стереотипного образа сельской жизни, прочно укоренившегося в картине мира россиян. Представление о сельской жизни как отсталой, скучной и

бесперспективной, а о жителе села как о менее образованном и менее успешном, чем городской житель, сформировалось под влиянием исторических, социальных и культурных факторов и по сей день препятствует развитию сельских территорий и удержанию молодежи на селе. Для преодоления этого сдерживающего фактора необходимо проводить информационную работу о возможностях и потенциале сельской жизни. Здесь в качестве дополнения к внедрению инструментов «Умных деревень» и информированию населения о предоставляемых ими возможностях имеют место различные маркетинговые компании, акцентирующие внимание на преимуществах сельской жизни, таких как чистый воздух, природная красота, здоровый образ жизни и возможности для развития сельского туризма. Из опросов россиян следует, что именно эти факторы влияют на их предпочтение жизни на селе при выборе между селом и городом [15].

Для аграрных регионов, как, например, Кабардино-Балкарская Республика, ***внедрение модели «Умного сельского хозяйства»*** включает в себя несколько ключевых этапов и механизмов, которые помогут эффективно перейти к цифровым и инновационным решениям в агропромышленном комплексе. В республике есть успешно внедренные элементы «Умного сельского хозяйства», такие как роботизированные фермы и дроны. Эффективность применения этих технологий исследуется в работах [7, 10].

Мы считаем, что внедрение технологий в агарных регионах должно включать следующие этапы.

Первый этап представляет собой оценку текущего состояния и потребностей, которая включает в себя анализ существующих методов управления хозяйством, использования ресурсов, мониторинга почвы, урожайности и эффективности производства.

Второй этап заключается в разработке и выборе технологических решений. Учитывая специфику аграрных регионов, это внедрение цифровых систем мониторинга, наземные и воздушные дроны для мониторинга сельхозугодий, системы для отслеживания погодных условий, а также роботизированные технологии по уходу, сбору урожая и другие.

На третьем этапе необходимо развернуть инфраструктуру, включающую высокоскоростной интернет, сенсорную сеть, центры обработки данных и т.д. Важно подготовить работников сельского хозяйства к работе с технологиями, чтобы они могли эффективно использовать новые инструменты. Также необходимо подготовить в регионе специалистов по ремонту и обслуживанию данных технологий и соответствующую компонентную базу.

На четвертой стадии требуется создание опытных районов с целью внедрения на определенных территориях умных технологий для адаптации и оценки эффективности в реальных условиях [2].

Пятый этап подразумевает системную интеграцию и масштабирование, в котором успешные модели должны быть интегрированы в общую систему управления сельскохозяйственным предприятием на более широкие территории.

И последний, шестой этап – это мониторинг и оптимизация. На данном этапе необходимо постоянно отслеживать и оценивать эффективность использования умных решений, чтобы вносить корректировки, оптимизировать процессы и повышать производительность.

Заключение

Массовый отток населения несет в себе угрозу стагнации и деградации экономического развития сельских территорий. Для предотвращения данного процесса требуется применение принципов устойчивого развития, главная цель которых состоит в создании благоприятной среды для развития и сохранения экономической, социальной и экологической стабильности сельских территорий.

Одной из альтернатив достижения устойчивого развития является концепция «Умная деревня». «Умная деревня» (или «Умное село») – инновационная концепция, в рамках которой современные технологические возможности используются для улучшения качества жизни,

повышения эффективности всех социально-экономических взаимодействий и производственных процессов на сельских территориях. В результате анализа примеров практической реализации моделей «Умных деревень» были выявлены основные направления развития сельских территорий в рамках данной концепции: социальное, технологическое, экологическое и экономическое. Данные направления взаимосвязаны и должны рассматриваться в комплексе.

Социальное направление заключается в преодолении цифрового неравенства: предоставление сельским жителям доступа к современным медицинским, образовательным, административным услугам, по качеству и доступности, не уступающим городским. В условиях 21 века достичь этого возможно только при надлежащем уровне цифровизации, высокоскоростном интернете, снабжении населения техническими средствами и навыками для их использования. Важным аспектом внедрения «умных сел» являются образование и подготовка квалифицированных специалистов. Необходимо проводить обучение фермеров и работников сельского хозяйства по использованию новых технологий и методов управления, чтобы повысить эффективность производства.

Технологическое направление, с одной стороны, представляет собой цифровую трансформацию повседневной жизни: предоставление повсеместного доступа в интернет, цифровизация инфраструктуры и т.д., с другой стороны – внедрение инструментов «смарт-фермерства» в различные этапы сельскохозяйственной деятельности.

Внедрение современных цифровых технологий в сельское хозяйство позволяет улучшить производительность, эффективность и конкурентоспособность сельскохозяйственных предприятий. Экономическое направление развития сельских территорий в рамках «Умной деревни» также включает в себя создание многоотраслевого рынка труда, где будут рабочие места для специалистов как традиционных, так и современных направлений.

В рамках «Умной деревни» также уделяется внимание экологическому аспекту развития сельских территорий. Сельское хозяйство трансформирует экосистемы и физические условия, изменяя качество и количество природных ресурсов систематическими вырубками лесов, ирригацией, осушением, использованием тяжелой спецтехники, удобрений, пестицидов и т.д. Роботизация и цифровизация в данной сфере призваны снизить негативное воздействие сельского хозяйства на окружающую среду и сохранить природные ресурсы посредством оптимизации использования воды и удобрений, развития экологически чистого производства, повышения энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии.

Сельские территории КБР – богатое месторождение природных ресурсов, а также хранитель известных природных и культурных достопримечательностей. Выгодное географическое положение и климатические условия определяют биоразнообразие и экологическую ценность данной территории. Основу экономики региона составляют сельское хозяйство и туристическо-рекреационный бизнес. Для полной реализации потенциала сельских территорий необходимо преодолеть проблемы, связанные с единообразием трудовых отраслей, недостатком рабочих мест, низким уровнем заработной платы и низкой цифровой зрелостью. С учетом региональной специфики КБР, ее географических, социальных, культурных и экономических особенностей внедрение технологий «Умных деревень» поможет решить указанные проблемы и станет катализатором экономической деятельности региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Deller S., Kures M., Conroy T.* Rural entrepreneurship and migration // Journal of Rural Studies. 2019. Vol. 66. Pp. 30-42 DOI: 10.1016/2019.01.026

2. *Загазежева О. З., Бжихатлов К. Ч., Бароков Х. А., Кантиев З. Ю.* Переход к роботизированным технологиям в сельских территориях на примере создания опытного района для разработки и внедрения беспилотных интеллектуальных робототехнических систем //

Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 186–193. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-186-193

3. *Загазежева О. З., Шалова С. Х.* Разработка моделей управления социально-экономическими системами на сельских территориях в условиях внедрения новых технологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 3(113). С. 40–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-3-113-40-54

4. *Абдуллазаде А. Р.* Реализация проектов «умная деревня» и «умный город» в освобожденных регионах // Экономика строительства и управление. 2023. № 1(22). С. 163–171.

5. *Авдокушин Е. Ф., Ван Жуй.* Цифровизация села в Китае // Мир новой экономики. 2021. №15(4). С. 6–15. DOI: 10.26794/2220-6469-2021-15-4-6-15

6. *Анищенко А. Н.* «Умное» сельское хозяйство как перспективный вектор роста аграрного сектора экономики России // Продовольственная политика и безопасность. 2019. Т. 6. № 2. С. 97–108. DOI: 10.18334/ppib.6.2.41384

7. *Эфендиева А. А., Загазежева О. З.* Перспективы использования беспилотных устройств в решении прикладных задач в сельскохозяйственной отрасли // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 4(90). С. 54–59. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-4-90-54-59

8. *Бадмаева Н. В.* Миграция сельского населения южнороссийских регионов: проблемы, тенденции, направления // Oriental Studies. 2018. Т. 37. С. 152–164. DOI: 10.22162/2619-0990-2018-37-3-152-164

9. *Абрамов В. И., Андреев В. Д.* Анализ стратегий цифровой трансформации регионов России в контексте достижения национальных целей // Вопросы государственного и муниципального управления. 2023. №. 1. С. 89–119. DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119

10. *Загазежева О. З., Шалова С. Х.* Перспективы развития КБР в условиях внедрения цифровых технологий в сельское хозяйство // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 6(104). С. 105–116. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-105-116

11. *Касимова Ж. В., Касимов А. А.* Цифровая трансформация сельских территорий // Вестник НГИЭИ. 2020. № 8(111). С. 117–126. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10079

12. *Ахметов В. Я., Галикеев Р. Н.* Перспективы социально-экономического развития сельских территорий в условиях цифровизации экономики // Вестник Евразийской науки. 2019. № 6. С. 1–12. DOI: 10.15862/03ECVN619

13. *Mukti I.Y., Iacob M.E., Aldea A. et al.* Defning rural smartness and its impact: a systematic literature review // Journal of the Knowledge Economy. 2022. Vol. 13. No. 8. Pp. 956–1007. DOI: 10.1007/s13132-021-00736-7

14. *Акимова О. Е., Волков С. К., Кузлаева И. М.* Концепция «умная деревня» и сельские территории России // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. № 4. 2021. С. 117–135. DOI: 10.38050/01300105202146

15. *Загазежева О. З. Хаджиева М. И.* Перспективы снижения экологической нагрузки сельскохозяйственного производства на основе массовой роботизации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 6(98). С. 145–154. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-145-154

REFERENCES

1. Deller S., Kures M., Conroy T. Rural entrepreneurship and migration. *Journal of Rural Studies.* 2019. Vol. 66. Pp. 30-42 DOI: 10.1016/2019.01.026

2. Zagazezheva O.Z., Bzhikhatlov K.Ch., Barokov Kh.A., Kantiev Z.Yu. Transition to robotic technologies in rural areas using the example of creating an experimental area for the development

and implementation of unmanned intelligent robotic systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2022. No. 6(110). Pp. 186–193. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-186-193. (In Russian)

3. Zagazezheva O.Z., Shalova S.Kh. Development of models for managing socio-economic systems in rural areas in the context of the introduction of new technologies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 3(113). Pp. 40–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-3-113-40-54. (In Russian)

4. Abdullazade A.R. Implementation of "Smart village" and "Smart city" projects in liberated regions. *Construction economycs and management.* 2023. No. 1(22). Pp. 163–171. (In Russian)

5. Avdokushin E.F., Van Jui. Digitalization of rural areas in China. *Mir novoy ekonomiki* [World of New Economics]. 2021. No.15(4). Pp. 6–15. DOI: 10.26794/2220-6469-2021-15-4-6-15. (In Russian)

6. Anishchenko A.N. "Smart" agriculture as a promising vector for the growth of the agricultural sector of the Russian economy. *Prodovol'stvennaya politika i bezopasnost'* [Food policy and security. 2019. Vol. 6. No. 2. Pp. 97–108. DOI: 10.18334/ppib.6.2.41384. (In Russian)

7. Efendieva A.A., Zagazezheva O.Z. Prospects for the use of unmanned devices in solving applied problems in the agricultural industry. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2019. No. 4(90). Pp. 54–59. DOI: 10.35330/1991-6639-2019-4-90-54-59. (In Russian)

8. Badmaeva N.V. Migration of the rural population of southern Russian regions: problems, trends, directions. *Oriental Studies*. 2018. Vol. 37. Pp. 152–164. DOI: 10.22162/2619-0990-2018-37-3-152-164. (In Russian)

9. Abramov V.I., Andreev V.D. Analysis of strategies for digital transformation of Russian regions in the context of achieving national goals. *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipal'nogo upravleniya* [Issues of state and municipal management]. 2023. No. 1. Pp. 89–119. DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119. (In Russian)

10. Zagazezheva O.Z., Shalova S.Kh. Prospects for the development of KBR in the context of the introduction of digital technologies in agriculture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2021. No. 6(104). Pp. 105–116. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-105-116. (In Russian)

11. Kasimova Zh.V., Kasimov A.A. Digital transformation of rural territories. *Vestnik NGIEI* [Bulletin of NGIEI]. 2020. No. 8(111). Pp. 117–126. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10079. (In Russian)

12. Akhmetov V.Ya., Galikeev R.N. Prospects for the socio-economic development of rural territories in the conditions of digitalization of the economy. *Vestnik Yevraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2019. No. 6. Pp. 1–12. DOI: 10.15862/03ECVN619. (In Russian)

13. Mukti I.Y., Iacob M.E., Aldea A. et al. Defning rural smartness and its impact: a systematic literature review. *Journal of the Knowledge Economy*. 2022. Vol. 13. No. 8. Pp. 956–1007. DOI: 10.1007/s13132-021-00736-7.

14. Akimova O.E., Volkov S.K., Kuzlaeva I.M. The concept of "smart village" and rural areas of Russia. *Vestnik Moskovskogo universiteta* [Bulletin of Moscow University]. Series 6. Economics. No. 4. 2021. Pp. 117–135. DOI: 10.38050/01300105202146. (In Russian)

15. Zagazezheva O.Z., Khadzhieva M.I. Prospects for reducing the environmental load of agricultural production based on mass robotization. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2020. No. 6(98). Pp. 145–154. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-145-154. (In Russian)

Информация об авторах

Загазежева Оксана Зауровна, канд. экон. наук, зав. Инжиниринговым центром, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234

Шалова Сатаней Хаутиевна, науч. сотр. Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

satanei@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-1309

Мисостишхова Марьяна Иналуковна, мл. науч. сотр. Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

misosti@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9428-5478

Information about the authors

Zagazezheva Oksana Zaurovna, Candidate of Economic Sciences, Head of the Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234

Shalova Satanei Khautievna, Researcher of the Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

satanei@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-1309

Misostishkhova Maryana Inalukovna, Junior Researcher of the Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

misosti@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9428-5478

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

УДК 338.26, 316.4, 631 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-307-318
EDN: UQZQOH

Проблемы роботизации и социальная адаптация сельских территорий

М. И. Мисостишхова, К. Ф. Край, М. И. Хаджиева, Х. А. Бароков

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Статья посвящена исследованию проблем роботизации сельского хозяйства. В данной работе авторами проводится анализ мирового рынка сельскохозяйственной робототехники. Представлены опросы городских и сельских жителей РФ, в которых раскрыты качественные и количественные характеристики, выявляющие отношение населения к технологическим инновациям. Установлено, что одним из факторов, положительно влияющих на процессы внедрения новых технологий, является осведомленность населения: информированность у городских жителей выше, чем у сельских, и как следствие они более лояльны к новым технологиям. На основе исследования были определены основные угрозы процесса роботизации и автоматизации человеческой деятельности, бытующие в сознании населения, и предложены рекомендации по их преодолению. Авторами приведен ретроспективный анализ сформировавшегося в восприятии человека образа робота как искусственного помощника. В ходе исследования подчеркнута важность учета особенностей человеко-машинного взаимодействия в современных условиях роботизации. Представлена методика комплексной оценки данного взаимодействия.

Ключевые слова: роботизация, сельские территории, социокультурный аспект роботизации, человеко-машинное взаимодействие, HRI

Поступила 30.11.2023, одобрена после рецензирования 08.12.2023, принята к публикации 10.12.2023

Для цитирования. 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

JEL: R11 Original article

Problems of robotization and social adaptation of rural areas

M.I. Misostishkhova, K.F. Krai, M.I. Khadzhieva, Kh.A. Barokov

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article is devoted to the study of problems of robotization of agriculture. In this work, the authors analyze the global agricultural robotics market. Surveys of urban and rural residents of the Russian Federation were presented, where qualitative and quantitative characteristics were revealed that showed the population's attitude towards technological innovation. It was established that one of the factors that positively influences the processes of introducing new technologies is the awareness of the population: urban residents have higher awareness than rural residents and, as a result, they are more loyal to new technologies. Based on the study, the main threats to the process of robotization and automation of human activity that exist in the minds of the population were identified, and recommendations for overcoming them were proposed. The authors provide a retrospective analysis of the image of a robot as an artificial assistant formed in human perception. The study emphasized the

© Мисостишхова М. И., Край К. Ф., Хаджиева М. И., Бароков Х. А., 2023

importance of taking into account the features of human-machine interaction in modern robotic conditions. A methodology for a comprehensive assessment of this interaction is presented.

Keywords: robotization, rural areas, sociocultural aspect of robotization, human-machine interaction, HRI

Submitted 30.11.2023, approved after reviewing 08.12.2023, accepted for publication 10.12.2023

For citation. Misostishkhova M.I., Krai 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

Введение

Сельское хозяйство по сей день является одной из наиболее значимых отраслей экономики любой страны, а проблема неэффективного использования земельных ресурсов и связанный с ней недостаток продуктов питания с каждым годом становится все актуальнее. Согласно исследованиям ООН[1], население Земли к 2037 году достигнет 9 миллиардов человек, в результате чего понадобится производить на 70 % больше продукции, чтобы прокормить растущее население планеты[2]. Дефицит свободных территорий, пригодных для ведения сельского хозяйства, исключает экстенсивный способ решения данной проблемы посредством увеличения площади посевов или поголовья скота. Оптимальным способом удовлетворения растущего спроса на продукцию в условиях ограниченных ресурсов может быть повышение эффективности и оптимизация аграрных процессов за счет внедрения роботизированных технологий.

Внедрение новых технологий на сельских территориях представляет большой потенциал в увеличении производительности, оптимизации деятельности, улучшении качества продукции и качества жизни населения. Однако для успешной реализации данных целей необходимо учитывать многие аспекты, включая финансовые, технические, экологические, социальные и культурные вопросы. Роль социокультурного аспекта роботизации нельзя недооценивать: успех реализации технологий, в частности роботизации, напрямую зависит от того, насколько эти технологии будут соответствовать потребностям и ценностям населения, а также насколько эффективно будет обеспечено их обучение и поддержка.

Однако важно помнить, что введение автоматизированных систем в производственную практику может иметь также и отрицательные социальные последствия. В частности, данные процессы могут привести к ряду проблем, связанных с социальной адаптацией сельских жителей.

Негативное отношение населения к робототехнике может быть определено несколькими факторами.

В первую очередь это технологический страх, или технофобия, причиной которой является то, что население не понимает, как работает техника, и не осознает потенциальную экономическую эффективность подобных изменений. Также некоторые люди выражают опасения по поводу того, что роботизация и автоматизация лишат их рабочих мест. Авторы данной статьи наблюдали, как на выставках робототехники и цифровых технологий, разработанных Кабардино-Балкарским научным центром РАН, посетители и потенциальные клиенты часто выражали обеспокоенность по данному вопросу.

Вторым фактором является экономическая неопределенность: рост роботизации и автоматизации может снизить спрос на человеческую рабочую силу в определенных областях и вызвать социальную напряженность со всеми негативными последствиями.

Опасения относительно потери рабочих мест, недостаток информации о конкретной технологии, угроза безопасности и конфиденциальности данных, страх негативного влияния на

[1] Официальный сайт ООН https://www.un.org/ru/dayof8billio (Дата обращения: 12.10.2023).

[2] Официальный сайт ООН https://news.un.org/ru/story/2013/12/1233551 (Дата обращения: 12.10.2023).

здоровье и окружающую среду могут стать причиной недоверия к новым технологическим решениям. Кабардино-Балкарским научным центром с 2019 года проводилась деятельность по внедрению дронов в АПК региона[3], в ходе которой часто приходилось сталкиваться с недоверием к технике и ее возможностям со стороны фермеров. Опасаясь за безопасность и эффективность применения на поле, они с неохотой соглашались на первые эксперименты и только при успешных результатах опрыскивания дроном признавали данные технологии и советовали их своим знакомым и друзьям.

Актуальность темы состоит в том, что сельское хозяйство играет важную роль в экономике многих стран, и внедрение роботизированных систем может иметь значительное влияние на жизнь сельских жителей. Неприятие населением роботизации может стать причиной негативных последствий, препятствующих внедрению технологий в сельскохозяйственную отрасль.

Объектом исследования является роботизация сельского хозяйства.

Предметом – проблемы роботизации и социальная адаптация сельских территорий.

Цель данной работы заключается в определении значимости социокультурного аспекта роботизации сельских территорий.

В соответствии с целью были поставлены **задачи:**

1. Описать актуальное положение роботизации сельского хозяйства в мире и в России.
2. Выявить отношение жителей городских и сельских территорий России к процессу роботизации.
3. Проследить развитие образа робота и представлений о человеко-машинном взаимодействии в коллективном сознании людей.
4. Рассмотреть дисциплину HRI (Human Robot Interaction) и методы изучения человеко-машинного взаимодействия.
5. Дать рекомендации по повышению лояльности сельского населения к процессу роботизации.

Методологической основой данной работы стали зарубежные и отечественные научные публикации, посвященные проблемам человеко-машинного взаимодействия, методы сравнительного и логического анализа, а также исследования различных научных организаций, изучающих проблемы роботизации.

Роботизация сельского хозяйства

Несмотря на известную консервативность сельскохозяйственной отрасли, роботизация и цифровизация являются наблюдаемыми тенденциями развития сельских территорий в условиях современного мира. В России внедрение инновационных технологий в сельское хозяйство отстает от остальных отраслей, однако наблюдается существенное развитие в данном направлении[4].

Внедрение новых технологий в АПК России проводится в следующих направлениях: автоматизация процессов, применение дронов и дистанционного зондирования, интернет вещей (IoT), аналитика данных, вертикальное фермерство (ситифермерство), использование искусственного интеллекта и т.д.

Автоматизация процессов сельского хозяйства представляет собой использование роботов и автоматизированных систем, исключающих участие человека в выполнении различных рутинных задач, таких как посев, полив, уборка урожая, мониторинг состояния

[3]Ученые КБР в течение месяца испытают дрон для распыления удобрений и мониторинга полей URL: russiandrone.ru/news/uchenye_kbr_v_techenie_mesyatsa_ispytayut_dron_dlya_raspyleniya_udobreniy_i_monitoringa_poley/?ysclid=lq0v3defop954078520

[4]Сколково: Дрон vs агроном: зачем цифровизация сельскому хозяйству https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2020/03/26/dron-vs-agronom-zachem-cifrovizaciya-selskomu-hozyaystvu.aspx (Дата обращения: 11.11.2023).

полей, обработка почвы – в растениеводстве, стрижка, доение, кормление, уборка, контроль – в животноводстве.

На современном мировом рынке представлено большое количество реализаций роботов и средств автоматизации, предназначенных для применения в разных направлениях сельскохозяйственной деятельности. Обзор некоторых из них представлен ниже в виде таблицы.

Таблица 1. Обзор сельскохозяйственных роботов

Table 1. Overview of agricultural robots

Функциональная группа	Производитель	Страна	Робот	Функционал
Растениеводство				
Уничтожение вредителей	Agrobot	Испания	Bug Vacuum	Обнаружение и ликвидация насекомых-вредителей с помощью вакуумной системы
	Avrora Robotics	Россия	АгроБот	Автоматическое пилотирование сельскохозяйственной техники с помощью специального корпуса, устанавливаемого вместо кабины пилотируемого оборудования
Борьба с сорняками	Carbon Robotics	США	LaserWeeder	Обнаружение и уничтожение сорняков среди пропашных культур с помощью лазерной установки
Точное земледелие	AgXeed	Нидерланды	Семейство AgBot	Автоматизация процессов возделывания и ухода за посевами
Мониторинг	Университет Миссури	США	Vinobot и Vinoculer	Сбор данных с отдельных посевов с помощью наземного транспортного средства и наблюдение всего поля с помощью мобильной вышки
	Small Robot Company	Великобритания	Tom	Автономная оцифровка поля для обнаружения сорняков и оценки состояния урожая
Погрузочно-разгрузочные работы	Harvest Automation, Inc.	США	OmniVeyor HV-100	Корректное размещение контейнеров с растениями в условиях теплиц
Сбор урожая	Agrobot	Испания	E-Series	Бережный сбор клубники
	Root AI	США	Virgo	Сбор томатов в теплицах
	Abundant Robotics	Новая Зеландия	Робот для сбора яблок	Вакуумный сбор яблок
Обработка почвы	Agreenculture	Франция	CEOL	Уход за виноградными рядами
	Nano-Technologies	Франция	Ted	Точная механическая прополка почвы на виноградниках
Опрыскивание	Carretillas Amate S.L.	Испания	MATB02	Опрыскивание в теплицах
	PRECIMET H.C.E.	Польша	AST-23HR	Опрыскивание в теплицах
Кошение	Vitirover Solutions	Франция	Vitirover	Уход за растительностью в сложных сельскохозяйственных условиях
Животноводство				
Многофункциональный робот	OCTOPUS BIOSAFETY	Франция	XO	Уборка мусора, санитарная обработка, мониторинг окружающей среды, мониторинг птиц
Контроль производства продукции	OCTOPUS BIOSAFETY	Франция	T-MOOV	Уменьшение количества яиц, откладываемых на полу
Доение	Fullwood	Великобритания	M2erlin series	Автоматическое доение коров
Кормление животных	Trioliet B.V.	Нидерланды	Triomatic WP 2 300	Автоматизированное смешивание и подача корма для КРС
	Storvik Aqua AS	Норвегия	Exact	Кормление рыбы
	Silofarmer	Франция	R+	Кормление крупного и мелкого рогатого скота

Наибольшее коммерческое использование на территории России наблюдается у доильных роботов, подравнивателей кормов и у роботов по уборке отходов в животноводческих помещениях [1].

Роботы могут выполнять тяжелые и монотонные задачи, освобождая людей от рутинной опасной деятельности и позволяя им заниматься более творческими и высококвалифицированными работами. Это может привести к увеличению производительности и эффективности работы в сельском хозяйстве, что в свою очередь способствует повышению уровня жизни и благополучия сельского населения. Однако при внедрении в производственный процесс роботизированных технологий необходимо учитывать также и отрицательные факторы, оказывающие влияние на социальный аспект жизнедеятельности человека.

Отношение сельских жителей к внедрению новых технологий определяет успех интеграции роботов в сельское хозяйство, и их мнение и потребности должны быть учтены.

Взаимодействие человека и робота

Термин «робот» происходит от чешского «robota» – «подневольный труд», «каторга». Впервые данное понятие было использовано в 1920 году в пьесе «Р. У. Р.» чешским писателем Карелом Чапеком. Под роботом у Чапека подразумеваются «искусственные люди», антропоморфные «живые, наделенные интеллектом рабочие машины», «искусственные рабочие с минимальными потребностями» [2], которых внешне сложно отличить от человека. Роботы Чапека «живут» только ради того, чтобы служить людям, «освободить человека от унизительного труда» [2], создать ему обстановку безграничного благополучия и беззаботности.

Однако концепция замещения человека искусственными людьми в выполнении человеческой работы возникла еще в древности. В качестве примера стоит упомянуть древнегреческий миф о Кадме, закопавшем зубы убитого им дракона, из которых впоследствии выросли солдаты. Или древнееврейские легенды о големе – великане, созданном из глины и грязи для исполнения различных трудных работ.

Можно сказать, первым шагом на пути к практической реализации представлений об искусственном человеке стали автоматоны (от др. греч. αὐτόματον «самодвижущийся») – автоматические конструкции, чаще всего антропоморфные или зооморфные, в основе которых лежит механизм с заданной программой движений. Одно из первых упоминаний подобного механизма относят к III в. до н. э.: речь идет о механической статуе-прислуге Филона Византийского, способной наполнять чашу вином. «Оживленные» с помощью механизма статуи богов в древних цивилизациях напоминали о могуществе божеств [3]. В разное время автоматоны выполняли декоративные, развлекательные, религиозные и прикладные функции.

Расцвет искусства автоматонов приходится на период после XIV века, чему способствовало изобретение первых механических часов. В XVIII в. автоматоны становятся популярными среди европейской знати: особо прославились механические куклы семьи швейцарских часовщиков Жаке-Дро: музыкант, художник и писатель – сложные синхронизированные технические системы, реализующие определенный функциональный набор.

В XIX веке автоматоны становятся более обыденным явлением и используются в качестве рекламного инструмента, пока в XX веке их окончательно не вытесняет робототехника.

Роботы в отличие от автоматонов представляют собой более сложные механизмы, объединяющие в себе механику, электронику и вычислительную технику и действующие на основе компьютерного программного обеспечения или искусственного интеллекта.

Несмотря на то, что точка отсчета эры робототехники приходится на середину XX века, концепция робота как «электронного человека» формируется в западноевропейской литературе уже в XIX веке (Вилье де Л'Иль-Адам «Канун будущего» (1883 г.), Луис Сенаренс «Электрический человек» (1885 г.) и др.), набирают актуальность размышления на тему взаимоотношений человека и его творений. Вышеупомянутый К. Чапек одним из первых

затронул тему бунта машин против человека [4], в пьесе «Р.У.Р» ребром стоит этический вопрос правомерности эксплуатации роботов. Литературным, можно сказать, наследником Чапека становится Айзек Азимов [4] – один из основоположников научной фантастики XX века, автор знаменитых трех законов робототехники, исключающих возможность повторения сценария Чапека в условиях роботизированного мира. В творчестве Азимова образ робота трансформируется из неминуемой угрозы в верного друга человека и его помощника [4]. В своих произведениях Азимов проявлял особый интерес к взаимодействию роботов с обществом и тому, как общество их принимает.

На сегодняшний день вопросы взаимодействия человека и робота исследуются и совершенствуются в рамках дисциплины HRI (Human–robot interaction). Это новое междисциплинарное направление исследований, включающее в себя разработки в области программирования, искусственного интеллекта, робототехники, нейробиологии, обработки естественного языка, дизайна и психологии. Целью HRI является проектирование устройств, позволяющих людям безопасно взаимодействовать с роботизированными системами, а также разработка алгоритмических подходов для поддержания свободного и выразительного взаимодействия между ними [5].

Разработаны и апробируются комплексные методологические подходы в исследовании человеко-машинного взаимодействия [6]. В качестве примера мы рассмотрим смешанную методику комплексной оценки HRI Венского технического университета, известную как USUS (Usability – Social Acceptance – User Experience – Societal Impact) [7]. В рамках данной методики измеряются различные показатели удобства взаимодействия с роботом, социального восприятия, опыта пользователя и ценности для общества.

Таблица 2. Методика комплексной оценки HRI Венского технического университета [7]

Table 2. Methodology for a comprehensive assessment of HRI of the Vienna Technical University [7]

Показатель	Характеристики	Метод измерения
Удобство взаимодействия	Эффективность по отношению к достижению цели	Эксперимент/экспертное заключение
	Результативность	
	Обучаемость	
	Гибкость	
	Прочность	
	Полезность	Анкетирование, интервью
Социальное восприятие	Ожидаемая производительность	Анкетирование, фокус-группы
	Ожидаемое удобство использования	
	Отношение к использованию технологии	
	Собственная эффективность	
	Групповая принадлежность	
	Привязанность	
	Взаимное влияние	
Пользовательский опыт	Конструктивное исполнение	Фокус-группы
	Проявление эмоций	Анкетирование, психологические метрики
	Чувство безопасности	
	Совместный опыт	Фокус-группы
	Человеко-ориентированное восприятие	
Ценность для общества	Качество жизни	Анкетирование, фокус-группы, интервью
	Условия труда	
	Образование	
	Культурный контекст	

Подобные методики являются полезным инструментом для изучения и улучшения взаимодействия между человеком и роботом в различных сферах деятельности. Стоит учитывать, что роботы разного назначения (промышленные, социальные, военные и поисково-спасательные, роботы для освоения космоса, сельскохозяйственные и др.) предполагают разные формы взаимодействия, соответственно, требуют разного уровня HRI.

В случае пренебрежения аспектом человеко-машинного взаимодействия всегда есть риск развития негативных сценариев. Ярким историческим примером социальной реакции на угрозы, заключающиеся в революционной модификации технологических процессов, служит движение луддитов, возникшее в Великобритании первой половины XIX века, – рабочих текстильной промышленности, боровшихся против внедрения новых технологий, опасаясь потери рабочих мест и ухудшения условий труда. В современном мире имеет место так называемый неолуддизм, который проявляется в опасениях и сопротивлении населения автоматизации и использованию новых технологий в различных сферах жизни. Неолуддисты высказывают беспокойство о потере рабочих мест, ухудшении условий труда, нарушении приватности и других негативных последствиях, связанных с широким использованием технологий.

Показательными случаями неоллудизма являются массовые протесты, возникающие в разных сферах производства по всему миру: забастовка Гильдии сценаристов США, где актеры и сценаристы требовали гарантий того, что искусственный интеллект не заменит их на рабочих местах[5]; множественные протесты художников против нейросетей[6]; массовые протесты против 5G-коммуникаций[7] в России, протесты против беспилотных автомобилей в Сан-Франциско[8], порча работниками оборудования[9] и многие др.

Исследователи Института Современных Медиа (MOMRI) установили, что искусственный интеллект тревожит 14 % россиян[10].

Самое радикальное из ожидаемых негативных последствий тотальной роботизации – это вытеснение человека роботами [8]. Данные опроса ВЦИОМ[11] показывают опасение жителей России, в том числе и занятых в сельском хозяйстве, по поводу угрозы потери рабочих мест, что в глобальном масштабе может привести к ухудшению экономического положения сельских районов, миграции населения в города и увеличению социальной напряженности: 51 % опрошенных считают замену людей на рабочих местах роботами скорее отрицательной тенденцией. Опрос 2023 года[12] показывает, что, по мнению россиян, риск потери работы меньше грозит работникам творческих профессий (69 % опрошенных). Однако данные о современном состоянии рынка труда дают противоположные результаты: уровень безработицы в регионах России с высокой плотностью роботизации

[5]As Writers Strike, AI Could Covertly Cross the Picket Line. https://www.hollywoodreporter.com/business/business-news/writers-strike-ai-chatgpt-1235478681/ (Дата обращения: 12.11.2023).

[6]Художники против нейросетей: справедливый протест или неолуддизм? https://habr.com/ru/ companies/ruvds/articles/711834/ (Дата обращения: 12.11.2023).

[7]Россию охватили массовые протесты против 5G. https://www.cnews.ru/news/top/2021-04-14_rossiyu_ohvatili_massovye (Дата обращения: 12.11.2023).

[8]Активисты против беспилотников в Сан-Франциско. https://habr.com/ru/news/746506/ (Дата обращения: 12.11.2023).

[9]Восстание против машин. Как россияне борются с искусственным интеллектом и роботами. https://secretmag.ru/technologies/vosstanie-protiv-mashin.htm (Дата обращения: 12.11.2023).

[10]Чего боятся россияне? Тревожность за роботизацию будущего набирает обороты. https://31tv.ru/novosti/242417/ (Дата обращения: 12.11.2023).

[11]ВЦИОМ: О людях и роботах. https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/o-ljudjakh-i-robotakh (Дата обращения: 14.11.2023).

[12]ВЦИОМ: Нейросети и человек: начало пути. https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/neiroseti-i-chelovek-nachalo-puti (Дата обращения: 14.11.2023).

сельского хозяйства ниже, чем в регионах, не использующих робототехнику в данной отрасли (5,17 % безработицы при роботизации и 7,3 % при традиционном сельском хозяйстве) [1]. Внедрение робототехники не способствует росту безработицы на селе, более того, оно стимулирует рост доходов сельскохозяйственных работников: было установлено, что в регионах с высокой плотностью роботизации заработная плата выше на 20,4 %, чем в регионах, где робототехника не применяется [1]. Показательна ситуация в Южной Корее – одной из самых роботизированных стран, где на 10 000 рабочих приходится около 600 роботов и наблюдается низкий уровень безработицы – 4,4 % [9].

Вторым возможным отрицательным последствием роботизации является угроза кибербезопасности. Роботизация может создать новые угрозы для безопасности, такие как возможность хакерских атак на автоматизированные системы и роботов, что может привести к серьезным последствиям для общества. Предполагается рост спроса на рынке кибербезопасности в управлении роботами посредством интернета вещей. Государственные институты будут вынуждены искать новые способы защиты киберпространства[13].

Кроме того, среди негативных сценариев при опросе ВЦИОМ также рассматривалось отношение жителей страны к вероятности того, что в ближайшем будущем технологии могут выйти из-под контроля и «восстать» против человечества: 59 % респондентов не верят, что подобное случится, верит 30 %, при этом осведомленные в теме нейросетей люди (73 %), молодежь 18–34 лет (75 %) и активные пользователи интернета (72 %) говорят о невозможности такого сценария, а 49 % людей, отрицательно относящихся к нейросетям, считают «восстание машин» возможным.

Ускоренные темпы роботизации могут привести к изменению культурных традиций и образа жизни в сельских сообществах. Введение новых технологий может изменить способы работы и организации сельского хозяйства, что повлияет на культурные практики, связанные с сельскими традициями и обычаями. Также, возможно, будет утрачено непосредственное взаимодействие между людьми в процессе работы на полях и фермах.

Роботизация жизнедеятельности человека и общества, с учетом трансформирующихся потребностей, потребует нового менеджмента взаимодействия между людьми и технологиями [10].

В ходе исследования ВЦИОМ[14], целью которого было определение отношения россиян к нейросетям, выявлено, что отношение к технологиям зависит от осведомленности населения (63 % положительного мнения опрошенных, хорошо осведомленных о работе нейросетей, против 21 % негативного отношения людей, не разбирающихся в данном вопросе), при этом уровень информированности о нейросетях в крупных населенных пунктах выше, чем на селе (31 % в больших городах, 4 % – в сельской местности). Данная корреляция отмечается и в другом исследовании[15]: в крупных населенных пунктах люди чаще замечают материалы о современных научных и технологических достижениях (46 % опрошенных), а на селе и в небольших городах – 37 % опрошенных.

В первую очередь адаптация предполагает развитие у работников АПК навыков, необходимых для работы с автоматизированными системами и роботами, например, обучение программированию, обслуживанию и управлению роботами. В ряде российских вузов в рамках аграрных направлений, в частности агроинженерии, реализуются программы обучения, связанные с автоматизацией и роботизацией аграрных процессов (например,

[13]Влияние роботизации на устройство мира. https://standard.kz/ru/post/vliyanie-robotizacii-na-ustroistvo-mira (Дата обращения: 14.11.2023).

[14]ВЦИОМ: Нейросети и человек: начало пути https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/neiroseti-i-chelovek-nachalo-puti (Дата обращения: 14.11.2023).

[15]ВЦИОМ: Технологии будущего https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/tekhnologii-budushchego (Дата обращения: 14.11.2023).

МСХА имени К. А. Тимирязева: «Автоматизация и роботизация технологических процессов АПК», «Интеллектуальные машины и оборудование в АПК», «Интеллектуальные системы самоходных комбайнов», «Интеллектуальные и электронные системы в сельском хозяйстве» и т.д.).

Помимо обучения в учреждениях высшего образования, существуют курсы подготовки специалистов от самих производителей роботов, направленные на развитие у пользователей навыков, необходимых для успешной интеграции их роботов в производство. Например, российская компания TECHNORED предлагает своим клиентам курсы подготовки специалистов по направлениям: введение в роботизацию, программирование коллаборативного робота, программирование промышленного робота, проектирование технологической оснастки[16].

Ключевую роль играет достижение дружественного взаимодействия человека и робота. С развитием искусственного интеллекта исследования в области HRI фокусируются, с одной стороны, на наиболее безопасном физическом взаимодействии, с другой – на корректном социальном взаимодействии роботов с людьми. Показательно, что недавние исследования роботов телеприсутствия выявили, что имитация человеческой мимики и поз сделала роботов привлекательными и в удаленной обстановке [11]. Решения проблемы варьируются от философского подхода к роботам как к индивидам, обладающим моральной волей, до практического подхода к созданию «безопасных зон», в рамках которых применяются такие технологии, как лидар, для обнаружения человека или физических барьеров для предотвращения контакта между машиной и оператором.

Таким образом, мы считаем, что для устранения негативных последствий процессов роботизации необходимо принять комплекс мер, включающих:

1. Образовательные программы и информационные кампании, направленные на получение сельскими жителями информации о том, как роботизация и автоматизация могут улучшить их качество жизни и условия труда, увеличить эффективность и стимулировать новые виды занятости.

2. Разработку социальных гарантий, куда входят государственные программы поддержки и переподготовки для работников, чей труд может быть затронут автоматизацией и роботизацией.

3. Демонстрацию населению позитивных примеров успешной интеграции робототехники в различные отрасли.

4. Преодоление технологического неравенства с предоставлением сельским жителям доступа к сети интернет для развития цифровой грамотности среди населения, повышения их осведомленности о новых технологиях и уменьшения недоверия к ним.

5. Обязательный учет требований безопасности, включая технические и информационные аспекты при создании и разработке робототехнических устройств, с последующим информированием общественности об этих особенностях.

Заключение

Отрасль автоматизированных и роботизированных устройств в производстве и повседневной жизни стремительно развивается и испытывает все возрастающий спрос в обществе. В рамках исследования было выявлено, что роботизация и цифровизация в сельских территориях предоставляет уникальные преимущества: создание новых рабочих мест; обеспечение доступности цифровых технологий для всех слоев населения сельских территорий, создание условий для устойчивого развития образования, здравоохранения и соци-

[16]TECHNORED: Курсы подготовки специалистов. https://technored.ru/catalog/obrazovanie/kursy_ podgotovki_spetsialistov/ (Дата обращения: 27.11.2023).

альной защиты, чтобы привлечь и удержать население; эффективное управление ресурсами, создание и развитие новых отраслей и др.

В последние годы в сельском хозяйстве наблюдается быстрый рост новых технологий и инноваций. Различные устройства и программные решения помогают фермерам повысить эффективность своей работы, улучшить качество продукции и уменьшить воздействие на окружающую среду. Роботизация сельского хозяйства – перспективное решение современных проблем глобального масштаба: угроза голода в связи с перенаселением, загрязнение экосферы побочными продуктами ведения сельского хозяйства.

Использование новых технологий в сельском хозяйстве может принести значительные выгоды, но требует серьезного подхода и учета многих аспектов, в том числе и социокультурного.

Было выявлено, что жители сельских населенных пунктов менее осведомлены о достижениях в области технологий, что в общем отрицательно сказывается на их отношении к роботам и искусственному интеллекту. Люди проявляют настороженность из страха потерять работу, утерять культурные ценности и из соображений безопасности. Негативное отношение к технологиям является барьером на пути их внедрения в сельскохозяйственную деятельность, поэтому адаптация населения является важным направлением деятельности в процессе технологической трансформации села.

Улучшение и приспособление социальной структуры и инфраструктуры играют решающую роль в успешной роботизации сельских территорий, так как они обеспечивают условия для стабильного роста и повышения уровня жизни местного населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скворцов Е. А.* Территориальные закономерности роботизации сельского хозяйства. Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2023. 188 с.

2. *Чапек К.* Р.У.Р. Коллективная драма в 3-х действиях с прологом / пер. И. Ф. Каллиников. Прага: Пламя, 1924. 244 с.

3. *Droz A., Chapuis E.* Les Automates, figures artificiels d'hommes et d'animaux, histoire et technique. Paris: Editions du griffon, 1949.

4. *Маслова К. К.* Трансформация образа «робота» от «механического подобия» к образу «робот-человека» (К. Чапек, Е. И. Замятин, О. Хаксли, А. Азимов) // Вестник славянских культур. 2018. Т. 49. С. 161–170.

5. *Kalinowska A., Pilarski P.M., Murphey T.D.* "Embodied Communication: How Robots and People Communicate Through Physical Interaction". Annual Review of Control, Robotics and Autonomous Systems. 3 May 2023. No. 6 (1). P. 205–232. DOI: 10.1146/annurev-control-070122-102501

6. *Середкина Е. В., Безукладников И. И.* Взаимодействие человека и робота: социально-гуманитарная экспертиза // Социально-гуманитарные знания. 2019. № 10. С. 102–108.

7. *Tsiourti C., Weiss A., Wac K., Vincze M.* Multimodal Integration of Emotional Signals from Voice, Body, and Context: Effects of (In)Congruence on Emotion Recognition and Attitudes. International Journal of Social Robotics. No. 11(3–4). Pp. 555–573. DOI: 10.1007/s12369-019-00524-z

8. *Игнатьев В. И.* Социокультурные аспекты роботизации // Социология науки и технологий. 2019. Т. 10. № 1. С. 64–78. DOI: 10.24411/2079–0910–2019–10005

9. *Маргарян А. Г.* Анализ последствий внедрения робототехники // Наука без границ. 2019. № 10(38). С. 13–16.

10. *Бондарева Н. Н.* Состояние и перспективы развития роботизации: в мире и России // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2016. Т. 7. № 3. С. 49–57. 2016. DOI: 10.18184/2079-4665.2016.7.3.49.57

11. *Adalgeirsson S., Breazeal C.* MeBot: A Robotic Platform for Socially Embodied Presence. Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Human–Robot Interaction. Stockholm, 2010. Pp. 15–22. ISBN 9781424448937

REFERENCES

1. Skvortsov E.A. *Territorial'nyye zakonomernosti robotizatsii sel'skogo khozyaystva* [Territorial patterns of robotization of agriculture]. Tyumen': GAU Severnogo Zaural'ya, 2023. 188 p. (In Russian)

2. Chapek K. R.U.R. *Kollektivnaya drama v 3-kh deystviyakh s prologom* [Collective drama in 3 acts with a prologue]. Trans. I. F. Kallinikov. Praga: Plamya, 1924. 244 p. (In Russian)

3. Droz A., Chapuis E. Les Automates, figures artificiels d'hommes et d'animaux, histoire et technique. Paris: Editions du griffon, 1949.

4. Maslova K.K. Transformation of the image of a “robot” from a “mechanical resemblance” to the image of a “robot-man” (K. Chapek, E.I. Zamyatin, O. Huxley, A. Azimov). *Vestnik slavyanskikh kul'tur* [Bulletin of Slavic Cultures]. 2018. Vol. 49. Pp. 161–170. (In Russian)

5. Kalinowska A., Pilarski P.M., Murphey T.D. “Embodied Communication: How Robots and People Communicate Through Physical Interaction”. *Annual Review of Control, Robotics and Autonomous Systems*. 3 May 2023. No. 6 (1). P. 205–232. DOI: 10.1146/annurev-control-070122-102501

6. Seredkina E.V., Bezukladnikov I.I. Interaction between man and robot: social and humanitarian examination. *Sotsial'no-gumanitarnyye znaniya* [Social and humanitarian knowledge]. 2019. No. 10. Pp. 102–108. (In Russian)

7. Tsiourti C., Weiss A., Wac K., Vincze M. Multimodal Integration of Emotional Signals from Voice, Body, and Context: Effects of (In)Congruence on Emotion Recognition and Attitudes. International Journal of Social Robotics. No. 11(3–4). Pp. 555–573. DOI: 10.1007/s12369-019-00524-z

8. 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)

9. Margaryan A.G. Analysis of the consequences of the introduction of robotics. *Nauka bez granits* [Science without borders]. 2019. No. 10(38). Pp. 13–16. (In Russian)

10. Bondareva N.N. State and prospects for the development of robotization: in the world and Russia. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitiye)* [MIR (Modernization. Innovation. Development)]. 2016. Vol. 7. No. 3. Pp. 49–57. 2016. DOI: 10.18184/2079-4665.2016.7.3.49.57. (In Russian)

11. Adalgeirsson S., Breazeal C. MeBot: A Robotic Platform for Socially Embodied Presence. Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Human–Robot Interaction. Stockholm, 2010. Pp. 15–22. ISBN 9781424448937

Информация об авторах

Мисостишхова Марьяна Иналуковна, мл. науч. сотр. Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

misosti@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9428-5478

Край Карина Фаезовна, зав. лаб. «Модели и методы развития и внедрения инновационных проектов» Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

kraykarina@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6927-7361

Хаджиева Мариям Ильясовна, мл. науч. сотр. Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
mariam9248@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1607-1324
Бароков Хазретали Ауесович, зав. полиландшафтного полигона Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;
mamlyuk-freedom malyuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8860-3927

Information about the authors

Misostishkhova Maryana Inalukovna, Junior Researcher of the Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360004, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
misosti@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9428-5478
Krai Karina Faezovna, Head of the Laboratory "Models and methods of development and implementation of innovative projects" of the Engineering Center, 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
Khadzhieva Mariam Ilyasovna, Junior Researcher of the Engineering Center, 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
Barokov Khazretali Auesovich, Head of the Polylandscape polygon of the Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;
mamlyuk-freedom malyuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8860-3927

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338.1 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-319-328
EDN: UXDAKV

Алгоритм управления оборотными активами компаний машиностроительного комплекса и основной инструментарий

Н. В. Грызунова, А. А. Хвостова, А. М. Трамова

Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова
117997, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

Аннотация. Инструментарий управления оборотными активами промышленных корпораций постоянно расширяется, поскольку у многих из них на долю оборотных активов приходится более половины в структуре активов, а потрясения последних лет стимулируют поиск путей экономии. Менеджмент компаний ориентирован на планирование всех этапов цепочки создания ценности продукции, и хотя методология этого еще не отработана, но постепенно аккумулируется успешный практический опыт, поскольку данный подход – основа устойчивого развития и компании, и регионов. Авторы предлагают рассматривать процесс управления оборотными активами как инвестиционный процесс и сами активы как кредитно-расходную категорию. Элементы оборотных активов постоянно расширяются, отражая развитие рынков и последствия НТП. Новизна исследования заключается в развитии и расширении инструментов, используемых для управления оборотными активами организации, позволяющих качественно изменить сам процесс и, конечно, повысить эффективность, а в дополнение обеспечить ресурсосбережение на основе комплексного использования математических подходов и моделей оптимизации запасов на основе цифровых технологий в условиях бережливого производства. Методика исследования базируется на методах сравнения, программирования, математического моделирования.

Ключевые слова: алгоритм управления**,** оборотные активы, финансовые инструменты управления, бережливое производство, оптимизация, эффект хлыста, риски, цепочка поставок

Поступила 14.08.2023, одобрена после рецензирования 13.11.2023, принята к публикации 27.11.2023

Для цитирования. Грызунова Н. В., Хвостова А. А., Трамова А. М. Алгоритм управления оборотными активами компаний машиностроительного комплекса и основной инструментарий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 319–328. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-319-328

Original article

The algorithm for managing the current assets of machine-building companies and the main tools

N.V. Gryzunova, A.A. Khvostova, A.M. Tramova

Plekhanov Russian University of Economics
117997, Russia, Moscow, 36 Stremyanny Lane

Abstract. The tools for managing current assets of industrial corporations are constantly expanding, since many of them have more than half of their current assets in the asset structure, and the shocks of recent years stimulate the search for ways to save. The company's management is focused on planning all stages of the product value chain and, although the methodology for this has not yet been developed, successful practical experience is gradually accumulating, since this approach is the basis for sustainable

© Грызунова Н. В., Хвостова А. А., Трамова А. М., 2023

development of both the company and the regions. The authors propose to consider the process of managing current assets as an investment process and the assets themselves as a credit and expense category. Elements of current assets are constantly expanding, reflecting the development of markets and the consequences of scientific and technological progress. The novelty of the research lies in the development and expansion of the tools used to manage the organization's current assets, which allow to qualitatively change the process itself and, of course, increase efficiency and, in addition, ensure resource conservation based on the integrated use of mathematical approaches and inventory optimization models based on digital technologies in a lean manufacturing environment. The research methodology is based on the following methods: comparison, programming, mathematical modeling.

Keywords: management algorithm, current assets, financial management tools, lean manufacturing, optimization, whiplash effect, risks, supply chain

Submitted 14.08.2023, approved after reviewing 13.11.2023, accepted for publication 27.11.2023

For citation. Gryzunova N.V., Khvostova A.A., Tramova A.M. The algorithm for managing the current assets of machine-building companies and the main tools. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 319–328. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-319-328

Введение

Эффективное управление оборотными активами (ОА) имеет огромное значение для финансов компании. Выбор инструментов управления оборотными активами – это традиционная управленческая процедура, качество и алгоритм которой во многом определяют конкурентоспособность и будущее компании. В настоящее время процесс выбора инструментов формирования и управления оборотными активами сталкивается с необходимостью дополнения его такими современными реалиями, как санкции, дифференциация партнеров в новой экономической международной системе, учет новых стимулов бережливости и экономии (бережливое производство) и, конечно, цифровизация валютных отношений [1].

Современные исследователи и практики утверждают, что закончилось время «простой» настройки, когда достаточно было подобрать один инструмент. Сейчас грядет эра «мультиинструментального» триангуляционного управления ОА, когда необходимо использовать комплекс подходящих для ситуации инструментов.

Менеджмент компании формирует новые алгоритмы управления с ориентацией на мелкосерийное позаказное производство, стремясь учесть все запросы покупателей, что требует реализовать в максимально возможном объеме все функциональные запросы к продукции, особенно в сфере машиностроения и металлургии. В промышленности всю эту картину дополняет кризис платежей, который потрясает промышленные компании в последние два года.

Цель статьи – рассмотреть комплекс инструментов формирования и управления оборотных активов компаний производственного сектора страны, которые в текущих условиях позволят добиться эффективности и конкурентоспособности, ритмичности и безрискового кредитования поставок. Структура оборотных активов (ОА) постоянно расширяется, также изменяется состав инструментов управления ими и ассертивность воздействия. В границах определенной цели статьи авторы попытались решить *задачи* оптимизации цепи поставок; определить ковенанты динамического анализа управления заказами, производством, запасами и поставками.

В динамике в структуре ОА можно проследить изменение трактовки этой финансовой категории во времени различными исследователями (табл. 1).

Таблица 1. Трактовки термина «оборотные активы», применяемые современными учеными

Table 1. Interpretations of the term “current assets” used by modern scientists

Годы	ФИО авторов	Содержание определений
1970	Ковалев В. В.	Мобильная часть активов экономического субъекта, являющаяся денежными средствами или способная быть обращенной в них на протяжении одного календарного года или одного цикла производства [2]
1975	Поляк Г. Б.	Вид активов, способных быть конвертированными в денежные средства в течение одного производственного цикла и/или года [3]
1980	Бланк И. А.	Общая величина капитала экономического субъекта, авансированного во все типы его текущих активов (здесь действует следующее равенство: «оборотный капитал = оборотные активы» на абсолютно любом отрезке времени) [4]
1980	Грибов В. Д. Грузинов В. П.	Сумма денежных средств, нужных для обеспечения деятельности экономических субъектов [5]
1985	Савицкая Г. В.	Наиболее подвижный элемент собственного и заемного капитала организации, который инвестирован в ее активы со сроком обращения до одного года для ведения операционной деятельности, при этом совершающий постоянный кругооборот и возобновляющийся на протяжении одного операционного цикла или в пределах соответствующего сравнительно короткого календарного периода времени [6]
1990	Гулько А. А.	Стоимость собственных, заемных и привлеченных средств, направляемых на формирование производственных фондов и фондов обращения с целью обеспечения непрерывного характера кругооборота в ходе осуществления расширенного воспроизводства [7]
2019	Шеремет А. Д.	Капитал экономического субъекта, инвестированный в его текущие активы [8]
2017	Шохин Е. И.	Это капитал, делящийся на производственные фонды и фонды обращения и использующийся с целью обеспечения бесперебойных производственных и коммерческих процессов [9]

Источник: составлено авторами

Как можно видеть из таблицы 1, достаточно долго существовало мнение о тождестве оборотных активов и оборотного капитала, но постепенно эта ошибка была преодолена.

Авторы считают, что оборотные активы – это денежные средства, вложенные в оборотные производственные фонды и фонды обращения. Управление ОА и формирование их структуры, как считают авторы, – это совокупность производственных принципов, обусловленных технологией, и финансовых целей, обусловленных стратегией компании. Можно отметить две основные тенденции в изменении трактования задач управления ОА: комплексность использования различных инструментов и реализация принципов бережливого производства.

Расширение инструментов управления ОА коррелирует с развитием финансового рынка и проходит в несколько этапов (табл. 2).

Таблица 2. Этапы развития системы управления ОА компаний

Table 2. Stages of development of the company's current assets management system

Этапы	Содержание этапа
50–60-е годы XX века	Джеймс К. Ван Хорн, Бернстайн. Они ввели элемент управления ОА в систему финансового менеджмента компании
60–70-е годы XX века	Математическое моделирование, направленное на оптимизацию запасов. Модель М. А. Миллера-Ора, Г. М. Вильсона, У. Дж. Баумоля
70–80-е годы XX века	Моделирование организации управления ОА, организация поставок, логистики: JIT, Канбан
80–90-е годы XX века	Моделирование управления ОА на основе цифровизации, новая концепция бережливого производства, интернет вещей
90-е годы XX века – наши дни	Кастомизация продукции. Дезинтермедиация. Умная фабрика

Источник: составлено авторами

Методы исследования

Текущие инновации управления ОА обусловлены, как всегда, изменениями финансовой и политической среды в стране и за рубежом. Доминирующая концепция управления ОА – это бережливое производство, поиск путей экономии, организация циклического производства, планирование цепочки создания ценности продукта, что предполагает использование комплекса инструментов, основанных как на математических моделях, эмпирическом опыте, имитационном моделировании, так и на организационных преобразованиях.

Подобные изменения, происходящие в политике управления ОА, уже дают ощутимый эффект и в производительности, и в качестве. Например: РЖД, «Почта России», Сбербанк. Плюс сопутствующие бонусы, такие как сокращение длительности производственного цикла, высвобождение складских и производственных площадей.

Авторы рассматривали алгоритм управления ОА на примере госкорпорации «Ростех» и ее предприятий.

С другой стороны, изменение подходов к управлению создает и новые проблемы, например, это распыление затрат, усложнение планирования производства, рецептурные проблемы. Мелкосерийное производство, широкая линейка продукции, уменьшающиеся размеры партий приводят к многочисленным сложностям в цепочке поставок, расширяют спектр финансовых, экологических, регулятивных и правовых рисков. В связи с этим для компаний сейчас крайне актуально реформировать управление и применяемые инструменты для таких блоков, как расчеты с контрагентами и страхование канцелинга, продажи, расходы, логистика, остатки денежных средств.

Сегодня основной акцент при формировании системы управления ОА делается на определении ковенант (ограничений) в регулировании движения активов в пределах полного финансового цикла с корректировкой (производственного, коммерческого циклов). То есть необходимо, кроме оборачиваемости, учитывать ряд технико-технологических характеристик производства, условия организации работы с партнерами, логистику, то есть все то, что называется «умной фабрикой» (табл. 3). Можно сказать, что вопрос о выборе инструментов управления ОА – это вопрос выбора элементов «умной фабрики».

Таблица 3. Краткая характеристика блоков формирования и управления оборотными активами

Table 3. Brief characteristics of the blocks for the formation and management of current assets

№ п/п	Наименование блоков	Наиболее часто используемые маркеры при определении эффективности функционирования блока	Инструменты управления	Нормативно-правовая основа
1	Блок материальных запасов	Предполагается необходимость формирования и управления всеми видами предметов труда – сырьем, материалами, товарами для продажи, готовой продукцией, остатками незавершенного производства и т.д.	Затратоотдача, затратоемкость, материалоотдача, оборачиваемость, ресурсосбережение, оптимальная величина поставок, средняя, предельная эффективность использования ресурсов	Приказ Минфина России от 15.11.2019 № 180н
2	Блок расчетов с контрагентами	Предполагается необходимость формирования и управления всеми видами расчетов с контрагентами: покупателями и заказчиками, поставщиками и подрядчиками, по налогам и сборам, по оплате труда с персоналом, с учредителями и т.д.	Показатели ликвидности баланса и платежеспособности, «эффект хлыста», JIT	Глава 46 части II ГК РФ, ТК РФ, статья 13 главы 2 части I НК РФ, Приказ Минфина России от 10.12.2002 № 126н
3	Блок доходов	Предполагается необходимость формирования и управления всеми видами доходов, получаемых в результате ведения операционной, инвестиционной и финансовой деятельности	Выручка от продаж, портфельный подход, проценты к получению, показатели прибылей (убытков), рентабельность продаж, кривая FRA	Статьи 248-250 главы 25 части II НК РФ, Приказ Минфина России от 06.05.1999 № 32н

Источник: составлено авторами

Многие компании реализуют технологии «Индустрии 4.0», которая дала новый импульс развития концепции бережливого производства. Цифровизация производства позволяет учесть особенности условий, в которых действует компания, и ее взаимоотношения с партнерами и институциональными структурами. Бережливое производство способствует сокращению экологического ущерба и увеличивает рейтинг компании по ESG. Авторы составили алгоритм применения инструментов управления ОА компании (рис. 1).

Менеджмент большинства компаний допускает, что инвестирование в элементы ОА имеет аналогичный уровень риска, что и инвестиции или капитальные вложения. Наиболее волатильной и значительной статьей затрат является транспортировка. В процессе анализа элементов ОА организация поставок планируется исходя из разумного уровня расходов на логистику и транспортировку, синхронизацию и партионность. Необходимо учитывать факторы спроса и сезонности.

Естественно, идеальной организации поставок не существует. Оптимизация цепочки поставок базируется на использовании разнообразных инструментов: подход JIT (*Just-In-Time);* определение гармоники Коши; допуски. Зная функцию распределения каждого компонента ОА, вероятность, моду и медиану, можно организовать эффективную логистику поставок сырья и распределение продукции. К современным математическим методам управления ОА можно применить и кривую FRA («Forward rate agreement») для оценки цен и процентных кредитных ставок кредиторов и, соответственно, стратегии финансирования и токенизированные акции для защиты от риска.

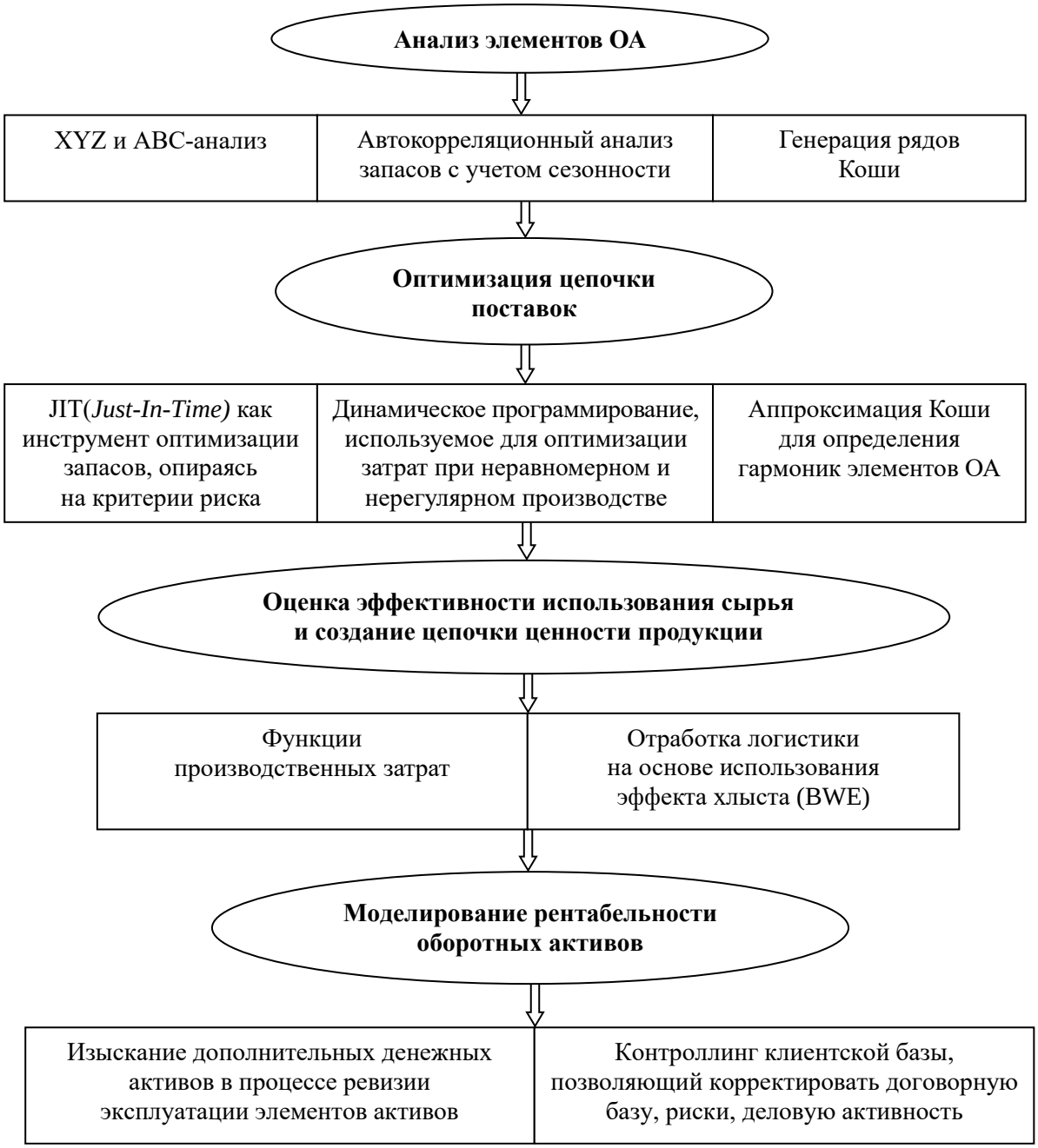


Рис. 1. *Алгоритм оптимизации запасов (Источник: составлено авторами)*

Fig. 1. *Inventory optimization algorithm (Source: made by the authors)*

В настоящее время чрезвычайное значение отводят оценке эффективности использования сырья и созданию цепочки ценности продукции, поскольку на этой стадии возможно управлять факторами ESG, закладывать определенный рейтинг устойчивого развития компании. Целесообразно оценить эффективность используемых ресурсов и технологий, определить границы развития технологии, чтобы своевременно осуществить инновации и реформирование. Прекрасные возможности для этого дает инструментарий производственных функций.

Сейчас рассматривают цепочку поставок от сырья до стратегий реализации продукции покупателям. Стратегии управления ОА опираются на достижение определенной рентабельности. Для отработки стратегий лучше всего ориентироваться на показатели

рентабельности. Элиминирование факторов для изучения и корректировки рентабельности возможно осуществлять на основе двух-, трех-, четырех-, пяти- и восьмифакторной моделей. Большее количество факторов рассматривать нецелесообразно. В общей цепочке создания ценностей фигурирует значительное количество показателей, более целесообразно сокращать их ассортимент и на каждом этапе цепочки использовать одни и те же критерии.

С помощью «эффекта хлыста» можно оценить операционные риски и их влияние на ключевые показатели цепочки поставок компаний. Кроме того, механизм «эффекта хлыста» позволяет просчитать последствия «эффекта домино» для всей системы и оценить максимально возможный ущерб. Изменения на рынке, в мире привели к обновлению инструментов влияния и к появлению инновационных образований, таких как, например, распределительные центры ТНК, групп компаний.

Пока еще практика управления всеми процессами в границах цепочки поставок (SCRM), цепочки создания ценностей является лишь концепцией, основой будущей финансовой методологии компании, но когда связи – цепочки – определятся и получат в том числе и юридическую цементизацию, это нанесет сокрушительный удар по рискам и издержкам, которые обусловлены неравномерностью заказов, сменой рецептур, и приведет к более филигранной работе с потребителями.

Результаты исследования

Авторами в рамках имитационного эксперимента был проведен анализ операционных рисков цепочки поставок от распределительного центра госкорпорации «Ростех» до цехов компаний, входящих в группу. Как известно, в последний год компания переживает значительную экспансию, и в ее состав вошло много новых предприятий в самых разных районах страны.

Распределительный центр – это инновационная структура, созданная чтобы устранить кризис платежей и решить логистические проблемы.

При определении рисков сбоев поставок и стоимости последствий этого («эффекта домино») оценивались расстояния в пределах 100 км. Расчет «эффекта хлыста» (индекса BWE) осуществлялся и по модели «as-is» – «как есть» и «to-be» – «как должно быть». В расчетах авторы традиционно рассматривали три сценария: оптимистичный (риск наступления рисковых событий равен 0), пессимистичный (риск наступления рисковых событий равен 1) и реальный (вероятности наступления рисковых событий определяются исходя из предыдущего опыта их возникновения, а также с использованием экспертных оценок). Были оценены ключевые показатели эффективности цепочки поставок в целом для всей компании:

- полученные продукты (входящие заказы);
- доставленные товары (исходящие заказы);
- потерянные продажи;
- уровень обслуживания клиентов.

Такие риски возникают достаточно часто, но могут быть устранены.

Как видно по полученным данным (табл. 4), организация работы распределительного центра в соответствии с предложенным алгоритмом позволяет сократить радиус распространения рисков и иных негативных последствий на всю цепочку создания ценности продукции. Следует отметить, что предложенный алгоритм использования описанных выше инструментов позволяет «заложить» ожидаемые с высокой вероятностью сбои в нормальном режиме компаний.

Таблица 4. Результат снижения рисков в пределах распределительного центра

Table 4. Result of risk reduction within the distribution center

Показатели	Модель «as-is» – «как есть»		Модель «to-be» – «как должно быть»	
	Размещенный спрос (входной поток), шт. (IN)	Объем исходящих поставок (выходной поток), шт. (OUT)	Размещенный спрос (входной поток), шт. (IN)	Объем исходящих поставок (выходной поток), шт. (OUT)
Дисперсия σ^2	11076,75	16564,46	110,76	87,42
Математическое ожидание μ	661,97	662,05	66,19	66,19
σ^2/μ	16,73	25,02	1,67	1,32
$BWE = \frac{\sigma_{out}^2/\mu_{out}}{\sigma_{in}^2/\mu_{in}}$	1,495		0,78	

Источник: составлено авторами

Результаты, полученные авторами, подтверждают выводы, сделанные ранее J. Monostori [10], W. Mekhum [11], N.A. Zavalko, V.O. Kozhina, E.V. Yudina, O.N. Beketova, A.V. Lavrenova [12], которые доказывали необходимость использования комплекса методов для управления активами в сложном современном мире на основе совокупных данных о, например, таких факторах, как затраты, виды прибыли, финансовый рычаг и пр. Следует отметить и возможность выполнения принципов ESG и рост рейтинга ESG компании: Y. Parks, H. Kim [13] и C. R. Shnu, R. Sridharan, P. N. R. Kumar [14].

Заключение

Инструменты управления ОА имеют тенденцию расширения, поскольку меняется рынок, условия кредитования, требования и желания партнеров. Так как структура оборотных активов у каждой компании персонифицирована, необходимо выбирать определенную технологию управления ими и подбирать соответствующие инструменты. На текущий момент для оценки эффективности использования сырья, технологии, оборудования лучше всего подходит функция производственных затрат, с помощью которой можно заблаговременно определить пределы использования ресурсов. Одной из главных задач финансового менеджера при оценке эффективности управления оборотными активами рекомендуется считать построение системы целевых установок, отражающих взаимосвязь уровней ликвидности, финансовой устойчивости, рентабельности оборотных активов. В процессе оптимизации потребления сырья компаниями, работающими на принципах бережливого производства в условиях нестабильности, неравномерности закупок, целесообразно сочетать гармонику Коши и динамическое программирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хвостова А. А.* Методические подходы и инструментарий управления оборотными активами в системе финансового менеджмента российских корпораций // Вестник Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. 2021. Том 18. № 6(120). С. 170. DOI: http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2021-6-170-179

2. *Ковалев В. В., Ковалев Вит. В.* Финансовый менеджмент. Конспект лекций с задачами и тестами: учебное пособие. Москва: Проспект, 2021. 560 с.

3. Поляк Г. Б. и др. Финансовый менеджмент: учебник / ред. Г. Б. Поляк. Москва: Юрайт, 2018. 456 с.

4. *Бланк И. А.* Инвестиционный менеджмент: учебное пособие. Москва: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. С. 6.

5. *Грибов В. Д., Грузинов В. П.* Экономика предприятия: учебник. Практикум. Москва: ИНФРА-М, 2018. С. 7.

6. *Савицкая Г. В.* Анализ хозяйственной деятельности: учебное пособие. Москва: ИНФРА-М, 2019. С. 9.

7. *Гулько А. А., Коннова А. В.* Кредитный риск как основная угроза для развития рынка кредитных услуг малого и среднего бизнеса // Молодой ученый. 2017. № 13(147). С. 273–277.

8. *Шеремет А. Д., Хорин А. Н.* Теория экономического анализа: учебник. Москва: ИНФРА-М, 2019. С. 6.

9. *Шохин Е. И.* Финансовый менеджмент: учебник / коллектив авторов под ред. Е. И. Шохина. Москва: КНОРУС, 2017. С. 7.

10. *Monostori J.* Mitigating the ripple effect in supply chains: balancing the aspects of reliability, complexity and efficiency // Journal of Industrial Sciences and Technologies Cirp. 2021. Vol. 32. Pp. 370–381.

11. *Mekhum W.* The impact of sustainability concept on supply chain dynamic capabilities // Polish Journal of Management Studies. 2019. Vol. 20. Pp. 267–76.

12. *Zavalko N.A., Kozhina V.O., Yudina E.V. et al.* Innovative approaches to business modeling at an enterprise // Revista Inclusiones. 2020. Vol. 7. Pp. 84–92.

13. *Parks Y., Kim H.* A simulation-based evolutionary algorithmic approach to operational planning of global supply chains based on systematic risk management // Computing Ind. 2016. Vol. 83. Pp. 68–77.

14. *Shnu C.R., Sridharan R., Kumar P.N.R.* Supply chain risk management: Models and methods // International Journal of Management and Decision Making. 2019. Vol. 18. Pp. 31–75.

REFERENCES

1. Khvostova A.A. Methodological approaches and tools for managing current assets in the system of financial management of Russian corporations. *Vestnik Rossijskogo jekonomicheskogo universiteta im. G.V. Plehanova* [Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics]. 2021. Vol. 18. No. 6(120). P. 170. DOI: http://dx.doi.org/ 10.21686/2413-2829-2021-6-170-179. (In Russian)

2. Kovalev V.V., Kovalev Vit.V. *Finansovyy menedzhment. Konspekt lektsiy s zadachami i testami* [Financial management. Lecture notes with tasks and tests]: textbook. Moscow: Prospekt, 2021. 560 p. (In Russian)

3. Polyak G.B. et al. *Finansovyy menedzhment* [Financial management]: textbook. Moscow: Yurayt, 2018. 456 p. (In Russian)

4. Blank I.A. *Investitsionnyy menedzhment* [Investment management]: uchebnoye posobiye. Moscow: LAP, 2014. 64 p. (In Russian)

5. Gribov V.D., Gruzinov V.P. Enterprise economics: textbook. Moscow: INFRA-M, 2018. P. 7 (In Russian)

6. Savitskaya G.V. *Analiz khozyaystvennoy deyatel'nosti: uchebnoye posobiye* [Analysis of economic activity: textbook]. Moscow: INFRA-M, 2019. P. 9. (In Russian)

7. Gulko A.A., Konnova A.V. Credit risk as the main threat to the development of the market of credit services for small and medium-sized businesses. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2017. No. 13(147). Pp. 273–277. (In Russian)

8. Sheremet A.D., Khorin A.N. *Teoriya ekonomicheskogo analiza* [Theory of economic analysis]: textbook. Moscow: INFRA-M, 2019. P. 6. (In Russian)

9. Shokhin E.I. *Finansovyy menedzhment* [Financial management]: textbook. Ed. E.I. Shokhin. Moscow: KNORUS, 2017. P. 7. (In Russian)

10. Monostori J. Mitigating the ripple effect in supply chains: balancing the aspects of reliability, complexity and efficiency. *Journal of Industrial Sciences and Technologies Cirp*. 2021. Vol. 32. Pp. 370–381.

11. Mekhum W. The impact of sustainability concept on supply chain dynamic capabilities. *Polish Journal of Management Studies*. 2019. Vol. 20. Pp. 267–76.

12. Zavalko N.A., Kozhina V.O., Yudina E.V. et al. Innovative approaches to business modeling at an enterprise. *Revista Inclusiones*. 2020. Vol. 7. Pp. 84–92.

13. Parks Y., Kim H. A simulation-based evolutionary algorithmic approach to operational planning of global supply chains based on systematic risk management. *Computing Ind.* 2016. Vol. 83. Pp. 68–77.

14. Shnu C.R., Sridharan R. and Kumar P.N.R. Supply chain risk management: Models and methods. *International Journal of Management and Decision Making*. 2019. Vol. 18. Pp. 31–75.

Информация об авторах

Грызунова Наталья Владимировна, д-р экон. наук, профессор кафедры финансов устойчивого развития, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова;

117997, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

Gryzunova.NV@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8582-7389

Хвостова Анастасия Александровна, аспирант, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова;

117997, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

hvostova_92@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2496-9030

Трамова Азиза Мухамадияевна, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры информатики, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова;

117997, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

Tramova.AM@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4089-6580

Information about the authors

Gryzunova Natalya Vladimirovna, Doctor of Economics Sciences, Professor of the Department of Finance for Sustainable Development, Plekhanov Russian University of Economics;

117997, Russia, Moscow, 36 Stremyanny Lane;

Gryzunova.NV@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8582-7389

Khvostova Anastasia Aleksandrovna, Graduate Student, Plekhanov Russian University of Economics;

117997, Russia, Moscow, 36 Stremyanny Lane;

hvostova_92@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2496-9030

Tramova Aziza Mukhamadiyaevna, Doctor of Economics. Sciences, Professor of the Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

117997, Russia, Moscow, 36 Stremyanny Lane;

Tramova.AM@rea.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4089-6580

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338.26 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-329-344
EDN: VPQFLF

Возможные последствия внедрения умных производственных систем «Умная фабрика» в период интеллектуализации среды обитания

О. З. Загазежева, С. Х. Шалова

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В статье рассматриваются возможные последствия внедрения умных производственных систем «Умная фабрика». Исследуются внедрение роботизированных систем в производственную деятельность, а также некоторые экономические и социальные эффекты. В работе также рассматриваются передовые информационные и коммуникационные технологии, в частности цифровые, которые будут способствовать рациональному использованию материалов, а также минимизации монотонных и физически сложных работ в производственной деятельности. Вместе с тем эти технологии оказывают положительное влияние на социо-экономическое развитие. Внедрение «Умных фабрик» должно обеспечить в период растущей конкуренции конкурентоспособную продукцию с оптимизационным подходом к издержкам и ошибкам, которые возникают при производственной деятельности. В ходе интеллектуализации производственно-экономической сферы необходимо знание объективных причинно-следственных связей, определяющих характер эволюционирования производственно-экономических систем. Знание этих связей позволит синтезировать алгоритмы адаптивного управления безопасным развитием общества. Авторами также рассматриваются развитие робототехники, производственные возможности в контексте внедрения «умных фабрик», социальные последствия в виде безработицы и управление данным процессом.

Ключевые слова: умные производственные системы, производственно-экономические системы, роботизированные системы, интеллектуальные решения, социо-экономическое развитие

Поступила 07.11.2023, одобрена после рецензирования 22.11.2023, принята к публикации 27.11.2023

Для цитирования. Загазежева О. З., Шалова С. Х. Возможные последствия внедрения умных производственных систем «Умная фабрика» в период интеллектуализации среды обитания // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 329–344. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-329-344

JEL: R11 Original article

Possible consequences of the development of smart production systems “Smart Factory” during the period of intellectualization of living environment

O.Z. Zagazezheva, S.Kh. Shalova

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article discusses the possible consequences of the introduction of smart production systems “Smart Factory”. The introduction of robotic systems into production activities, as well as some economic and social effects are being investigated. The paper also discusses advanced information and

© Загазежева О. З., Шалова С. Х., 2023

communication technologies, in particular digital ones, which will contribute to the rational use of materials, as well as minimize monotonous and physically complex work in production activities. At the same time these technologies have a positive impact on socio-economic development. The introduction of "Smart Factories" should provide competitive products in a period of growing competition, with an optimized approach to costs and errors that arise during production activities. During the intellectualization of the production and economic sphere, it is necessary to know the objective cause-and-effect relationships that determine the nature of the evolution of production and economic systems. Knowledge of these connections will allow synthesizing algorithms for adaptive management of safe development of society. The authors also consider the development of robotics and production capabilities in the context of the introduction of "Smart Factories" and the social consequences in the form of unemployment and management of this process.

Keywords: smart production systems, production and economic systems, robotic systems, intelligent solutions, socio-economic development

Submitted 07.11.2023, approved after reviewing 22.11.2023, accepted for publication 27.11.2023

For citation. Zagazezheva O.Z., Shalova S.Kh. Possible consequences of the development of smart production systems "Smart Factory" during the period of intellectualization of living environment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 329–344. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-329-344

Актуальность темы исследования заключается в том, что внедрение умных систем в производство влечет трансформацию соответствующих инфраструктур и значительную смену характера производственных отношений. Возникает необходимость на начальном этапе сохранить социогуманитарное содержание производственной деятельности.

Основной характерной чертой «умных фабрик» является полная автоматизация производственного процесса и взаимодействий между машинами посредством облачных вычислений, интернета вещей и т.д. Модульный принцип, который заложен в робототехнических устройствах, влияет на развитие технического уровня. С помощью модульных устройств решаются проблемы, связанные с управлением не только роботами, но и комплексами (участками, цехами) в целом. Такие факторы будут способствовать ускорению внедрения и удешевления роботов в составе технологических комплексов.

Научная новизна работы заключается в выявлении некоторых социальных и экономических последствий, возникающих в процессе внедрения умных производственных систем «Умная фабрика» в период интеллектуализации среды обитания. Также предлагаются некоторые принципы адаптивного управления безопасным развитием общества в данный период.

Предметом исследования является анализ характеристик развития «умных фабрик», фактически существующих на мировой территории.

Объектом исследования являются социальные и экономические процессы, связанные с автоматизацией и роботизацией производственной деятельности в контексте «умных фабрик».

Целью исследования является определение социоэкономических последствий внедрения умных производственных систем «Умная фабрика» в период интеллектуализации среды обитания.

В качестве **методологии исследования** в первую очередь будет использоваться метод индукции – движение от частного к общему, синтез изученных роботизированных решений в мировой и российской литературе, анализ источников и формирование перечня успешных решений.

«Умная фабрика» – концепция производства, основанная на применении сложных комбинаций новых технологий для разработки гибких, роботизированных, самоорганизующихся производственных систем и мощностей. В данной работе исследуются практиче-

ские случаи внедрения современных технологических решений на российских и зарубежных предприятиях и экономические последствия данного процесса.

Учеными прогнозируется, что данные предприятия могут в дальнейшем производить высокоинтеллектуальную продукцию [1]. Производственные сборочные роботизированные линии со временем станут внедряться в контексте «умных фабрик», и конечным результатом должны стать более быстрые, эффективные и точные производственные процессы с меньшим количеством ошибок. «Умные фабрики» могут достичь новых уровней эффективности и гибкости за счет скоординированного соединения различных процессов, информационных потоков и заинтересованных сторон в единой системе промышленного производства. «Цифровые фабрики», «интеллектуальные фабрики» – характерные наименования применяемых инновационных промышленных проектов, распространенных за рубежом[1].

Внедрение современных технологических решений в производственный процесс широко освещается в работах отечественных и зарубежных авторов. Большое внимание уделяется проблемам технического зрения (H. Golnabi, A. Asadpour, L. Pérez, Í. Rodríguez, N. Rodríguez, R. Usamentiaga, D.F. García) [1, 2]. Интегрированный комплекс цифровых моделей, методов и инструментов, средств моделирования и 3D-визуализации, взаимосвязанных между собой на основе больших данных, получил отражение у Г. А. Садовского [3]. Созданию цифрового двойника до его производства за счет использования соответствующего ПО уделено внимание в работах E. Filos, C. Helmrath, R. Riemenschneider [4]. Созданию цифрового макета, цифрового двойника, опытного образца – А. И. Боровков и В. С. Осьмаков [5]. Также исследуются проблемы контроля и оптимизации процессов производства, осуществляющихся с использованием специализированного программного обеспечения, лазеров и устройств с искусственным интеллектом, вмонтированных в рабочие машины и инфраструктуры.

В представленном нами исследовании рассмотрена и проанализирована практическая реализация и фактическое применение теоретических данных, полученных из трудов зарубежных и отечественных исследователей. Например, широкое использование робототехнических агрегатов, манипуляторов и технического зрения отмечено в области автомобилестроения, обрабатывающей промышленности. Разносторонность направлений применения компьютерно-интегрированного производства и внедрения робототехники является некоторой гарантией для дальнейшего развития модели системы комплексных технологических решений во всех существующих звеньях глобальных цепочек поставок и последующего объединения имеющихся «цифровых» и «умных фабрик» в сеть.

Роботизированная автоматизация процессов (RPA) часто используется в отраслях и компаниях с большим количеством повторяющихся операций. Индустрия здравоохранения является популярным сектором для возможного внедрения данной технологии[2]. Квалификация сотрудников и огромные первоначальные затраты были двумя серьезными препятствиями для малых предприятий на пути к интеграции роботов в производство. Однако растущая мировая тенденция развития «все как услуга» устранила данную проблему, и на сегодняшний день RPA доступен для компаний через модели «роботы как услуга», часто поставляющиеся с аналитикой, мониторингом и профилактическим обслуживанием в дополнение к множеству других преимуществ, таких как быстрое масштабирование и гибкость для динамической настройки платформ в зависимости от потребностей. Широкое распространение на мировой арене приобрели платформы для сбора данных с использованием автономных мобильных роботов (AMR). В связи с быстрым расширением электронной ком-

[1] 14 тенденций робототехники 2022 года: коботы, RPA, «умные фабрики», инвестиции в роботов, сотрудники-роботы, ИИ и др. https://b-mag.ru/14-tendencij-robototehniki-2022-goda-koboty-rpa-investicii-v-robotov-sotrudniki-roboty-ii-i-dr/

[2] Ведущие тенденции развития робототехники в 2022 году. https://salamba.ru/vedushhie-tendentsii-razvitiya-robototehniki-v-2022-godu/

мерции, повышением уровня автоматизации производства, нехваткой рабочей силы и массовой персонализацией продукции спрос на AMR растет с поразительной скоростью. Несмотря на то, что в 2017 году отрасль AMR (аппаратного обеспечения) оценивалась всего в 0,88 млрд евро, к 2022 году прогнозировался ее рост до 6,17 млрд евро, а программное обеспечение для мобильных роботов увеличит рыночную стоимость оборудования AMR еще на 2,64 млрд евро.

Все больше складов и распределительных центров автоматизируют свои операции, устраняя ошибки, что позволит промышленным роботам работать быстрее, правильнее и эффективнее [6, 7].

Комплексные роботизированные решения и примеры их применения в различных отраслях

Рассмотрим производственные мощности, склады и распределительные центры. Промышленные роботы смогут работать быстрее, правильнее и эффективнее, поскольку все больше таких объектов автоматизируют свои операции, устраняя несоответствия. Благодаря своей энергоэффективности современные роботы значительно сокращают потребление энергии в промышленности: их повышенная точность приводит к меньшему количеству брака и дефектных продуктов среди произведенного, что улучшает соотношение вложенных ресурсов и конечного результата.

Роботы также помогают эффективно производить фотоэлектрические элементы и водородные топливные элементы – два типа устройств, использующих возобновляемые источники энергии.

Согласно отчету Всемирного экономического форума 2018 года, к 2022 году прогнозировалась не только потеря 75 млн рабочих мест в результате внедрения робототехники, в том числе на заводах и фабриках, но и создание 133 млн новых, что позволяло избежать массовой безработицы.

Другое исследование Международной федерации робототехники признало значимость роботов в росте занятости в некоторых секторах, например, автомобилестроении. В ходе исследований McKinsey Global Institute и IZA (Институт экономики труда) было обнаружено, что полностью автоматизирована меньшая доля рабочих мест (10 % и 35 % соответственно по данным двух вышеупомянутых исследований). В большинстве случаев роботам и людям придется работать вместе, и данный факт повысит общую производительность.

Перемещение и размещение больших штампованных металлических панелей становится намного сложнее, так как рабочий теряет физическую силу и ловкость при достижении определенного возраста. Риск несчастных случаев на рабочем месте возрастает, а производительность работников снижается по мере необходимости больших затрат времени для выполнения поставленных задач. Для производства автомобиля Audi A1 всего на заводе работает 550 промышленных роботов в кузовном и 30 – в малярном цехах. Оценка эффекта коботов показала, что теперь рабочие считают свою работу менее напряженной, время производства сократилось.

В Boulangerie La Fabrique с менее чем 20 сотрудниками была применена технология роботизированного захвата с шестью пальцами, который захватывает буханки и транспортирует их в упаковочную машину. По мере спускания буханок по конвейеру к роботизированной станции подбора и при наличии на конвейере достаточного их числа для заполнения одного слоя мешка с хлебом происходит блокировка фотоглаза с запуском робота к последующим действиям. Данное роботизированное решение было разработано компанией Universal Robots специально для удовлетворения потребностей пекарни: облегчить рабочую нагрузку на упаковочной линии, усовершенствовать процесс упаковки и удержать работников, освобождая их от рутинной работы.

Привлекающие общественное внимание виды деятельности, связанные с торговлей, могут вызвать интерес для разворачивания роботов, требующих сохранения привлекательности сделок путем расширения перечня творческих элементов и минимизации менее желательных. Таким образом, люди должны быть обучены, чтобы добиться успеха в этой новой среде. Положительное влияние автоматизации на занятость Оксфордское исследование «Будущее трудоустройства» имеет простую предпосылку: если машина (также известная, как ИИ, машинное обучение, робототехника, компьютер и т. д.) может автоматизировать работу. Используя прогностическое моделирование, исследование выделило 702 рабочих места с высоким, средним и низким риском компьютеризации и пришло к выводу, что 47 % из них могут быть заменены машинами [8].

Цифровизация движет электромобилями, изменениями в области энергетики и переходом к устойчивому развитию.

Интегрированная система, в которой технология машинного зрения, робототехника и управление движением объединены в один процесс, обеспечивает автоматизацию производства. Цифровое производство предусматривает наличие следующих составных частей: интернета вещей, производственных систем, робототехники.

Однако понимание шагов, необходимых для внедрения комплексного решения, может быть трудным для многих предприятий, поскольку количество вариантов, новые протоколы связи и отраслевые стандарты меняются и множатся каждую неделю [9].

Комплексное роботизированное решение использует робототехнику для решения производственных проблем посредством объединения нескольких технологий для значительной автоматизации процесса. Решение, скорее всего, будет включать в себя комбинацию робототехники, машинного зрения, движения и управления, организованную таким образом, чтобы соответствовать конкретным потребностям поставленных задач.

Решение может быть простым, как, например, робот SCARA, перемещающий детали со спускового механизма чашеобразного питателя на деталь на поддоне конвейера. Комплексное решение также может быть очень сложным и включать систему трехмерного зрения. Например, когда роботу необходимо подобрать детали из корзины, в которой детали не расположены и не закреплены каким-либо образом, 3D-камера может направить робота туда, где находится место захвата каждой детали, используя сопоставление с образцом и искусственный интеллект.

Технологии сочетаются с «умным» уровнем, реализованным путем применения методов обработки данных, таких как искусственный интеллект, машинное обучение и глубокое обучение. Этот интеллект системы является ключевым отличием предыдущей автоматизированной функциональности объекта от новой эры Индустрии 4.0[3].

Робототехника может варьировать от тяжелого промышленного оборудования до легких коллаборативных роботов. Помимо понимания того, какие функции требуются комплексной системе, важно также учитывать безопасность и связь. Безопасность является важнейшим аспектом производственного предприятия, и это становится еще более важным при внедрении автоматизации. Существуют международные и национальные стандарты безопасности, которые охватывают как конструкцию робота, так и то, как он используется, контролируется и обслуживается.

Ключевое значение имеет и коммуникация, особенно в отношении автоматизированных производственных решений, где связь между роботами и между роботами и людьми может влиять на производительность, безопасность и эффективность. Существует целый ряд коммуникационных протоколов, подходящих для различных аспектов сквозной системы, при этом большинство производственных решений полагаются на Ethernet в качестве всеобъемлющего протокола.

[3]7 ключевых технологий Индустрии 4.0: от машинного обучения до 3D-печати. https://hightech.fm/2020/03/19/industry-4-0



Рис. 1. *Компоненты интегрированных производственных систем*

Fig. 1. *Components of integrated manufacturing systems*

Внедрение роботизированных технологий в производственную среду и некоторые социальные и экономические последствия

Внедрение комплексного решения – это многоэтапный процесс, который включает в себя создание бизнес-кейса, разработку операционной модели, выбор потенциальных поставщиков, управление изменениями в бизнесе и разработку соответствующей дорожной карты.

Программное обеспечение для моделирования роботов и документация, предоставленная их производителями, помогают определить, сможет ли выбранная модель робота достичь требуемых позиций. Для систем технического зрения необходимо убедиться, что расчеты фокусного расстояния и поля зрения верны. Стоит также убедиться в обеспечении достаточного освещения, так как системам технического зрения нужно правильное освещение, чтобы гарантировать работу проверок должным образом.

Распространенной задачей, требующей решения для автомобилестроения, остается сборка деталей. Робот подбирает детали разной формы из корзины, проблема заключается в том, что место захвата не всегда находится в одном и том же месте, что делает запрограммированный захват робота бесполезным. Роботы отлично справляются с повторяющимися задачами, но позиция выбора и размещения должна каждый раз находиться в одном и том же месте. Для решения данной проблемы можно использовать 3D-камеру, как система Fanuc IRVision (рис. 2). Данная система состоит из 3D-камеры, которую можно установить на конце манипулятора робота или над рабочей зоной. Когда камера делает снимок, она может использовать инструменты технического зрения для поиска элементов, в которых робот

должен захватить деталь. Система IRVision полностью интегрирована в контроллер робота Fanuc, поэтому дополнительное программное обеспечение не требуется. После того, как положение робота будет обновлено с камеры, он сможет выбрать и разместить деталь.



Рис. 2. *Использование системы IRVision в операции сбора*[4]

Fig. 2. *Using IRVision in a collection operation*

Другой типичной проблемой является разгрузка деталей с конвейерной ленты без остановки конвейера. Эта операция прослеживается практически в любой отрасли, включая пищевую и фармацевтическую промышленность. Проблема аналогична предыдущему примеру: позиция выбора не всегда находится в одном и том же месте.

В этом сценарии робот работает в 2D-плоскости, поэтому 3D-камера не нужна, но возникает дополнительная проблема, когда части движутся в момент попытки робота их захватить. Для решения этой проблемы нужны два компонента: камера и конвейер с сервоприводом. Используя серводвигатель для привода конвейера, можно точно определить, с какой скоростью движутся детали.

ABB предлагает дополнение к программному обеспечению, которое будет использовать данную скорость для динамического перемещения обученного захвата с той же скоростью, что и детали. Система машинного зрения сообщит роботу, где в обученном кадре будет находиться деталь. Однако вышеупомянутый сценарий возможен лишь при условии, что данная деталь не перемещается между кадром камеры и корпусом робота. При получении обновленных данных по обновленному положению с камеры он может начать подход с целью подобрать деталь в движении с помощью надстройки отслеживания конвейера.

Представленный ниже рисунок 3 отражает систему для разгрузки конвейера на заводе Uniliver, зарегистрированном на территории РФ.

Роботы ABB применяются на предприятии для сборки коробов с готовой продукцией на паллеты; они обслуживают 6 высокоскоростных упаковочных линий по производству соусов и майонезов. Робот-паллетайзер со сложным универсальным захватом манипулирует паллетой, укладывает ряды коробов и устанавливает прокладочные листы между слоями коробов. После сборки готовая паллета оправляется на склад хранения.

[4] https://www.directindustry.com.ru/prod/fanuc-europe-corporation/product-32007-1807530.html



Рис. 3. *Цифровые роботизированные решения ABB*[5]

Fig. 3. *ABB digital robotic solutions*

В рамках годового отчета анализировался рынок «Умных фабрик» в разрезе используемых в них компонентов (промышленных датчиков, промышленных роботов, промышленных 3D-принтеров, систем машинного зрения), решений (SCADA6, MES7, промышленной безопасности, PAM8), в промышленности (обрабатывающая промышленность, дискретная промышленность) и Global Forecast 2027.

Глобальный объем рынка «Умных фабрик» оценивается в 86,2 млрд долларов США в 2022 году и, по прогнозам, достигнет 140,9 млрд долларов США к 2027 году[9]. Увеличение внедрения интернета вещей, искусственного интеллекта, а также расширение использования промышленных роботов на фабриках являются основными факторами, стимулирующими рост рынка «Умных фабрик».

Сегмент промышленных датчиков занимал наибольшую долю за отчетный период. Интеллектуальные фабрики обеспечивают возможность подключения на всех этапах производства благодаря применению датчиков. Этот фактор может помочь обеспечить более эффективный обмен информацией по всему предприятию.

Современные производственные операции включают в себя взаимосвязанную сеть машин, оснащенных широким спектром сенсорных технологий. Технология интеллектуальных преобразователей (в том числе датчики и исполнительные механизмы) позволяет использовать двухуровневый подход к проектированию, который позволяет снизить сложность системы, вызванную проблемами между разработчиками приложений и производителями. Установка интеллектуальных датчиков в производственное оборудование или складские системы может повысить эффективность и точность.

[5]Цифровые роботизированные решения ABB на заводе Unilever в России. https://new.abb.com/news/ru/detail/28909/ABB-unilever

[6]Система Supervisory Control And Data Acquisition – программно-аппаратный комплекс сбора данных и диспетчерского контроля. Верхний уровень системы промышленной автоматизации.

[7]Manufacturing Execution System – управление производством.

[8]Privileged Access Management – решения для контроля привилегированных пользователей.

[9]https://www.asdreports.com/market-research-report-610356/smart-factory-market-global-forecast – Рынок интеллектуальных фабрик – глобальный прогноз до 2027 года

Достижения в автомобилестроении и острая конкуренция на мировом рынке вынуждают производителей автомобилей стратегически инвестировать в свою производственную инфраструктуру, чтобы получать самую высокую производительность с минимальными потерями.

Азиатско-Тихоокеанский регион занимал наибольшую долю в 2021 году, и, согласно прогнозам, будет расти самыми высокими темпами в течение рассматриваемого периода. Увеличение числа операций автоматизации в обрабатывающей и дискретной промышленности является одним из основных факторов, определяющих рост рынка «Умных фабрик» в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Кроме того, такие страны, как Китай, Япония, Южная Корея и Индия вносят свой вклад в рост рынка «Умных фабрик» в регионе. А такие производители, как Volkswagen (Германия), Toyota (Япония), Renault-Nissan (Нидерланды), Daimler (Германия), Tata Motors (Индия) и Hyundai Motors (Южная Корея), вкладывают значительные средства в интеллектуальные заводские решения в региональных объектах.

Новые типы дизайна будут запущены в производство с помощью гибкой производственной системы. Таким образом, такая система подходит для низкого и среднего спроса на товары, и ожидается изменение спроса. Универсальный метод производства является высокоавтоматизированным, но для управления системой, загрузки и выгрузки компонентов, инструментов для регулировки, а также технического обслуживания и ремонта оборудования по-прежнему требуются люди.

Робототехника используется в обрабатывающей промышленности для обеспечения гибкости производства [7, 10]. Инспекция (осмотр) – часть деятельности, в которой роботы все чаще используются на заводе. Когда робот помещает датчик в стандартный объект проверки заготовки, он решает, соответствует ли компонент необходимым требованиям. Индивидуальные инструменты на конце манипулятора, базовый радиус его действия и полезная нагрузка являются требуемыми и гибкими для всего приложения промышленного робота, поддерживающего обширный инвентарь и рабочие ячейки, что позволяет легко интегрироваться.

Сочетание робототехники и 3D-печати способствует управлению расходом материалов. Роботизированная 3D-печать представляет собой более устойчивый метод производства. Для создания крупных металлических трехмерных объектов 3D-принтер объединяют с промышленным роботом со сварочным оборудованием. Наибольшую выгоду из роботизированной 3D-печати может извлечь строительная отрасль, что позволяет дизайнерам и архитекторам на практике экспериментировать с разнообразными формами [9, 11]. В настоящее время передовые технологии становятся более эффективными, адаптируемыми и точными. За последние несколько лет на сборочных линиях было сделано несколько улучшений для поддержки повседневных задач рабочих [12–14].

В промышленном производстве расширяется применение автоматизированных систем управления и контроля технологических процессов на всех производственных стадиях и видах производства. Предприятия предъявляют возрастающий спрос на инжиниринговые услуги и сервисы по внедрению информационных технологий. Активно развивается взаимная информационная интеграция как на базе частных информационных решений (работа с партнерами, управление поставками), так и с использованием государственных информационных систем. Количество предприятий, зарегистрированных в государственной информационной системе промышленности, составило более 30 тысяч, из которых более 17 тыс. компаний представлены промышленными предприятиями.

Усиливается технологическая конкуренция, в том числе выходящая за рамки технических характеристик продукции. Последствием цифровизации стало сокращение циклов разработки и продажи продукта. Во многих отраслях произошел переход к сервисной модели поставок (объединение товара и обслуживающих услуг) с дальнейшей ориентацией на «кастомизацию» потребительского решения без перехода прав собственности. Сформировавшиеся цифровые платформы привели к смещению рентабельности из сферы про-

изводства в сферу продаж и обслуживания сначала в потребительском секторе, а затем и на наиболее востребованных отраслевых рынках [14].

С 2022 года открываются возможности реализации промышленной политики на основе перечня инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 октября 2021 г. № 2816-р, в первую очередь по направлениям «строительство», «экология», «цифровая трансформация» и «технологический рывок».

Перечень российских разработок, замещающих иностранные IT-продукты, представлен в таблице 1.

Таблица 1. Перечень российских разработчиков, стремительно растущих на рынке ИТ[10]

Table 1. List of Russian developers rapidly growing in the IT market

Компания	Наименование разрабатываемого продукта	Наименование замещаемого продукта	Выручка за 2022 год, рублей	Выручка за 2021 год, рублей	Динамика, %
Isource	Управление закупками и отношениями с поставщиками	SAP, Oracle	15900	2517	531,7
ГК «Астра»	Операционные системы, СУБД и др. системный софт	Microsoft, Oracle	6530	2370	175,5
Бифорком Тек	Тонкие клиенты и маршрутизаторы	HP, Cisco	5166	1087	375,3
Постгрес Про	СУБД	Oracle, Microsoft	4386	1330	229,8
Юзергейт	Межсетевые экраны и др. ИБ-продукты	Fortinet, Check Point	3723	1029	261,9
МойОфис	Офисный софт	Microsoft	3330	842	295,6
Р7	Офисный софт	Microsoft	1510	504	199,6
Киберпротект	Резервное копирование и восстановление данных	Commvault, Veeam	1349	603	123,7
Ред софт	Операционные системы, СУБД и др. системный софт	Microsoft, Oracle	1293	582	122,3
Базальт СПО	Операционные системы	Microsoft	920	338	172,2

Целевые показатели соответствуют показателям национальных целей. Активное применение IT-продуктов отмечено и в металлургической отрасли: «Малленом Системс», действующая с «Дата-Центр Автоматикой», разработала систему внутрицеховой логистики и диспетчеризации для ПАО «НМЛК», представляющей собой, по сути, «цифрового двойника» сталеплавильного производства. Получаемые данные из видео формируют комплексные информационные данные касательно участка фиксации кранов и их состояния, а также стальковшей и чугуновозов в двух цехах. На базе полученных данных в системе происходит реализация оптимального планирования и оперативного перепланирования последующей загрузки агрегатов. Экономический эффект от внедрения ИИ, по планам производителя должен составить около 100 млн руб. в год. Более того, уже сейчас удалось минимизировать расходы на электроэнергию, графитированные электроды и алюминиевые катанки. Это стало возможным за счет сокращения времени выдержки металла в стальковше до 7 %. Промежуточным результатом является и отмечающееся за два месяца опытно-промышленной эксплуатации системы снижение средней выдержки – 5 %[11].

[10]https://www.tadviser.ru/index.php/

[11]https://www.rbc.ru/economics/08/09/2023/64f8a2219a794746be0720e9

Четвертая промышленная революция и новые интеллектуальные технологии были вызваны постоянным изменением традиционных производственных процессов и рынка. Основное внимание уделяется использованию устройств связи громоздких аппаратов, таких как межмашинное взаимодействие и интернет вещей, для повышения уровня автоматизации, улучшенной связи и отслеживания, а также интеллектуальных машин, которые могут оценивать и диагностировать проблемы без участия человека. Удаленная диагностика, проверка и даже ремонт связанных продуктов позволяют установить более лояльные отношения с клиентами, повышают ценность и позволяют поставщикам поддерживать ожидаемую производительность и постоянство. Он создает заблаговременное уведомление, идентифицирует и получает данные из замкнутых циклов, которые могут направлять потенциальные изменения качества продукта.

Индустрия 4.0 представляет собой новую эру в промышленности, где автоматизация, интернет вещей, искусственный интеллект, облачные вычисления и другие современные технологии используются для улучшения производства, оптимизации процессов и создания новых бизнес-моделей. В данной статье нами была рассмотрена роботизация как один из ключевых аспектов Индустрии 4.0. Роботы используются для выполнения различных задач, начиная от монотонной сборки до сложных операций по обработке материалов. Они также способны работать вместе с людьми в рамках гибких производственных систем. Роботизация позволяет повысить производительность, улучшить качество продукции, сократить издержки и снизить риск возникновения ошибок. Благодаря возможности работать в тяжелых условиях и выполнять опасные задачи роботы также способствуют повышению безопасности на производстве. Кроме того, роботизация открывает новые возможности для создания инновационных бизнес-моделей и улучшения конкурентоспособности предприятий. Она также вносит значительный вклад в развитие экономики и создание новых рабочих мест, связанных с обслуживанием, программированием и разработкой робототехнических систем.

В настоящее время на заводах наблюдается всплеск числа автономных роботов, которые могут работать коллаборативно для повышения производительности. Точность роботов снижает количество ошибок по качеству, снижает затраты на утилизацию и переработку. Автоматизация приводит к наибольшей производительности при наименьших затратах. Соблюдение всех вышеуказанных условий позволит привлечь большее количество покупателей с непосредственным снижением объемов трафика и его стоимости. Внедрение в производство промышленного робота приведет к значимому увеличению количества производимых товаров [15].

Первая роботизированная процедура была реализована для литья под давлением. Здесь вещество используется в жидком состоянии и в этом процессе вводится под давлением в форму. Роботы используются исключительно для отделки объектов путем окрашивания их определенным веществом в косметических или защитных целях и являются важным аспектом многих методов производства [16]. Проблема, которую необходимо решить, одинакова как для окраски, так и для металлических изделий, поэтому широко используется в производстве автомобилей, электроники и мебели, включая промышленное оборудование для выполнения ряда операций, таких как автоматизация сварки, обработки материалов, упаковки, укладки на поддоны, дозирования, резки и т. д. Специалисты по производству и маркетингу разработали и внедрили инновационные индивидуальные решения для улучшения и расширения промышленных мобильных роботов в тесном сотрудничестве с различными отраслями. Многие люди считают, что взаимодействие между коботикой и промышленным интернетом вещей станет одним из самых преобразующих факторов в современном мире.

В настоящее время отмечается тенденция значительного роста готовности компаний к максимальному сохранению имеющегося у них штата сотрудников. Данный факт подтверждается компанией «Руссофт»: быстрая смена показателей в отношении компаний, гипоте-

тически готовых к сокращению численности своего персонала на 11,6 % при оптимистическом и 31,8 % при пессимистическом сценариях в апреле и фактические значения аналогичных показателей уже в мае на уровне 3,9 % и 15,2 % соответственно. Эти данные совпадает с прогнозами экспертов Всемирного экономического форума, в котором к 2022 году прогнозировали меньшее сокращение рабочих мест в результате внедрения робототехники[12].

Не только фабричные рабочие должны беспокоиться о том, что их заменят компьютеры или роботы. Представители многих профессий, несмотря на высокий уровень образования и квалификации, со временем будут заменены искусственным интеллектом и роботами. Обществу необходимо найти решения, которые не приведут к серьезным социальным волнениям или ущербу для бывших работников или трудоустроенных в другие отрасли.

Безработица, вызванная технологиями, была описана в 1930 году Мейнардом Кейнсом как экономическое восприятие, и автор также упомянул, что в будущем технологическая безработица заразит человечество. В последнее время данная идея подразумевает безработицу, вызванную роботами и возникающую в процессе роботизации, определяющуюся в качестве рабочих мест, занятых роботами.

Возможные решения.

1. Создание государством новых рабочих мест.

Работники среднего звена могут найти рабочие места, создаваемые и финансируемые государством для удовлетворения социальных и иных потребностей, таких как восстановление инфраструктуры и обновление городов, а также уход и обеспечение помощи пожилым и болеющим. Данный вид деятельности потребует значительного государственного финансирования, а также создания рабочих мест, имеющих социальный посыл, по сравнению с гарантированным годовым доходом для получателей, не делающих ничего полезного.

2. Распределение работы.

Другой набор стратегий направлен на распределение доступной работы между большим количеством работников, например, путем сокращения количества часов, которые отдельный сотрудник работает в день, неделю или год. Логика проста: при меньшем общем объеме работы существует потребность в распределении ее на большее количество работников, уменьшив количество отработанных часов на каждого сотрудника. Некоторые работодатели Кремниевой долины экспериментировали с сокращенной рабочей неделей и получили положительные результаты. Хотя эти идеи могут обеспечить значимую работу большему числу работников, их очевидная слабость заключается в том, что оплата труда на одного работника также может снизиться, если она не будет дополнена частными или государственными субсидиями.

3. Реформы образования и профессиональной подготовки.

4. Налоговая политика и финансовые стимулы. Можно использовать финансовые стимулы для создания рабочих мест. Например, налоговая льгота может предоставляться за каждое новое рабочее место. Стимулы налоговой политики также могут быть нацелены на работников, а не только на работодателей, например, путем расширения налоговой льготы по налогу на заработанный доход, чтобы обеспечить более высокие вознаграждения лицам, получающим государственную поддержку, чтобы они могли увеличить свой доход, устраиваясь на новую работу.

5. Стимулы для малого бизнеса.

Малый бизнес является важным генератором рабочих мест. Помимо увеличения количества рабочих мест, малый бизнес важен для решения проблемы технологической безработицы, так как уволенные работники с соответствующими навыками и идеями могут начать свой собственный малый бизнес. Таким образом, варианты политики, которые стимулируют

[12] https://www.it-world.ru/it-news/reviews/153501.html

или облегчают людям открытие собственного малого бизнеса, могут стать важным генератором новых рабочих мест. Потенциальная политика стимулирования создания новых малых предприятий включает субсидии, налоговые льготы, образовательные и обучающие программы для стартапов, а также льготы по государственным закупкам.

6. Поддержка новых парадигм трудоустройства.

«Экономика свободного заработка», в которой все большее число людей обеспечивает себя экономически за счет ряда предприятий с ограниченной продолжительностью и частичной оплатой рабочего времени и неполной занятости, сборов или «подработки». Вместо того, чтобы получать весь свой доход от одной работы с полной занятостью, участники «экономики свободного заработка» собирают доходы из различных источников, которые могут включать в себя неполный рабочий день или случайную подработку на традиционной работе.

7. Двустороннее влияние технологических инноваций.

Применение технологических инноваций (в частности, компьютеров, роботов и искусственного интеллекта) продолжает создавать новые рабочие места. Например, персонализированная медицина значительно увеличивает спрос на генетических консультантов, дроны создают тысячи новых рабочих мест для операторов, 3D-принтеры создают совершенно новые рынки для файлов САПР, а искусственный интеллект создает высокий спрос на программистов и инженеров-программистов. Хотя некоторые полагают, что угроза технологической безработицы может оправдать замедление технологических инноваций, такой подход не только лишит общество преимуществ новых технологий, но также, вероятно, принесет больше вреда, чем пользы, в отношении возможностей трудоустройства [17].

Некоторые положительные социальные, экономические и экологические эффекты от масштабирования умных производственных систем:

1. Повышение качества выпускаемой продукции, увеличение экономической эффективности производства за счет минимизации затрат.
2. Увеличение конкурентоспособности продукции и возможности ее экспортирования.
3. Сокращение отходов, потребления энергии и перепроизводства.
4. Облегчение и упрощение системы безопасности за счет самоорганизующихся систем в изменяющейся среде, минимизирующих человеческое воздействие и сокращающих простои [17].
5. Улучшение качества жизни людей посредством формирования новых ценностей, решения жилищных и бытовых вопросов, улучшения условий труда.
6. Минимизация производственного травматизма и рисков для здоровья и жизни персонала в результате оптимизации условий производства, создание условий для самореализации, развития человеческого потенциала, освоения новых знаний и компетенций [18].

Заключение

Спектр решений по автоматизации производства широк и разнообразен. Системы трехмерного зрения могут помочь в управлении роботами, а дополнительные пакеты программного обеспечения – в сложных вычислениях, таких как отслеживание работы конвейера. Используя компоненты и функции, предлагаемые производителями средств автоматизации, возможно значительно уменьшить проблемы, возникающие при внедрении комплексного роботизированного решения.

Последствия внедрения умных фабрик могут быть самыми разнообразными, хотя данные технологии внедряются только с целью улучшения производственных операций. Итак, массовое внедрение «фабрик будущего» может способствовать увеличению производительности и эффективности, минимизации издержек и сокращению потерь, переобучению персонала и появлению новых вакансий, изменению рабочих процессов, улучшению условий труда и т.д.

В целом внедрение умных фабрик может значительно изменить процессы производства и труда, приводя к увеличению эффективности, но требует серьезной подготовки и адаптации как с точки зрения технологий, так и человеческого потенциала.

Роботы становятся все более распространенными в большинстве областей повседневной жизни в результате развития искусственного интеллекта, машинного обучения, интернета вещей и больших данных. В начале пандемии использование робототехники предприятиями и потребителями увеличилось, и это продолжало ускорять разработку роботов. Роботизированная революция продолжит набирать обороты в 2023 году и будет расти далее благодаря доверию общества к технологиям и расширению территорий их доступности. За пределами обычных промышленных и складских отраслей эти внешние факторы подтолкнули к потребности в автоматизированных роботизированных системах и оборудовании, которая в ближайшие десять лет будет продолжать расти.

Безработица, с которой столкнется трудоспособное население при массовой роботизации и автоматизации, неизбежна, и уже следует принимать меры по урегулированию, такие как создание новых рабочих мест государством, распределение работы, налоговая и финансовая реформа, реформа образования и профессиональной подготовки помогут снизить социальную напряженность в сфере трудовых отношений в период технологической безработицы.

REFERENCES

1. Golnabi H., Asadpour A. Design and Application of Industrial Machine Vision Systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2007. Pp. 630–637.

2. Pérez L., Rodríguez Í., Rodríguez N., Usamentiaga R., García D. F. Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: a comparative review. *Sensors.* 2016. P. 335.

3. *Садовский Г. Л.* Анализ современных тенденций цифровой трансформации промышленности // Молодой ученый. 2017. № 14. С. 427–430.

Sadovsky G.L. Analysis of modern trends in digital transformation of industry. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2017. No. 14. Pp. 427–430. (In Russian)

4. Filos E., Helmrath C., Riemenschneider R. Smart factories with next generation of production systems. *European commission.* URL: http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/conference2011/fof-1-5-rolf-riemenschneiderchristoph-helmrath-11072011_en.pdf

5. *Боровков А. И., Осьмаков В. С.* Центр компьютерного инжиниринга СПбГУ. Национальная технологическая инициатива // Дорожная карта Технет. URL: http://fea.ru/ compound/national-technology-initiative (дата обращения: 01.10.2023).

Borovkov A.I., Osmakov V.S. Center for Computer Engineering of St. Petersburg State University. National Technology Initiative. *Dorozhnaya karta Tekhnet* [Road map of Technet]. URL: http://fea.ru/compound/national-technology-initiative (access date: 10/01/2023). (In Russian)

6. *Загазежева О. З., Шалова С. Х.* Особенности эволюции социально-экономических систем в период перехода общества в состояние гетерофазного интеллекта // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 2(106). С. 92–106. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-2-106-92-106

Zagazezheva O.Z., Shalova S.Kh. Features of the evolution of socio-economic systems during the period of society's transition to a state of heterophasic intelligence. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2022. No. 2(106). Pp. 92–106. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-2-106-92-106. (In Russian)

7. Chauhan C., Singh A., Luthra S. Barriers to industry 4.0 adoption its and performance implications: An empirical investigation of emerging economy. *J. Cleaner Prod.* 2021. Article 124809.

8. Esmaeilian B., Behdad S., Wang B. The evolution and future of manufacturing: a review. *J. Manuf. Syst*. 2016. Pp. 79–100.

9. De Looze M.P., Bosch T., Krause F. et al. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics.* 2016. Pp. 671–681.

10. Haleem A., Javaid M., Khan I.H. Current status and applications of artificial intelligence (AI) in medical field: an overview. *Current Medicine Research and Practice*. 2019. Pp. 231–237.

11. Negri E., Ardakani H.D., Cattaneo L. et al. A digital twin-based scheduling framework including equipment health index and genetic algorithms. *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Pp. 43–48.

12. Cherubini A., Passama R., Crosnier A. et al. Collaborative Manufacturing with Physical Human–Robot Interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016. Pp. 1–13.

13. *Загазежева О. З., Бжихатлов К. Ч.* Разработка модели взаимодействия в социо-эколого-экономической системе сельских территорий в условиях внедрения новых технологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 194–202. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-194-202. EDN: ARBCPL

Zagazezheva O.Z., Bzhikhatlov K.Ch. Development of a model of interaction in the socio-ecological-economic system of rural territories in the context of the introduction of new technologies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 194–202. DOI 10.35330/1991-6639-2022-6-110-194-202. EDN: ARBCPL. (In Russian)

14. Симченко Н. А., Тимиргалеева Р. Р., Цехла С. Ю. и др. Устойчивое развитие промышленности в условиях цифровой поляризации. Севастополь: Филиал МГУ в г. Севастополе, 2022. 242 с. ISBN 978-5-907330-91-7. DOI 10.35103/SMSU.2022.12.45.001. EDN: HJDRTF.

Simchenko N.A., Timirgaleeva R.R., Tsekhla S.Yu. et al. *Ustoychivoye razvitiye promyshlennosti v usloviyakh tsifrovoy polyarizatsii* [Sustainable development of industry in the conditions of digital polarization]. Sevastopol': Filial MGU v g. Sevastopole, 2022. 242 p. ISBN 978-5-907330-91-7. DOI 10.35103/SMSU.2022.12.45.001. EDN: HJDRTF. (In Russian)

15. *Белоновская, А. М.* Риски безработицы в условиях цифровизации экономики и роботизации промышленности // XXII Чаяновские чтения. Творческая экономика для устойчивого развития: сборник статей. 24–25 марта 2022 года. Москва: РГГУ, 2022. С. 67–73. EDN: FYOHGF.

Belonovskaya A.M. *Riski bezrabotitsy v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki i robotizatsii promyshlennosti* [Risks of unemployment in the conditions of digitalization of the economy and robotization of industry]. XXII Chayanovskiye chteniya. Tvorcheskaya ekonomika dlya ustoychivogo razvitiya: Sbornik statey. March 24–25, 2022. Moscow: RSUH, 2022. Pp. 67–73. EDN: FYOHGF. (In Russian)

16. Stevens Y.A., Marchant G.E. Policy Solutions to Technological Unemployment. Eds. LaGrandeur K., Hughes J. Surviving the Machine Age. 2017. Palgrave Macmillan, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-51165-8_8/

17. *Илькевич С. В.* Стратегия цифровой трансформации промышленных предприятий: Эффекты внедрения технологий умного производства. *Стратегические решения и риск-менеджмент.* 2022. № 13(3). С. 210–225. https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-3-210-225

Ilkevich S.V. Strategy for digital transformation of industrial enterprises: Effects of introducing smart manufacturing technologies. *Strategicheskiye resheniya i risk-menedzhment* [Strategic decisions and risk management]. 2022. No. 13(3). Pp. 210–225. DOI: https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-3-210-225. (In Russian)

18. *Загазежева О. З., Шалова С. Х.* Разработка моделей управления социально-экономическими системами на сельских территориях в условиях внедрения новых техно-

логий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 3(113). С. 40–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-3-113-40-54. EDN: EDSVYB

Zagazezheva O.Z., Shalova S.Kh. Development of models for managing socio-economic systems in rural areas in the context of the introduction of new technologies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 3(113). Pp. 40–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-3-113-40-54. EDN: EDSVYB. (In Russian)

Информация об авторах

Загазежева Оксана Зауровна, канд. экон. наук, зав. Инжиниринговым центром, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234

Шалова Сатаней Хаутиевна, науч. сотр. Инжинирингового центра, Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

satanei@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-1309

Information about the authors

Zagazezheva Oksana Zaurovna, Candidate of Economic Sciences, Head of the Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

oksmil.82@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0903-4234

Shalova Satanei Khautievna, Researcher of the Engineering Center, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

satanei@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-1309

СОЦИОЛОГИЯ

УДК 331.556; 316.65; 314.8 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-345-353
EDN: WEAPAA

Современные демографические и миграционные процессы в КБР и их влияние на социально-экономическое развитие

И. А. Табаксоев

Центр «Интеллектуальный анализ социально-экономических процессов и систем»
Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В статье анализируются современные демографические и миграционные процессы в КБР. На основании данных официальной статистики Росстата по КБР за 2010–2023 годы проведен сравнительный анализ показателей естественного движения населения и миграционных процессов в республике. В статье представлен анализ результатов авторского социологического исследования о миграционном поведении населения КБР, проведенного в 2022–2023 гг., которое отражает мотивацию населения республики к миграционной активности. Практическая значимость результатов, полученных в проведенном исследовании, обусловлена наглядной информацией о демографических и миграционных установках населения республики, которые могут быть использованы в принятии мер по снижению миграционного оттока человеческого капитала из Кабардино-Балкарии.

Ключевые слова: демографические процессы, Кабардино-Балкарская Республика, социально-экономические процессы, социокультурные процессы, миграционные процессы

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 04.12.2023, принята к публикации 09.12.2023

Для цитирования. Табаксоев И. А. Современные демографические и миграционные процессы в КБР и их влияние на социально-экономическое развитие // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 345–353. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-345-353

Original article

Modern demographic and migration processes in the KBR and their impact on the socio-economic development

I.A. Tabaksoev

The Center “Intellectual analysis of socio-economic processes and systems”
Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article analyzes modern demographic and migration processes in the KBR. Based on the data of the official statistics of Rosstat for the KBR for the period from 2010 to 2023, a comparative analysis of the indicators of the natural movement of the republic population was carried out. The article presents an analysis of the results of the author's sociological study on the migration behavior of the population of the KBR, conducted in 2022–2023, which reflects the motivation of the population of the republic to migration activity. The practical importance of the results obtained in the conducted study is due to the visual information about the demographic and migration attitudes of the population of the republic, which can be used in taking measures to reduce the migration outflow of human capital from Kabardino-Balkaria.

© Табаксоев И. А., 2023

Keywords: demographic processes, Kabardino-Balkarian Republic, socio-economic processes, socio-cultural processes, migration processes

Submitted 27.11.2023, approved after reviewing 04.12.2023, accepted for publication 09.12.2023

For citation. Tabaksoev I.A. Modern demographic and migration processes in the KBR and their impact on the socio-economic development. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 345–353. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-345-353

Современная социально-экономическая ситуация в РФ переживает глубокую системную трансформацию. Изменение геополитической и геоэкономической роли России в мире существенно повлияло на вектор развития страны. Для России с ее огромной территорией, дифференциацией природно-климатических и социально-экономических условий актуальным представляется региональный подход, то есть обеспечение устойчивого развития конкретного региона. В «Основных положениях стратегии устойчивого развития России» в части, посвященной региональному развитию, большое внимание уделяется экономической и демографической составляющим [1].

Демографический потенциал является связующим фактором между экономическими и социальными компонентами устойчивого социально-экономического развития страны в целом и регионов в частности, так как становится очевидным, что главными факторами устойчивого развития в XXI веке становятся знания, опыт, умение, здоровье, качество человеческого капитала. Тем самым демографический потенциал страны становится одним из важнейших факторов устойчивого развития как страны, так и отдельного региона РФ. Непрерывный всесторонний социально-экономический и демографический анализ со стороны властей и научного сообщества является необходимым инструментом для планирования и своевременного реагирования на протекающие процессы [2, 3].

Демографическая ситуация является результатом для оценки эффективности как политического управления федеральных властей, так и экономического развития страны. Из этого следует, что непрерывный анализ и мониторинг демографических и миграционных процессов определяет актуальность исследования данной темы.

Важнейшая задача в концепции устойчивого демографического развития состоит в том, чтобы определить динамику изменений в соответствии с устойчивым развитием. Для этого необходимо оценить демографический потенциал региона, определить инерционную составляющую, независимую от социального обустройства. Таким образом, успешное решение такой задачи зависит от выбора минимальных информационных индикаторов социально-демографической направленности в регионе [2].

Анализ демографических изменений населения Кабардино-Балкарии представляет несомненный интерес как в теоретическом, так и в научно-практическом осмыслении. Кабардино-Балкарская Республика – одна из наиболее сложных по социально-политическим и этнокультурным параметрам субъект РФ. Хотя Кабардино-Балкарская Республика и не выступает в качестве самостоятельного актора политического процесса, однако обладает рядом общерегиональных черт, является «идеальной» моделью многонационального субъекта. Этот субъект является частью общероссийского социально-политического и экономического пространства и обладает всеми его содержательными измерениями. Оно полиструктурно, сегментировано по степени политического влияния, зонам распространения федеральной и местной власти, характеру политических отношений, общественных и политических процессов, групповых интересов и настроений, влияющих на трансформацию населения [3, 5].

Для определения современной демографической ситуации в Кабардино-Балкарской Республике необходимо рассмотреть его в динамике и провести сравнительной анализ показателей. Для анализа взяты данные Росстата:

- 2015 г. – население составляет 862 050 чел., плотность населения – 69,15 чел./км², городское население – 52,21 % [2];
- 2023 г. – население составляет 903 266 чел., плотность населения – 72,44 чел./км², городское население – 51,97 % [4].

Таким образом, сравнительный анализ показывает, что численность населения и плотность увеличились. Основным фактором роста является увеличение сельского населения. В то же время городское население снизилось. Если просмотреть динамику с 2002 г., то данные наглядно показывают тенденцию изменения (табл. 1).

Таблица 1. Численность населения КБР за 2002–2023 гг. [2, 4].

Table 1. Population of the KBR for 2002–2023 [2, 4].

Годы	Все население	В том числе		Общая числ. населения, %	
		городское	сельское	городское	сельское
2002	901,4	510,2	391,2	56,6	43,4
2010	859,9	468,4	391,5	54,5	45,5
2020	868,4	452,1	416,3	52,1	47,9
2023	903,3	467,7	435,6	51,9	48,1

Одним из значимых показателей в демографии является рождаемость. Ретроспективный анализ тенденций воспроизводства населения в Кабардино-Балкарии показал, что с 2010-го по 2022 г. рождаемость снижается (табл. 2). С 2010 г. число рожденных на 1000 человек населения снизилось с 14,6 до 11,1.

Таблица 2. Показатели естественного движения населения КБР за 2010–2022 гг. [2, 4].

Table 2. Indicators of the natural movement of the population of the KBR for 2010–2022 [2, 4].

Показатели	2010	2013	2014	2015	2020	2022
Родившихся	12576	13365	13482	12627	10531	10072
Умерших	8080	7712	7597	7582	8770	7891
в том числе детей в возрасте до 1 года	75	90	90	87	57	41
Естественный прирост (+), убыль (-)	4496	5653	5885	5045	1761	2181
Зарегистрировано**:**						
браков	7060	6338	5772	5340	3949	4277
разводов	2353	2174	2173	2154	2242	4122

Из данных, приведенных в таблице 2, становится очевидным, что нынешний уровень рождаемости в КБР не обеспечивает даже простого воспроизводства населения, что является фактором для глубокого анализа. Для простого замещения поколений необходимо, чтобы в расчете на каждые 100 женщин фертильного возраста приходилось не менее 215 рождений. В настоящее время в КБР интенсивность деторождений или среднее число рождении на одну женщину 1,7 против необходимых 2,15. При этом в городах этот показатель еще ниже. Если в селах в среднем на одну женщину приходится двое или трое родившихся, то в городе – только один или два. В репродуктивном поведении населения

республики доминирует малодетная модель семьи. На этот фактор также влияет трансформация системы ценностей населения республики [6].

Немаловажной проблемой демографической ситуации в Кабардино-Балкарии является миграция. Основным фактором оттока населения из КБР остается социально-экономический, и объясняется он острой ситуацией на рынке труда, которая была усилена в период COVID-19 и в связи с санкционными осложнениями. Проблема с занятостью и трудоустройством населения и субъектах Северо-Кавказского региона, в том числе в Кабардино-Балкарии, настолько остра, что не первый год обсуждается на уровне Правительства России. Трудоизбыточность республики сопровождается миграцией, что неизбежно приведет к кадровому дефициту.

Основную массу мигрантов составляют представители самого активного и трудоспособного социального слоя (человеческого капитала). Интенсивный отток из республики квалифицированных кадров, простого рабочего класса, особенно молодежи, ведет к трансформации состава населения и снижению социально-профессионального кластера КБР [2].

Миграционные потоки и вектора направления можно разделить на внутреннюю миграцию в рамках СКФО и межрегиональную миграцию. Особо нужно отметить международную миграцию, которая за последние три года увеличивалась волнами. К первой волне можно отнести период начала СВО и санкционной политики против РФ. Ко второй волне можно отнести период частичной мобилизации. Многие специалисты и социологи делали попытки приблизительных подсчетов, сколько человек уехало из РФ в эти периоды волн миграции. Большинство специалистов указывают на сложности объективного подсчета точных цифр миграции. Однако примерное число уехавших они оценивают в более миллиона человек. По данным Росстата, численность уехавших в разы меньше, чем указывают специалисты. Это можно объяснить тем, что миграционные службы учитывают снятие с учета граждан, а большинство уехавших не снимались с учета в РФ, т.к. многие уезжали на период частичной мобилизации.

Следует отметить, что внутренняя миграция в республике характеризуется стабильным оттоком населения титульных наций в другие регионы Российской Федерации. Как отмечается экспертами по данной тематике, основными причинами оттока выступают социально-экономические факторы [7]. Также они подметили, что существенные сдвиги в этнодемографической структуре за последние десятилетия связаны с изменением места в ней, с одной стороны, русского населения, а с другой – «иных» демографических групп [8].

Внутрирегиональная миграция по СКФО характеризуется неравномерностью миграционных потоков и наличием регионов-доноров и регионов-реципиентов. К первым относятся северо-кавказские национальные республики, для которых характерен отрицательный коэффициент миграции, ко вторым – Ставропольский край, который аккумулирует в себе миграционные потоки, как трудовые, так и академические. Наибольшая миграционная нагрузка приходится на Москву и Московскую область – уникальный субъект Федерации, являющийся в силу своего столичного статуса, инвестиционной привлекательности и высокого уровня экономического развития крупнейшим в России центром притяжения всех видов мигрантов [2].

Статистические данные Росстата показывают, что оценки специалистов имеют основу, и действительно внешняя миграция увеличилась, а сальдо миграции показывает отток человеческого капитала республики. В то же время следует понимать, что не все уехавшие из республики официально снялись с учета, чтобы Росстат учитывал эти показатели.

Среди миграционного потока Кабардино-Балкарии на первый план выдвигается проблема трудовой миграции молодежи как русскоязычного населения, так титульных этносов.

Наибольшая часть трудовых мигрантов — это молодые образованные специалисты трудоспособного возраста, не удовлетворенные оплатой труда и уровнем жизни. В результате республика теряет определенную часть интеллектуального потенциала, которая ищет лучшие условия для самореализации и экономического благополучия. Эмиграция населения репродуктивного возраста потенциально снижает демографические показатели – снижает количество детей, которые могли бы родиться у эмигрантов [5, 9, 10].

Таблица 3. Внешняя миграция КБР за 2010–2022 гг. [4]

Table 3. External migration of the KBR for 2010–2022 [4]

	Прибыло	Выбыло	Сальдо миграции
2010			
Всего	**2299**	**5717**	-3418
межрегиональная	2079	5593	-3514
международная	220	124	96
в том числе:			
СНГ	163	72	91
другие зарубежные страны	57	52	5
2020			
Всего	8691	9567	-876
межрегиональная	6617	6917	-300
международная	2074	2650	-576
в том числе:			
СНГ	778	722	56
другие зарубежные страны	1296	1928	-632
2022			
Всего	7919	11172	-3253
межрегиональная	5451	7258	-1807
международная	2468	3914	-1446
в том числе:			
СНГ	947	1337	-390
другие зарубежные страны	1521	2577	-1056

В 2022–2023 гг. нами было проведено социологическое исследование по выявлению основных причин отъезда населения из республики. Результаты проведенного авторского исследования позволяют с уверенностью сделать вывод о широком распространении миграционных настроений в республике. На прямой вопрос: «Мотивы Вашего переезда из Кабардино-Балкарской Республики?» большинство респондентов по возрастным и профессиональным категориям выбрали следующие варианты ответов: 49 % респондентов указали на ответ «Возможность получения любых социальных благ», 29 % респондентов указали на ответ «Возможность реализовать свой потенциал», 12 % респондентов указали на ответ «Возможность реализации предпринимательского потенциала». Лишь среди респондентов возрастной категории 21–29 лет большинство указали, что для них наибольшей мотивацией для переезда из КБР является «Возможность реализовать свой потенциал» (73 %). На втором месте у данной группы «Возможность получения любых социальных благ» (23,3 %) и на третьем месте – «Возможность реализации предпринимательского потенциала» (3,7 %) (рис. 1). В целом для подавляющего большинства респондентов наибольшей мотивацией для переезда в другой регион из КБР является возможность получения любых социальных благ, как экономических, так и социальных. На втором месте – возможность реализовать свой потенциал.

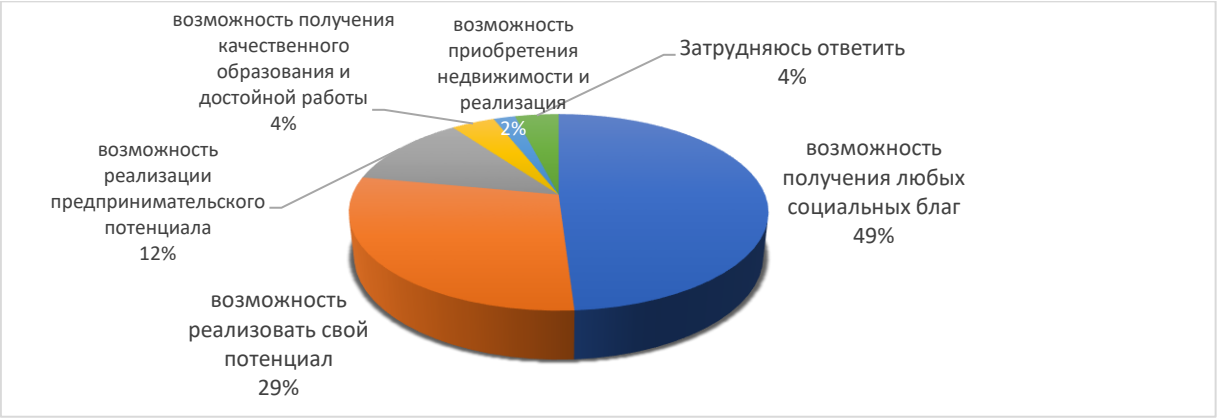


Рис. 1. *Распределение ответов на вопрос «Мотивы Вашего переезда из Кабардино-Балкарской Республики?»*

Fig. 1. *Distribution of answers to the question "The motives of your move from the Kabardino-Balkarian Republic?"*

На вопрос: «Как на Ваш взгляд, по какой причине люди уезжают из Кабардино-Балкарской Республики, в том числе за границу?» большинство респондентов по возрастным и профессиональным категориям ответили: 68 % респондентов указали на ответ «В республике жизнь тяжелая, едут в поисках лучшей жизни, в том числе за границу», 21 % респондентов указали на ответ «В поисках достойной работы (на заработки)», 7 % респондентов указали на ответ «В республике и в России жить опасно, тревожно, едут туда, где порядок, законность, стабильность, забота о людях», 3 % респондентов указали на ответ «Скрываются от правосудия, т.е. те, кому необходимо легализовать незаконно нажитые капиталы», 1 % респондентов указали на ответ «Скрываются от правосудия, за тяжкие преступления» (рис. 2).

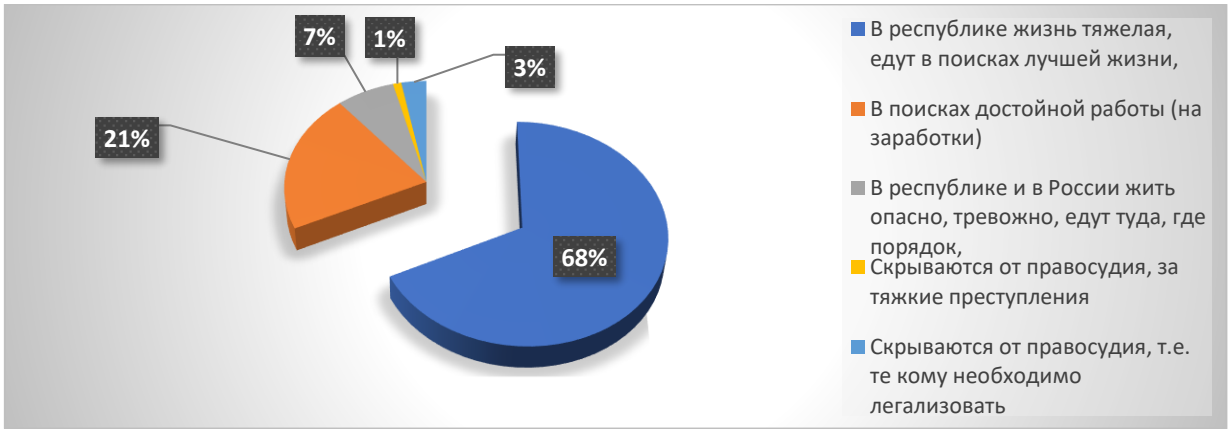


Рис. 2. *Распределение ответов на вопрос: «Как на Ваш взгляд, по какой причине люди уезжают из Кабардино-Балкарской Республики, в том числе за границу?»*

Fig. 2. *Distribution of answers to the question "In your opinion, for what reason do people leave the Kabardino-Balkarian Republic including going abroad?"*

Таким образом, если объединить два преобладающих ответа, то подавляющее большинство респондентов считают, что люди уезжают в поисках лучшей жизни и достойных доходов. На вопрос: «Скажите, пожалуйста, в какой регион страны Вы переехали из Кабардино-Балкарской Республики?» ответы респондентов распределились следующим образом (рис. 3).

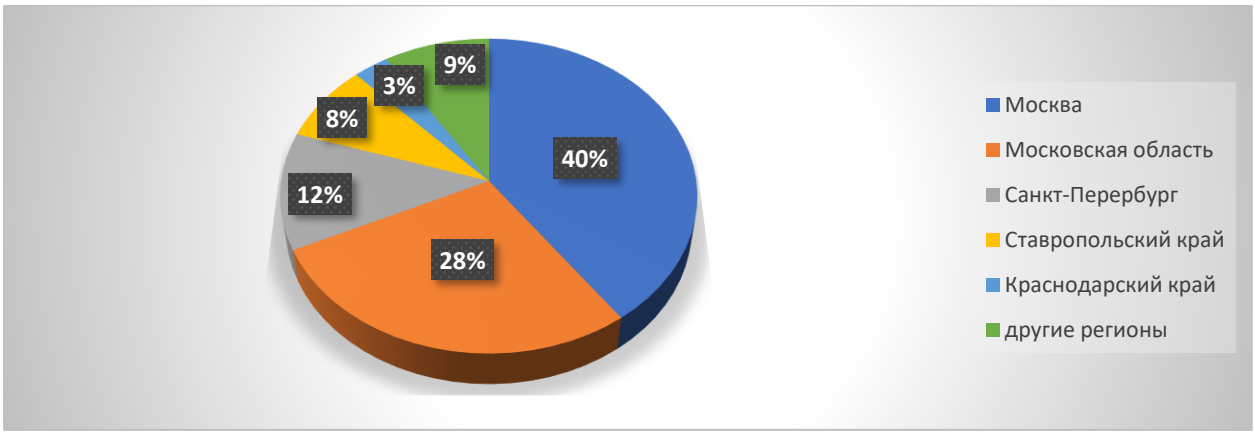


Рис. 3. *Распределение ответов на вопрос: «Скажите, пожалуйста, в какой регион страны Вы переехали из Кабардино-Балкарской Республики?»*

Fig. 3. *Distribution of answers to the question "Tell us, please, which region of the country did you move to from the Kabardino-Balkarian Republic?"*

Результаты показывают, что подавляющее большинство респондентов переехали из КБР в Москву и Московскую область, где сконцентрированы основные финансовые и социальные блага страны. Данные, полученные в рамках социологического исследования, показывают, что вектор миграционных притяжений не изменился в сравнении с предыдущими десятилетиями. Развитие социальных и экономических условий жизни и возможности Москвы и Московской области притягивают миграционные потоки.

Создание искусственных точек роста по всей стране пока не дает быстрых результатов по привлечению трудовой миграции. Для привлечения высококвалифицированных специалистов в конкретной области необходимо создавать комфортные условия и социальные возможности для удовлетворения потребностей.

Таким образом, анализ демографических и миграционных процессов в современной Кабардино-Балкарии свидетельствует о том, что низкий уровень экономического благополучия является основным фактором миграции населения. Данные процессы развития миграционных процессов могут привести к следующим негативным последствиям для республики:

- отток молодежи;
- отток квалифицированных специалистов (трудового потенциала);
- определенная часть уехавшего населения не видит перспектив для возвращения в республику;
- низкий уровень экономической привлекательности для возвращения молодежи в КБР;
- деформация возрастной и этнической структуры населения со всеми негативными последствиями.

Также особо следует обратить внимание на слабую взаимосвязь между миграционной политикой и концепцией социально-экономического развития как на региональном, так и на федеральном уровне. Политическая власть региона должна располагать необходимыми сведениями об отношении коренного населения к мигрантам, об их взаимоотношениях для координации и регулирования данных процессов. Наиболее эффективный метод получения такой исчерпывающей информации является регулярный анализ и мониторинг демографических и миграционных процессов в республике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные положения стратегии устойчивого развития России [Электронный ресурс]. URL: http://www-sbras.nsc.ru/win/sbras/bef/strat.html (дата обращения 25.11.2023).

2. *Табаксоев И. А.* Демографическая ситуация в Кабардино-Балкарской Республике и ее влияние на устойчивое развитие региона // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 4(72). С 137–141.

3. *Берова Ф. Ж., Яхутлов К. Л.* Миграционные процессы на Северном Кавказе в контексте национальной безопасности (на примере Кабардино-Балкарской Республики // Демографический и миграционный портрет Кавказа. Сер. «Демография. Социология. Экономика». Том 5. № 2 / ред. С. В. Рязанцев, Г. И. Гаджимурадова. Москва: Экон-Информ, 2019. С. 234–244.

4. «Кабардино-Балкария в цифрах». Краткий статистический сборник. 2023 / Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу [Электронный ресурс]. URL: https://26.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Кабардино-Балкария%20в%20цифрах.%202023.pdf (Дата обращения 27.11.2023).

5. *Табаксоев И. А.* Миграционные процессы в современной Кабардино-Балкарии: основные факторы и тенденции // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 2(70). С. 171–177.

6. *Кушхабиев А. В., Улаков М. З., Алхасов М. М., Табаксоев И. А*. Трансформация системы ценностей населения Кабардино-Балкарии в современных условиях. Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2019. 192 с.

7. *Берова Ф. Ж., Шериева А. А.* Миграционные процессы на Северном Кавказе и возможные их последствия (на примере Кабардино-Балкарской Республики) // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 3(113). С. 30–39. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-3-113-30-39

8. *Боров А. Х., Бербекова М. М.* Демографическая модернизация Кабардино-Балкарии: история и современные проблемы // Электронный журнал «Кавказология». 2019. № 2. С. 72–104. DOI: https://doi.org/10.31143/2542-212X-2019-2-72-104

9. *Табаксоев И. А.* Трансформация структуры населения Кабардино-Балкарской Республики и ее влияние на демографические процессы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2015. № 6(65). С. 146–153.

10. *Аккиева С. И., Тхамокова И. Х., Табаксоев И. А., Теммоев И. Ю.* Современное состояние и тенденции развития миграционных процессов в Кабардино-Балкарии // Успехи современной науки и образования. 2017. Том 7. № 2. С. 34–41.

REFERENCES

1. *Osnovnyye polozheniya strategii ustoychivogo razvitiya Rossii* [The main provisions of the strategy of sustainable development of Russia]. [Electronic resource]. URL: http://www-sbras.nsc.ru/ win/sbras/bef/strat.html (accessed 25.11.2023). (In Russian)

2. Tabaksoev I.A. Demographic situation in the Kabardino-Balkar Republic and its impact on the sustainable development of the region. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. № 4(72). Pp. 137–141. (In Russian)

3. Berova F.J., Yakhutlov K.L. *Migratsionnyye protsessy na Severnom Kavkaze v kontekste natsional'noy bezopasnosti (na primere Kabardino-Balkarskoy Respubliki* [Migration processes in the North Caucasus in the context of national security (on the example of the Kabardino-Balkarian Republic]. *Demographic and migration portrait of the Caucasus*. *Ser. "Demography. Sociology. Economy"*. Vol. 5. No. 2. Eds. S.V. Ryazantsev, G.I. Gadzhimuradova. Moscow: Ekon-Inform, 2019. Pp. 234–244. (In Russian)

4. «*Kabardino-Balkariya v tsifrakh». Kratkiy statisticheskiy sbornik* ["Kabardino-Balkaria in numbers" short statistical collection]. Department of the Federal State Statistics Service for the North Caucasus Federal District. 2023. [Electronic resource]. URL: https://26.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Kabardino-Balkaria%20b%20ciphers.%202023.pdf (accessed 27.11.2023). (In Russian)

5. Tabaksoev I.A. Migration processes in modern Kabardino-Balkaria: main factors and trends. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2016. № 2(70). Pp. 171–177. (In Russian)

6. Kushkhabiev A.V., Ulakov M.Z., Alkhasov M.M., Tabaksoev I.A. *Transformatsiya sistemy tsennostey naseleniya Kabardino-Balkarii v sovremennykh usloviyakh* [Transformation of the value system of the population of Kabardino-Balkaria in modern conditions]. Nalchik: Izd-vo KBNTS RAN, 2019. 92 p. (In Russian)

7. Berova F.Zh., Sherieva A.A. Migration processes in the North Caucasus and their possible consequences (on the example of the Kabardino-Balkarian Republic). *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 3(113). Pp. 30–39. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-3-113-30-39. (In Russian)

8. Borov A.H., Berbekova M.M. Demographic modernization of Kabardino-Balkaria: history and modern problems. *Elektronnyy zhurnal "Kavkazologiya"* [Electronic journal "Kavkazologiya"]. 2019. No. 2. Pp. 72–104. DOI: https://doi.org/10.31143/2542-212X-2019-2-72-104. (In Russian)

9. Tabaksoev I.A. Transformation of the population structure of the Kabardino-Balkarian Republic and its impact on demographic processes. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2015. № 6(65). Pp. 146–153. (In Russian)

10. Akkieva S.I., Thamokova I.H., Tabaksoev I.A., Temmoev I.Yu. The current state and trends in the development of migration processes in Kabardino-Balkaria. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Successes of modern science and education]. 2017. Vol. 7. No. 2. Pp. 34–41. (In Russian)

Информация об авторе

Табаксоев Ибрагим Ахматович, канд. социол. наук, ст. науч. сотр. центра «Интеллектуальный анализ социально-экономических процессов и систем», Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

tabaksoev1982@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3608-4882

Information about the author

Tabaksoev Ibragim Ahmatovich, Candidate of Sociological Sciences, Senior Researcher of the Center "Intellectual Analysis of Socio-Economic Processes and Systems", Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street;

tabaksoev1982@list.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3608-4882

ИСТОРИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 94(470.6) Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-354-365
EDN: YXVUCS

«Бог дружбы да накажет злодея!»: заметки к семантическому напряжению («подданство» vs. «хьэщIагъэ») в пространстве российско-черкесского политического взаимодействия в XVIII в.

Т. А. Алоев

Институт гуманитарных исследований –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18

Аннотация. При каждой смене сопредельного соседа в ходе расширения своих границ на протяжении позднего Средневековья и Нового времени Российское государство вступало в определенные отношения с новыми акторами. С начала XVIII в. на юго-восточных рубежах оно устанавливало связи с политиями, существенно (в большинстве случаев на порядок) уступавшими ему территориально, экономически, демографически, и как следствие в объеме военного потенциала. Принимая во внимание и не терявшую своей актуальности идеологическую компоненту (востребованность на начальном этапе концепции «Москва – третий Рим» и последующая апроприация идеи «цивилизаторской миссии» на евразийских просторах) в проведении российского продвижения, объяснимо упорное стремление Москвы/Петербурга трактовать эти отношения как вступление в подданство, т.е. как безусловное включение в состав государства. Современная историография достаточно скептична в отношении адекватности подобных риторических оценок и признает концептуальные искажения, проистекающие из опоры лишь на интерпретацию имперских структур. В этой связи ведущие специалисты на протяжении продолжительного времени артикулируют необходимость коррекции исследовательской оптики за счет привлечения к научному анализу источников индигенного происхождения. Настоящий текст обращен к решению этой задачи посредством изучения конкретного кейса взаимодействия Российской империи и крупнейшего черкесского княжества – Большой Кабарды – в XVIII в. Расширение круга анализируемых источников, раскрывающих «аборигенную» трактовку сути коллизий с модернизирующейся империей, позволяет приблизиться к более сбалансированному представлению о характере взаимоотношения сторон.

Ключевые слова: куначество, хьэщIагъэ, подданство, покровительство, гостеприимство, союзничество, Кабарда, черкесы, Российская империя, границы, политика

Поступила 25.10.2023, одобрена после рецензирования 13.11.2023, принята к публикации 21.11.2023

Для цитирования. Алоев Т. А. «Бог дружбы да накажет злодея!»: заметки к семантическому напряжению («подданство» vs. «хьэщIагъэ») в пространстве российско-черкесского политического взаимодействия в XVIII в. // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 354–365. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-354-365

Original article

“The god of friendship punish the villain!”: notes on semantic tension (“allegiance” vs. “kheshiagye”) in the space of Russian-Cherkassian political interaction in the 18th century

T.A. Aloev

Institute of Humanitarian Researches –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street

© Алоев Т. А., 2023

Abstract. With each change of adjoining neighbor in the course of expanding its borders throughout the late Middle Ages and Modern times the Russian state entered into certain relationships with new actors. From the beginning of the 18th century it established connections in the southeast with polities significantly inferior to it territorially, economically, demographically and, as a consequence in volume of military potential. Taking into account the ideological component that has not lost its relevance (the demand at the initial stage for the concept of "Moscow is the third Rome" and the subsequent appropriation of the idea of a "civilizing mission" in the Eurasian expanses) in the conduct of Russian promotion, the persistent desire of Moscow/St. Petersburg to interpret these relations as allegiance, i.e. as unconditional inclusion into the state. Modern historiography is quite skeptical about the adequacy of such rhetorical assessments and recognizes the conceptual distortions resulting from relying only on interpretations of imperial structures. In this regard leading experts have been articulating the need to correct research optics for a long time by involving sources of indigenous origin in scientific analysis. This text addresses this problem by studying a specific case of interaction between the Russian Empire and the largest Circassian principality – Great Kabarda in the 18th century. Expanding the range of analyzed sources that reveal the "indigenous" interpretation of the essence of conflicts with the modernizing empire allows us to get closer to a more balanced view on the nature of the relationship between the sides.

Keywords: kunachestvo (consecrated friendship), kheshiagye, allegiance, patronage, hospitality, alliance, Kabarda, Circassians, Russian Empire, borders, politics

Submitted 25.10.2023, approved after reviewing 13.11.2023, accepted for publication 21.11.2023

For citation. Aloev T.A. "The god of friendship punish the villain!": notes on semantic tension ("allegiance" vs. "kheshiagye") in the space of Russian-Cherkassian political interaction in the 18th century. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 354–365. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-354-365

Поход крымцев в Кабарду в 1731 г. оказался неудачным. Очередной провал кампании (предыдущая неудача имела место в 1729 г.) подогревал реваншистские замыслы в Бахчисарае. Обострение крымско-черкесского противостояния обеспокоило пристально следившее за развитием событий российское правительство. Со времен Персидского похода не урегулировавший свои отношения с Исфаганом Петербург опасался негативных для себя последствий нараставшего напряжения. В сложившихся условиях возобновление натиска ханских войск на Большую Кабарду представлялось весьма вероятным, и, принимая во внимание разность военных потенциалов противоборствующих сторон, благоприятный для черкесов исход не выглядел обеспеченным. В случае же неудачного отражения агрессии черкесские правители де факто оказывались в сфере влияния Крыма, что неизбежно ослабляло российские позиции в регионе. Поэтому, не полагаясь на удачу, Петербург предпринял превентивные шаги по недопущению дальнейшей эскалации и довел до Порты возможные последствия устремлений своего вассала. Как отмечал С. М. Соловьев, в контексте этих перипетий «с осени 1731 года у России начинаются [дипломатические] столкновения с Турциею» [1, с. 280]. Так как общая конъюнктура не располагала в это время к решительному разрыву (в основном из-за войны с Персией) со стороны Порты, в Коллегии иностранных дел была признана перспективной попытка урегулировать конфликт посредством предъявления документальных «доказательств» давнего подданства Кабарды Российскому государству. Частью подготовки необходимого алиби со стороны внешнеполитического ведомства стали разыскания по данному предмету в архивах российских крепостей на Кавказе. Вскоре в Петербурге получили «изъяснение о кабардинских народах» из крепости Святого Креста. В нем, в частности, отмечалось следующее: «По указу е. и. в. с привезенными в крепость Святаго Креста ис Терка письмами (которые имеются токмо со 194 году (т.е. 1686 г. – *Т.А.*), а далее того которые были, те тамо в приказной избе погорели) справливанось о приходе Большой и Малой Кабард в российское подданство и найдено, что со 194 нынешняго 732 году, по май месяц, к бывшим терским

воеводам и в крепость Святаго Креста от кабардинских владельцов к генералитету в письмах, которые оригинальные с переводами имеют, они, кабардинцы, упоминали о верном подданстве их к Российской империи, и ныне имеются» [2, с. 63]. Действительно, в источниках фиксируются неоднократные случаи использования слова *подданство* в переписке между конфидентами из России и Большой Кабарды.

Для определения функционального наполнения этого понятия не обойтись без обращения к наработкам современной историографии.

В научной литературе вопросу изучения трактовок *подданства* уделено довольно пристальное внимание. Согласно превалирующему мнению, проникновение этого понятия в русский политический обиход происходило через польский язык (poddany poddacstvo), а источником является латынь (subditus). В литературе такой взгляд не принимается безоговорочно. Но не вдаваясь в этимологические разночтения, в качестве отправного пункта обратимся к важному наблюдению М. Бруна, отмечавшего, что в строго юридическом смысле институт подданства сформировался лишь в Новое время [3, с. 70–73]. Спустя десятилетие определенным аспектам *подданства* (впрочем, остающимся вне интереса настоящей работы) была посвящена работа В. М. Гессена [4]. После длительного перерыва плодотворные изыскания в данном направлении возобновились на излете столетия. Так, на выявлении векторов и динамике семантических изменений понятия *подданный* до начала и в период модернизационного рывка в начале XVIII в. сосредоточился С. М. Каштанов [5, с. 217–229].

Эволюции представлений о политических реалиях и способам их вербального оформления посвящены работы Е. Н. Марасиновой. Автор, в частности, резонно замечает, что «законодательные акты очень часто отождествляются с реальной действительностью, в то время как они являлись чаще всего лишь идеальной программой самодержавия и далеко не всегда выполнялись на практике» [6, с. 3–16]. В течение последующего десятилетия были существенно углублены познания о динамике «политической терминологии и смысловых полях, в которых выстраивались и функционировали отношения власти и личности в России XVIII». Ввиду того, что работа была нацелена на выявление механизмов социального контроля через регламентацию посланий на высочайшее имя, не связанных с пограничьем и периферией в широком смысле, вне авторского внимания оказалась проблематика «подданства» в контексте взаимоотношений Российского государства с порубежными политиями [7]. Этот недостаток во многом был скомпенсирован изысканиями В. В. Трепавлова, опубликовавшего в промежутке между двумя работами упомянутой исследовательницы обстоятельную монографию «Белый царь»: образ монарха и представления о подданстве у народов России XV–XVIII вв.». В четвертой главе книги под названием «Подданство подлинное и мнимое» автор скрупулезно вскрывает формы проявления противоречий «между правительственной и «аборигенной» трактовками зависимости от Центра» в многочисленных регионах Северной Евразии от Поволжья до Тихого Океана [8, с. 197]. Относительно рассматриваемого региона в работе отмечается, что «Северный Кавказ, строго говоря, не должен присутствовать» в тексте, «так как в рассматриваемый период XVI–XVIII вв. большая его часть не входила в состав Российского государства» [8, с. 184]. Коснулся же он, по собственному признанию, этой проблематики «лишь затем, чтобы показать, насколько условными и зыбкими оказывались в те времена представления о подданстве» [8, с. 185].

Представления западных авторов вполне согласуются с подобными оценками. Авторитетные исследователи имперского наследия А. Рибер и Р. Г. Суни, опираясь на изыскания признанного специалиста в вопросах истории сосуществования различных политических агрегаций Северной Евразии М. Ходарковского [9, с. 107–108], писали о модусах взаимодействия империи Романовых с соседними политиями «путем подписания соглашений или принятия присяги на верность, что допускало двойственные толкования» [10, с. 61], в которых князья Кабарды «считали себя равными царю, в то время как русская сторона неизменно трактовала соглашения как подчинение младших правителей русскому суверене-

ну» [11, с. 53]. Взгляды не менее известного автора А. Каппелера конгениальны вышеприведенным выводам. Он обращал пристальное внимание на принципиальные различия в трактовках подданства, сопровождавшие политическое взаимодействие расширявшейся российской державы и региональных государств в Новое время. Если последние рассматривали договоры как соглашения о военном сотрудничестве (временами близком к союзничеству), часто носившем ситуативный характер, то в российской столице склонны были усматривать в них платформу для движения к безусловному подчинению и покорности русскому самодержцу [12, с. 23, 36].

Видимо, автор, испытавший в ходе своих изысканий определенный дефицит источников (что, кажется, вменялось ему в упрек), довольно рано ставил задачу выяснения «реакции нерусских» на далеко идущие стратегии «Московии» в их отношении и насколько региональные акторы «принимали чужеземное владычество и сотрудничали с правительством или же оказывали сопротивление» [13, с. 6]. Она не была решена и спустя десятилетия. Поэтому вышеупомянутый В. В. Трепавлов относительно недавно заново проблематизировал необходимость преодоления «одностороннего» взгляда на характер складывавшихся отношений Российского государства с порубежными политиями через выяснение «точки зрения противоположной стороны» [8, с. 8]. Из такого положения проистекает и побудительный мотив настоящего текста, направленного на попытку коррекции историографической оптики через реконструкцию черкесского взгляда на характер взаимоотношений с Россией в XVIII в.

Исходя из того, что установки наиболее явственно проявляются в ситуациях конфликта, анализ содержательного смысла отношений, сложившихся между Большой Кабардой и Российской империей, уместно начать с документа, датируемого 1772 г. Как известно, в условиях продолжавшейся российско-османской войны Петербург организовал казуистическую передачу прав на Кабарду уже поверженному Крыму (Карасубазарский договор). Для всех заинтересованных акторов было понятно, что подобный шаг направлен на подчинение княжества самой России. В этих условиях черкесские князья обратились к османскому султану. Апеллируя к вышеупомянутому периоду осложнения отношений с Крымом начала века, авторы письма, в частности, объясняли следующее: «А около сорока или пятидесяти [лет назад] из наших господ ханов (черкесские правители назывались *пщы*; здесь же наблюдается ошибка переводчика. – *Т.А.*), пришед в страх к московскому королевству преклонились. И все мы у них *гостями* себя признавали и так до сего времени ни от хана… ниже со стороны московской королевы, никакого притеснения не видали. А ныне от московской королевы письмо получено, в котором явствует, что мы уже их собственными подданными рабами находимся. Мы же до такого времени у них себя *гостями* почитали. Но как видно, что они нас в подданство свое вовсе принять вознамерились. Притом же по некоторой причине из наших один или два бея к нечестивым московитам склонность возымели. Но мы, напротив того будучи не в силах учинить сопротивление, после того призвав бога в помощь, весь магометанский народ в одно место собравшись объявил(и), что мы де под властию москвитян быть не желаем» [14, с. 125]. Принимая во внимание актуальную на тот момент повестку и вытекавшую из нее политическую прагматику при обращении черкесских князей к мусульманскому владыке, вполне можно заподозрить авторов письма в предвзятой интерпретации отношений, сложившихся у них с христианским противником Порты. Для корректного суждения на сей счет целесообразно выяснить, насколько письма, адресованные российским конфидентам, консонировали с содержанием вышеприведенного обращения к султану. Так, на входе в это турбулентное десятилетие – в 1768 г. – на ультимативное письмо кизлярского коменданта один из черкесских князей Кайтуко Эльбаздуко ответил: «Мы не холопи ваши, а *канаки* е. и. в. Всероссийской государыни» [15, Л. 4.]. О том, что данное высказывание нельзя свести к эмоционально окрашенной реплике (хотя его экспрессивность очевидна, и несколько позднее

сама императрица оценила это как: «Прежде наблюдаемая с вашей стороны пристойность в представлениях прошений, и в переписке по разным делам с пограничными нашими начальниками обратилась в грубость, наглость и безместныя угрозы…» [2, с. 300]) и речь шла о принципиальной позиции адресанта, можно судить и по другому примеру.

Получив по Кючук-Кайнарджийскому миру 1774 г. карт-бланш (хотя султан использовал непонимание сущности халифата своими контрагентами и добился в тексте признания своего соответствующего статуса среди мусульман [10, с. 43]) в отношении Кабарды, Россия с 1777 г. приступила к строительству т. н. Азово-Моздокской укрепленной линии, отсекавшей от ведущего черкесского княжества большую часть его территории. Несмотря на понесенный в летней кампании 1774 г. урон [16, с. 146–147] и отсутствие какой-либо значимой внешнеполитической поддержки, правители Кабарды взяли курс на противодействие российским замыслам. С весны 1779 г. противостояние приобрело форму открытых военных действий. Кульминацией военной кампании явилась битва на Къетыкъуэ тIуащIэ (реке Малка) 10 октября (по григорианскому стилю) 1779 г., в ходе которой соединенные силы генералов Якоби и Фабрициана нанесли тяжелое поражение феодальному ополчению Большой Кабарды. Предвкушавшие скорую капитуляцию российские генералы вскоре были озадачены демаршем со стороны вроде бы поверженного противника. Участник кампании Густав фон Штрандман вспоминал, что «после дела на Малке кабардинские князья начали вступать с нами в переговоры… Но требования их с каждым днем все возрастали и в конце ноября они даже написали губернатору дерзкое письмо» [17, с. 27]. Подобную аттестацию послание получило ввиду того, что черкесские князья, несмотря на понесенное поражение, осмеливались заявлять, что «от самых времен Иоанна Васильевича они никогда не были Российскими подданными, а находились так, как кунаки (гости или приятели) в покровительстве, и что и ныне желают покориться на тех же условиях» [18, с. 91]. О том, насколько позиция, изложенная в «дерзком письме», соотносилась с характером взаимоотношений, сложившихся в период до эскалации, можно судить и по другим источникам. Прежде чем продолжать, необходимо сделать оговорку относительно того, что тюркское слово *конак* (а переписку с внешним миром черкесы, как правило, осуществляли на тюрки) переводится как *гость*. Принимая во внимание этот факт, легче оценивать последовательность позиций правителей Кабарды в этот период.

Объемному взгляду на рассматриваемый предмет поспособствует смена ракурса: от марциальной риторики, подхлестываемой крайним обострением взаимоотношений с Империей в период турбуленций, к описанию сюжетов, развивавшихся в менее напряженные времена. Обратимся к заслуживающему пространной цитаты рассказу И. Д. Попко, содержащему важные детали затронутого здесь вопроса. Посвящен он тому, как, спасаясь от преследования, колония староверов направилась с Дона на юг – «на Куму». «При впадении в эту пресловутую реку притока Домузлова, – пишет Попко, – неподалеку от Маджарского городища, в крепком лесном месте казаки-раскольники в числе 1500 душ об[оего] пола построили себе городок со рвом и валом и для обороны его поделали деревянные пушки с железными обручами. Атаманом у них был Сенька Правоторов, а духовными руководителями старцы Феодосий и Пафнутий. Когда нужно было ратовать против преследователей, Пафнутий одевался в кабардинское платье и выезжал в поле на боевом коне. Выселение на Куму совершилось около 1680 года. Раскольники завели связи, «замирились» с казыевскими татарами и с князем Большой Кабарды Муртазали Мисостом, который объявил их своими «тегачами» («тихьэкI» – «наши гости». – *Т.А.*) гостями, пользующимися народным покровительством. Из его аулов они получили на первых порах посредством мены больше тысячи возов хлеба» [19, с. 88–89].

Можно привести и другой пример признания востребованности региональными акторами подобного модуса политического взаимодействия. Так, в сентябре 1752 г., на тот момент самый могущественный князь Большой Кабарды Хатокшоко Бомат направил аст-

раханскому генерал-губернатору И. О. Брылкину письмо в связи с пребыванием на территории княжества попавших в опалу двух крымских султанов. Черкесский князь, в частности, писал: «И такоже приказывали вы нам, чтоб мы беглых солтанов к себе не принимали. А те два салтана, пришед к нам, о себе объявили, что они к всепресветлейшей государыни нашей в *кунаки* пришли, и потому их объявления и согласия майора Татарова от нас им, салтанам, сказано, что от е.и.в. какое об них сказано нам повеление будет, потому и поступать будем. А мы их к себе не держали. И они, солтаны в вершине Кубани…» [20, с. 94].

К этому времени уже довольно давно ориентировавшееся на стандарты европейской конвенциональной дипломатии российское внешнеполитическое ведомство (впрочем, следовавшее им лишь на западном фланге своих границ) не воспринимало иррелевантным операциональные для региона модальности взаимодействия. В выписке из его указа российскому резиденту в Константинополе А. М. Обрезкову («Нота для Порты Оттоманской») по этому вопросу, в частности, отмечалось: «Блистательной Порте по предидущему сообщению уже известно, что по желанию её с российской императорской стороны не умешкано посылкаю в Кабарду для увещания и удержания тамошних владельцов от дальнейшаго сообщения с объявившимися в непослушании кубанскими солтаны бывшим сераскером Сеадет-Гиреем и братом онаго Казы-Гиреем...

… Для того лутчаго успеху в том от губернатора астраханского в Кабарду вместо одного двое штаб-офицеров достойных отправлены, которые поданным им ордером прилежным старанием к тому делу привели, что из кабардинских владельцов первые, называемые баксанцы, помянутых солтанов, которых они по своему предъявлению, хотя и не подзывали, но с ними яко с *гостьми* обходились, однакож по учиненному им крепкому запрещению никак удерживать и споможения им чинить не стали. И от того отказали и таким похвальным послушанием должность свою исполнили. Почему помянутой Сеадет-Гирей солтан со обретавшимися при нем, не мешкав более, принужден из Кабарды выехать и обратно идти на Кубань…» [14, с. 13].

Источники определяют место подобного механизма преодоления сложностей и во взаимоотношениях между акторами внутриполитического процесса. Так, в рапорте кизлярского коменданта бригадира Фрауендорфа от 3 июля 1753 г. сообщается об одной коллизии, возникшей между князьями Мисост и их вассалами – диженуго Шажоко. В частности, в нем отмечается, что последние «…по неудовольствию и нападкам братей Месувосовых (князья Мисост. – *Т.А.*) … отдались по обычаям их в *канаки* в кашкатавскую партею (состоявшую из двух других княжеских родов группировку князей. – *Т.А.*)…, которые де ныне уже удовольствованы» [21, Л. 71].

О том, что подобная опция действительно составляла важный элемент внутриполитического дизайна в Кабарде, свидетельствует и следующая ситуация. Спустя несколько месяцев тот же автор, объясняя причины, препятствующие урегулированию отношений между двумя «партиями» в Кабарде, сообщал, что на первой же встрече стороны предъявляли претензии друг другу из-за князя Науруза из клана Мисост, «отдавшегося в *канаки* кашкатавской партии» [21, Л. 209]. Суть коллизии, по словам кизлярского коменданта, свелась к тому, что лидеры баксанской партии выдвинули предварительное условие для переговоров – выдача беглого князя Науруза. Кашкатауцы в свою очередь отговаривались, что «отослать оного Навруза от себя невозможно как сущего их *канака*» [21, Л. 209].

Со временем российская сторона, признав эффективность индигенных механизмов в структуре регионального политического взаимодействия начала усваивать соответствующие паттерны. Иначе как апроприацией функциональной оснастки местных политических игроков сложно воспринять использование потенциала дееспособного института самими агентами имперского продвижения. Прагматично перенимая легитимные в регионе технологии политической активности, российский пристав в Большой Кабарде А. Е. Ураков брал под покровительство *бейголей*, искавших у него защиты от черкесских князей. Уве-

домляя об этом происшествии вышестоящее начальство, Ураков писал, что пока князья не удовлетворят требований возмутившихся бейголей, последние «…останутся моими *канаками* и перекочуют поблизости к моему лагерю» [22, с. 369].

Следует признать, что приведенные выше тексты за авторством черкесских политиков существенно расширяют рамку анализа исследуемого предмета. Симптоматично, что речь идет не о единичных прецедентах артикулирования индигенных паттернов политического взаимодействия. Вместе с тем требуется оговорка. Хотя выше мы апеллировали к письмам, несомненно, черкесского происхождения, следует иметь в виду, что на пути к своим адресатам они проходили процедуру двойного перевода (сначала с черкесского на тюрки, а затем с него на русский) с определенной вероятностью искажений их содержания. В этом плане представляется правомерным обратить внимание на важный (в своем роде эксклюзивный) документ, хранящийся в фондах Центрального государственного архива Кабардино-Балкарии, – прошение Бермамыт Асланукo, поданное начальнику Кабардинского округа в 1865 г. В нем речь шла о заурядном событии – пропаже лошади, но одно обстоятельство придает документу экстраординарный характер: написан он был на черкесском языке. Не вдаваясь в выяснение подробностей появления столь необычного текста, отметим лишь, что в весьма коротком и объяснимо неуклюжем по форме повествовании получил отражение тот аспект исторической действительности, который напрямую соотносится с затрагиваемой здесь проблематикой.

Обратимся к интересующему нас фрагменту источника.

«*Мыр Бырмамыт Аслъэныкъуэ и тхьэусыхэ тхылъщ.*

Сэ сынолъэIу, зиусхьэн, гущIэгъу къыслхопщIго си тумэнитхумрэ сомиблымрэ сыбгъэгъуэтыжынкIэ. С<ы>у<и>хьэщIэщ, алыхьым щхьэкIэ мы Iохум и щытыкIэр арщ…»

«*Это жалоба Бермамыт Асланукo*

Господин [начальник], обращаюсь с просьбой поспоспешествовать в возврате мне 57 рублей. Я твой гость, ради всевышнего дело обстоит так…» [23].

Обращение автора письма в «присутственное место» – инстанцию, воплощавшую имперсональный характер имперской машинерии, и подразумевавшееся такой инициативой наличие установки на разрешение проблемы в системе обезличенной бюрократической системы позволяют утверждать, что слово *гость* в тексте выступает не в своем прямом значении. Очевидно, что проситель своим обращением доводил до адресата надежду на покровительство с его стороны, и, соответственно, имплементация *гостевания* предполагала установление определенных отношений, заведомо не относившихся к «страноприимству».

Интерпретируя траектории расширенного понимания *хьэщIагъэ* (с уклоном на его политические аспекты), представляется оправданным исследование нарратива, содержащего прямое указание на наличие «куначеского» формата взаимодействия, сопроводить анализом источников, отражающих иные параметры взаимоотношений сторон, фиксировавшихся в российских документах как иерархизированные. Не впадая в искушение преувеличения, а тем более придания этому доказательной силы, коснемся следующего эпизода. Связан он с трактовками смысла военно-политических событий на левобережной Кубани в контексте оперирования здесь войск Большой Кабарды осенью 1787 г. Первую представляет российский бригадир И. Большой Горич, который был номинальным командующим экспедиционного корпуса. По завершении похода им был составлен доклад о его итогах на имя командующего Кавказским корпусом генерала П. А. Текелли. В поступившем на его имя рапорте от бригадира Ивана Большого Горича отмечалось: «Прошлого 1787-го года октября с 16-го числа выступил я ис Кабарды в поход вверенным мне войском кабардинским… Перешед за Кубань, во-первых, **покорили** злодейских народов бабсхерских (басхагских, т.е. абазинских. – *Т.А.*) владельцов с их подвластными народами… взяв от них аманатов 8 человек, отдал кабардинцам и, отобрав от них пленных наших мужеска и женскаго полу людей,

лошадей и рогатаго скота и дал им на алкоране присягу, с тем, дабы российскому двору, также и кабардинцам всегда быть вернопослушными…

…**покорили** злодейских горских башильбайцов 800 дворов, взял от них 6 аманатов отдал кабардинцам пленных наших отобрал, а самих оных привел к присяге…» [2, с. 369].

В письме кабардинских пши и уорков Г. А. Потемкину эти же события описываются следующим образом: «…Приехал к нам бригадир Большой Горич, который в октябре месяце с нашим кабардинским войском… напали на… несогласных абазинцев / коих было шесть орд/ и на несколько орд башылбайцов. Всех их с помощью Божею и силою нашей государыни разогнав победили.

…И по заключенному с ними **договору** захваченные в несогласное время российские пленные и скот сколько всего у них нашлось все возвращено Большому бригадиру Горичу» [24, с. 219].

Повествуя о дальнейшем развитии событий, черкесская знать сообщала о том, что «потом пошли в горы искать разбежавшихся капчатских (кипчакских. – *Т.А.*) татар, собрав их принудили написать **договор** и дать в верности залог сына главного мурзы и возвратить бригадиру Горичу взятых пред сим российских пленных и скот» [*Там же]*. Российский же офицер в свою очередь акцентировал внимание на том, что «…**покорили** (выделено нами. – *Т.А.*) кипчак аульных татарских мурз с их кочевными нагайцами 2000 кибиток, приведя всех мурз к присяге и взяв двух аманатов, отдал кабардинцам же. Сверх онаго принудили их дабы дали они российскому двору письменное обязательство, чтоб были всегда России вернопослушными…» [2, с. 369]. Стоит ли подчеркивать, что в приведенных текстах речь идет не просто о разности расстановки акцентов, но о принципиальных различиях восприятия политической реальности выучениками и агентами имперского (камерального) государства и представителями региональной политии.

Представляется, что соотносительный взгляд на два явственно различающихся «языка описания», обращенных на одно событие, позволяет расширить параметры контекстуализации рассматриваемого предмета. Имея расширенную рамку на историческую ситуацию (доминирующей характеристикой которой предстает базовая идиосинкратичность взаимодействовавших акторов и дискурсов), легче отслеживаются траектории осмысления института в черкесской лингвокультуре, известного как «хьэщIагъэ».

За последние два столетия сложилась устойчивая традиция исследования этого феномена в историко-этнографической литературе. Еще в 20-х гг. XIX в. С. М. Броневский приравнял слово «кунак» в контексте черкесской действительности к русскому «друг» [25, с. 127–128]. Спустя несколько лет посетивший Черкесию с разведывательными целями Г. В. Новицкий хотя и говорит о «свято чтимых» «правах гостеприимства» у «Адехе» (т.е. черкесов), артикулирует, скорее, «дружескую» ипостась хьэщIагъэ, при этом констатируя то обстоятельство, что «связывавшиеся таким образом узами гостеприимства называются в отношении друг другу Гаче (т.е. хьэщIэ. – *Т.А.*)» [26]. Авторы, имевшие возможность более глубокого погружения в черкесский политический контекст, также проводили последовательное различение между гостеприимством *per se* и иными практиками, маркировавшимися посредством той же номинации. Так, многолетний резидент в Черкесии Л. Люлье подчеркивал, что «право покровительства (куначества)… не следует смешивать с гостеприимством…» [22, с. 312]. Индигенный автор – Хан-Гирей Султан из своей «эмик-оптики» идет еще дальше – восьмую главу своего энциклопедического труда «Записки о Черкесии» он озаглавливает как «гостеприимство, покровительство и дружество», тем самым проводя четкую дистинкцию между сущностями, имевшими, разумеется, определенную общую грань значения, но не тождественными друг другу. Примечательно при этом, что слово «гость»/«кунак», как четкий маркер, опускается при пространном описании черкесского гостеприимства (чего не происходит, когда речь заходит о «покровительстве» и «дружестве»). При этом касаясь «дружества», он ограничивается тези-

сом Броневского о том, что оно «есть главное звено их политических соотношений». Видимо, считая такое положение самоочевидным, автор воздерживается от комментариев и дополняет пространную цитату из него лишь сообщением о проклятии, обращенном к нарушителям союзнических уз: «Бог дружбы да накажет злодея!» [27, с. 329–334]. За несколько десятилетий до них П. Г. Бутков затронул вопрос о «страноприимстве» у черкесов. Согласно и его трактовке «куначество» определялось через русское слово «дружба» [28, с. 40]. Впоследствии вопрос о об онтологическом статусе явления/явлений, бытовавшего у черкесов под матричным названием хьэщIагъэ (оно же *куначество*) периодически попадал в орбиту исследовательского интереса историков. В советский период довольно пристальное внимание ему уделили, к примеру, М. О. Косвен [29, с. 126–130], В. К. Гарданов [22, с. 289–327] и Е. Дж. Налоева [30, с. 143–152]. Анализируя кавказоведческие штудии, фокусировавшиеся на «гостеприимстве» и «куначестве» в предыдущий период, В. Х. Кажаров сформулировал, пожалуй, главный на тот момент исследовательский нерв по данному предмету: «Различия во взглядах на этот институт во многом объясняются тем, что между ним и традиционным гостеприимством трудно провести резкую грань» [31, с. 369]. Со времени выдвижения этого тезиса прошло без малого три десятилетия. Принимая во внимание расширение источниковой базы и сложившиеся за этот период новые научные подходы, представляется продуктивным исследовательский интерес с расщепления «куначества» на «этнографические» феномены «гостеприимства» и «покровительства» перенести на разграничение последнего с «дружеством-союзничеством» как сущностей политической природы и выявление их соотношения в каждый конкретный период динамичного взаимодействия региональных акторов. Представляется, что содержание привлеченных (и ждущих своего более пристального анализа) исторических источников, так или иначе отражающих взгляды индигенных игроков, не противоречит подобной презумпции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соловьев С. М.* История России с древнейших времен. Кн. X. Т. 19. Москва, 1963. 780 с.

2. Кабардино-русские отношения в XVI – XVIII вв. Документы и материалы в 2-х томах. Т. II. М., 1957. 423 с.

3. *Брун М.* Подданство // Энциклопедический словарь. Изд. Ф. А. Брокгауз, И. А. Эфрон. Т. XXIV. СПб., 1898. С. 70–73.

4. *Гессен В. М.* Подданство, его установление и прекращение. Т. I. СПб., 1909.

5. *Каштанов С. М.* Государь и подданные на Руси в XIV – XVI вв. // In memoriam: Сб. памяти Я. С. Лурье. СПб., 1997. С. 217–229.

6. *Марасинова Е. Н.* «Могу быть подданным, даже рабом, – но холопом не буду и у царя небесного»: власть и личность в России XVIII века // Новое литературное обозрение. 2016. № 5.

7. *Марасинова Е. Н.* К истории политического языка в России XVIII века // Отечественная история. Москва, 2005. С. 3–16.

8. *Трепавлов В. В.* «Белый царь»: образ монарха и представления о подданстве у народов России XV–XVIII вв. Москва, 2007. 254 с.

9. *Ходарковский М.* В чем Россия «опережала» Европу, или Россия как колониальная империя // Там, внутри. Практики внутренней колонизации в культурной истории России / Под ред. А. Эткинда, Д. Уффельманна, И. Кукулина. Москва, 2012. 951 с.

10. *Рибер А.* Сравнивая континентальные империи // Российская империя в сравнительной перспективе. Сборник статей / Под ред. А. И. Миллера Москва: Новое издательство, 2004. 384 с.

11. *Суни Р. Г.* Империя как она есть: имперский период в истории России, «национальная» идентичность и теории империи // Национализм в мировой истории / Под ред. В. А Тишкова, В. А. Шнирельмана; Ин-т этнологии и антропологии им Н. Н. Миклухо-Маклая РАН. Москва: Наука, 2007. 601 с.

12. *Каппелер А.* Россия – многонациональная империя. Возникновение. История. Распад. Москва, 2000. 334 с.

13. *Kappeler A.* Russlands erste Nationalitaten. Das Zarenreich und die Volker der Mittleren Wolga vom 16. Bis 19. Jahrhudert. Koln; Wien. 1982. P. 6.

14. Российско-северокавказские отношения в XVIII веке 2013 – Российско-северокавказские отношения в XVIII веке: Сб. док-тов / Составитель, автор предисловия, комментариев и именного указателя И. И. Якубова. Т. II. Нальчик, 2013. 224 с.

15. Архив внешней политики Российской империи. Ф. 115. Кабард. дела. Оп. 115/1. Д. 11. Л. 4.

16. *Грабовский Н. Ф.* Присоединение к России Кабарды и борьба ея за независимость (исторический очерк) // Сборник сведений о кавказских горцах. Вып. IX. Тифлис, 1876. 212 с.

17. *Густав Фон Штрандман,* Записки Густава Фон Штрандмана // Кавказская война: истоки и начало. 1770 – 1820 годы. СПб., 2002. 549 с.

18. Акты, собранные Кавказскою Археографическою комиссией. Т. I. Тифлис, 1866. 816 с.

19. *Попко И. Д.* Терские казаки со стародавних времен. Вып. I. Гребенское войско. Нальчик, 2001. 525 с.

20. Российско-северокавказские отношения в XVIII веке 2011 – Российско-северокавказские отношения в XVIII веке: Сб. док-тов / Составитель, автор предисловия, комментариев и именного указателя И. И. Якубова. Т. I. Нальчик, 2011. 195 с.

21. Архив внешней политики Российской империи. Ф. 115/1. Кабард. дела. 1753. Оп. 115/1. Д. 7. Л. 209.

22. *Гарданов В. К.* Общественный строй адыгских народов (XVIII – первая половина XIX в.). Москва, 1967. 326 с.

23. URL: http: // userdocs. ru / istoriya/108736/ index. html? page=4.

24. *Кармов Р. К.* Абаза на Северном Кавказе (исследования и источники). Нальчик, 2020. 404 с.

25. *Броневский С. М.* Новейшие географические и исторические известия о Кавказе. Москва, 1823. 465 с.

26. *Новицкий Г. В.* Географическо-статистическое обозрение земли, населенной народом адехе // Тифлисские ведомости. 1829. № 25.

27. *Хан-Гирей*. Записки о Черкесии. Нальчик, 2008. 363 с.

28. *Бутков П. Г.* Неопубликованная рукопись П. Г. Буткова по истории Кабарды / Сост. Кармов Р. К. Нальчик, 2020. 209 с.

29. *Косвен М. О.* Этнография и история Кавказа. Исследования и материалы. Москва, 1967. 263 с.

30. *Налоева Е. Дж.* К вопросу о термине «кунак» // УЗКБГУ. Нальчик, 1971. Вып. 43. С. 143–152.

31. *Кажаров В. Х.* Традиционные общественные институты кабардинцев и их кризис в конце XVIII – первой половине XIX века. Нальчик, 1994. 437 с.

REFERENCES

1. Solovyov S.M. *Istoriya Rossii s drevneyshikh vremen* [History of Russia since ancient times]. Book X. T. 19. Moscow, 1963. 780 p. (In Russian)

2. *Kabardino-russkiye otnosheniya v XVI – XVIII vv.* [Kabardino-Russian relations in the 16th – 18th centuries]. Documents and materials in 2 volumes. V. II. Moskow, 1957. 423 p. (In Russian)

3. Brun M. Allegiance // *Entsiklopedicheskiy slovar'* [Encyclopedic Dictionary]. Ed. F.A. Brockhaus, I.A. Efron. V. XXIV. St. Petersburg, 1898. Pp. 70–73. (In Russian)

4. Gessen V.M. *Poddanstvo, yego ustanovleniye i prekrashcheniye* [Allegiance, its establishment and termination]. V. I. St. Petersburg, 1909. (In Russian)

5. Kashtanov S.M. Sovereign and subjects in Rus' in the XIV – XVI centuries // In memoriam: in memory of Ya. S. Lurie. St. Petersburg, 1997. Pp. 217 – 229. (In Russian)

6. Marasinova E.N. "I can be a subject, even a slave, but I will not be a surf even to the king of heaven": power and personality in Russia of the 18th century. *Novoye literaturnoye obozreniye* [New Literary Review]. 2016. No. 5. (In Russian)

7. Marasinova E.N. On the history of political language in Russia in the 18th century // *Otechestvennaya istoriya* [Domestic history]. Moskow, 2005. Pp. 3–16. (In Russian)

8. Trepavlov V.V. *"Belyy tsar'": obraz monarkha i predstavleniya o poddanstve u narodov Rossii XV–XVIII vv.* ["The White Tsar": the image of the monarch and ideas about citizenship among the peoples of Russia in the 15th–18th centuries]. Moskow, 2007. P. 197. 254 p. (In Russian)

9. Khodarkovsky M. *V chem Rossiya "operezhala" Yevropu, ili Rossiya kak kolonial'naya imperiya* [In what ways was Russia "ahead" of Europe, or Russia as a colonial empire]. *Tam, vnutri. Praktiki vnutrenney kolonizatsii v kul'turnoy istorii Rossii* [There, inside. Practices of internal colonization in the cultural history of Russia]. Ed. Alexander Etkind, Dirk Uffelmann, Ilya Kukulin. M., 2012. 951 p. (In Russian)

10. Riber A. *Sravnivaya kontinental'nyye imperii* [Comparing continental empires]. Russian Empire in comparative perspective. Collection of articles. Ed. A.I. Miller Moscow: Novoye izdatel'stvo, 2004. 384 p. (In Russian)

11. Suni R.G. *Imperiya kak ona yest': imperskiy period v istorii Rossii, «natsional'naya» identichnost' i teorii imperii* [Empire as it is: the imperial period in the history of Russia, "national" identity and theories of empire]. Nationalism in world history / Ed. V.A. Tishkova, V.A. Shnirelman; Institute of Ethnology and Anthropology named after N.N. Miklouho-Maclay RAS. Moscow: Nauka, 2007. 601 p. (In Russian)

12. Kappeler A. *Rossiya – mnogonatsional'naya imperiya. Vozniknoveniye. Istoriya. Raspad* [Russia is a multinational empire. Emergence. Story. Demise. Moskow, 2000. 334 p. (In Russian)

13. Kappeler A. Russlands erste Nationalitaten. Das Zarenreich und die Volker der Mittleren Wolga vom 16. bis 19. Jahrhudert. Koln; Wien. 1982. P. 6.

14. *Rossiysko-severokavkazskiye otnosheniya v XVIII veke 2013 – Rossiysko-severokavkazskiye otnosheniya v XVIII veke* [Russian-North Caucasian relations in the 18th century 2013 – Russian-North Caucasian relations in the 18th century]: Sb. dok-tov / sostavitel', avtor predisloviya, kommentariyev i imennogo ukazatelya I. I. Yakubova. V. II. Nalchik, 2013. 224 p. (In Russian)

15. Arkhiv vneshney politiki Rossiyskoy imperii [Archive of foreign policy of the Russian Empire. F. 115/1. Kabard. affairs. 1753. Op. 115/1. D. 7. L. 209. (In Russian)

16. Grabovsky N.F. *Prisoyedineniye k Rossii Kabardy i bor'ba yeya za nezavisimost' (istoricheskiy ocherk)* [The accession of Kabarda to Russia and its struggle for independence (historical sketch)]. Sbornik svedeniy o kavkazskikh gortsakh. Vol. IX. Tiflis, 1876. 212 p. (In Russian)

17. Gustav von Strandmann, *Zapiski Gustava Fon Shtrandmana* [Notes of Gustav von Strandmann]. *Kavkazskaya voyna: istoki i nachalo. 1770–1820 gody* [Caucasian War: origins and beginning. 1770–1820]. St. Petersburg, 2002. 549 p. (In Russian)

18. *Akty, sobrannyye Kavkazskoyu Arkheograficheskoyu komissiyey* [Acts collected by the Caucasian Archaeographic Commission]. V. I. Tiflis, 1866. 816 p. (In Russian)

19. Popko I.D. *Terskiye kazaki so starodavnikh vremen* [Terek Cossacks from ancient times]. Vol. I. Grebensky army. Nalchik, 2001. 525 p. (In Russian)

20. *Rossiysko-severokavkazskiye otnosheniya v XVIII veke 2011 – Rossiysko-severokavkazskiye otnosheniya v XVIII veke* [Russian-North Caucasian relations in the 18th century 2011 – Russian-North Caucasian relations in the 18th century]: Sb. dok-tov / sostavitel', avtor predisloviya, kommentariyev i imennogo ukazatelya I. I. Yakubova. V. I. Nalchik, 2011. 195 p. (In Russian)

21. *Arkhiv vneshney politiki Rossiyskoy imperii* [Archive of foreign policy of the Russian Empire]. F. 115. Kabard. affairs. Op. 115/1. D. 11. L. 4. (In Russian)

22. Gardanov V.K. *Obshchestvennyy stroy adygskikh narodov (XVIII – pervaya polovina XIX v.)* [Social structure of the Adyghe peoples (XVIII – first half of the XIX century)]. Moscow, 1967. 326 p. (In Russian)

23. URL: http://userdocs. ru/istoriya/108736/index. html? page=4.

24. Karmov R.K. *Abaza na Severnom Kavkaze (issledovaniya i istochniki)* [Abaza in the North Caucasus (research and sources)]. Nalchik, 2020. 404 p. (In Russian)

25. Bronevsky S.M. *Noveyshiye geograficheskiye i istoricheskiye izvestiya o Kavkaze* [The latest geographical and historical news about the Caucasus]. Moscow, 1823. 465 p. (In Russian)

26. Novitsky G.V. Geographical and statistical review of the land inhabited by the Adhe people. *Tiflisskiye vedomosti* [Tiflis Gazette]. 1829. No. 25. (In Russian)

27. Khan-Girey. *Zapiski o Cherkesii* [Notes about Circassia]. Nalchik, 2008. 363 p. (In Russian)

28. Butkov P.G. *Neopublikovannaya rukopis' P.G. Butkova po istorii Kabardy* [Unpublished manuscript by P.G. Butkov on the history of Kabarda]. Comp. Karmov R.K. Nalchik, 2020. 209 p. (In Russian)

29. Kosven M.O. Ethnography and history of the Caucasus. Research and materials. Moskow, 1967. 263 p.

30. Naloeva E. G. On the issue of the term “kunak”. UZKBGU. Nalchik, 1971. Issue. 43. Pp. 143–152. (In Russian)

31. Kazharov V.Kh. *Traditsionnyye obshchestvennyye instituty kabardintsev i ikh krizis v kontse XVIII – pervoy polovine XIX veka* [Traditional social institutions of Kabardians and their crisis at the end of the 18th – first half of the 19th century]. Nalchik, 1994. 437 p. (In Russian)

Информация об авторе

Алоев Тимур Хазраилович, канд. ист. наук, ст. науч. сотр. сектора средневековой и новой истории, Институт гуманитарных исследований – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

aloevtim@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4853-2589

Information about the author

Aloev Timur Khazrailovich, Candidate of Historical Sciences, Senior Researcher of the Sector of Medieval and Modern History of the Institute of Humanitarian Researches – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street;

aloevtim@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4853-2589

ИСТОРИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 94(47) Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-366-374
EDN: ZWKCUG

К вопросу о деятельности горских словесных судов Терской и Кубанской областей в 1870–1917 гг. в современной историографии

М. А. Хагажеев

Научно-образовательный центр
Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Статья посвящена исследованию особенностей отражения деятельности горских словесных судов Терской и Кубанской областей (1870–1917 гг.) в современной историографии. Проанализированы труды А. Х. Абазова, М. С. Арсанукаевой, И. Л. Бабич, А. В. Гладунец, С. В. Дарчиевой, Ж. А. Калмыкова, Е. И. Кобахидзе, С. Г. Кудаевой, В. Н. Мальцева, Д. Н. Прасолова, Д. Х. Сайдумова, А. В. Сердюк, А. Т. Урушадзе, А. И. Хасбулатова и обобщающие работы по истории и этнографии народов Северо-Западного и Центрального Кавказа. Установлено, что современные исследователи проблемы затрагивали вопросы судебного устройства в областях, структуры, обеспеченности кадрами, подсудности и территориальной подведомственности отдельных горских словесных судов, документальное обеспечение и финансирование их деятельности, а также особенности принятия решений по разным категориям дел, эффективность их деятельности, оценки современников и т.п. Намечены дальнейшие исследовательские перспективы данной темы.

Ключевые слова: Кубанская область, Терская область, судебная система, горский словесный суд, историография

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023, принята к публикации 02.12.2023

Для цитирования. Хагажеев М. А. К вопросу о деятельности горских словесных судов Терской и Кубанской областей в 1870–1917 гг. в современной историографии // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 366–374. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-366-374

Original article

On the issue of the activities of the highland verbal courts of the Terek and Kuban regions in 1870-1917 in modern historiography

M.A. Khagazheev

Scientific and Educational Center
Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article is devoted to the study of the peculiarities of reflecting the activities of the highland verbal courts of the Terek and Kuban regions (1870–1917) in modern historiography. The works of A.Kh. Abazov, M.S. Arsanukaeva, I.L. Babich, A.V. Gladunets, S.V. Darchieva, Zh.A. Kalmykov, E.I. Kobakhidze, S.G. Kudaeva, V.N. Maltsev, D.N. Prasolov, D.Kh. Saydumov, A.V. Serdyuk, A.T. Urushadze, A.I. Khasbulatov and generalizing works on the history and ethnography of the nations of the North-West and Central Caucasus. It was established that modern researchers of the problems touched upon the issues of judicial structure in the regions, structure, staffing, jurisdiction and territorial jurisdiction of individual highland verbal courts, documentary support and financing of their activities, as

© Хагажеев М. А., 2023

well as features of decision-making in various categories of cases, the effectiveness of their activities, assessments of contemporaries, etc. Further research prospects for this topic are outlined.

Keywords: Kuban region, Terek region, judicial system, highland verbal court, historiography

Submitted 27.11.2023, approved after reviewing 29.11.2023, accepted for publication 02.12.2023

For citation. Khagazheev M.A. On the issue of the activities of the highland verbal courts of the Terek and Kuban regions in 1870-1917 in modern historiography. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 366–374. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-366-374

Введение

Деятельность горских словесных судов в Терской и Кубанской областях в 1871–1917 гг. привлекает внимание исследователей в современной историографии. Авторы затрагивают проблемы и обстоятельства их учреждения, особенности нормативно-правового регулирования и деятельности в округах, штатной структуры и кадрового состава, эффективности принятия решений, форм и практик регулирования отношений с опорой на институты традиционной соционормативной культуры народов региона. В последнее время на примере отдельных словесных судов ставятся и решаются вопросы документального сопровождения их деятельности, поиска и принятия решений по их финансированию и т.п. При этом в настоящее время представляется актуальным проведение комплексного исследования по истории горских словесных судов в Кубанской и Терской областях для более глубокого исследования особенностей правовой политики и судебных преобразований России на ее южной окраине, специфики инкорпорации коренного населения в правовое пространство империи, его включения в деятельность российских учреждений власти и т.п. Для этого важно выявить и охарактеризовать особенности исследовательских практик по изучению деятельности горских словесных судов Кубанской и Терской областей в современной кавказологии, определить, как и за счет чего прирастало научное знание по указанной теме, наметить дальнейшие исследовательские перспективы и т.п.

Результаты

В 1871 г. в Кубанской (Баталпашинский, Екатеринодарский и Майкопский) и Терской (Веденский, Грозненский, Назрановский, Нальчикский, Хасав-Юртовский и Шатоевский) областях были учреждены горские словесный суды – специализированные судебные учреждения, функционировавшие с опорой на традиционные институты правосудия коренного населения и нормы мусульманского права. Изучение их истории в современной исследовательской практике вызывает непреходящий интерес у кавказоведов. Наиболее обстоятельные исследования истории их деятельности в отдельных субрегионах Центрального и Северо-Западного Кавказа принадлежат Е. И. Кобахидзе [21; 22; 23; 24; 25] и А. Х. Абазову [4; 5]. Е. И. Кобахидзе рассмотрела историю горских словесных судов в регионе в контексте административно-судебных преобразований в 60-х гг. XIX – начале XX в. и интеграции Осетии в судебно-административную систему Российской империи, проблем реорганизации судопроизводства для горцев Центрального Кавказа, специфики и итогов реформирования судебной системы и т.п. А. Х. Абазов определил место Нальчикского суда в судебной системе Терской области наряду с Владикавказским окружным судом, мировыми судами и съездами мировых судей (на период их функционирования), а также привел сведения об учреждении и особенностях деятельности словесных судов в Терской и Кубанской областях [1; 3; 5, с. 180–192], исследовал материалы Нальчикского суда как источник изучения обычного права кабардинцев [5, с. 138–146], проанализировал особенности отражения в них сведений о социальных конфликтах кабардинского и балкарского населения региона [6, с. 37–43]. Кроме того, основные аспекты деятельности горских словесных судов затрагивались в работах других

авторов [17; 18; 26, с. 265–266; 34]. Некоторые вопросы получили отражение в коллективных трудах по дореволюционной истории и этнографии народов Северо-Кавказского региона [8; 16; 19; 20; 30].

Диапазон рассматриваемых проблем широк: от вопросов создания словесных судов до выявления информативной отдачи их документов для исследования особенностей применения норм обычного права и шариата в решении споров и конфликтов. Основным вопросом, который затрагивался в научных трудах современных исследователей, были попытки реконструкции судебной системы Кубанской и Терской областей и определения места горских словесных судов в них. В большей мере такие исследования предпринимались в отношении судов Терской области (Ж. А. Калмыков, Е. И. Кобахидзе, Д. С. Сайдумов, А. И. Хасбулатов, А. Х. Абазов и др.). Обращалось внимание на отсутствие словесного суда во Владикавказском округе Терской области [5, с. 181]. В некоторых случаях авторы также предпринимали попытки на основе анализа делопроизводственной практики определить локальные особенности функционирования некоторых из них (например, Екатеринодарский словесный суд Кубанской области [7]).

Большинство авторов при характеристике деятельности горских словесных судов затрагивали вопросы их структуры, штатного расписания и предметов ведения [3, с. 37–40; 36, с. 73]. Сведения о подсудности и объеме полномочий приводились в основном с опорой на соответствующие статьи основного регламентирующего его деятельность (в определенном смысле, учредительного) документа – «Временных правил для горских словесных судов Кубанской и Терской областей» [27]. Многие исследователи обращали внимание на порядок комплектования их кадрами и отмечали, что судьи и кандидаты к ним утверждались в должностях начальником Терской области на основании результатов народных выборов [5, с. 182]. На отдельных примерах рассмотрены территориальные особенности проведения выборов в судьи (например, в Нальчикский горский словесный суд и его временное отделение на заседании Съездов доверенных сельских обществ Большой и Малой Кабарды и Пяти горских обществ [28; 29]). Данные об этом восстанавливались как с опорой на нормативные (см., например, утвержденную в 1908 г. наместником Кавказа инструкцию «О порядке избрания депутатов, кадия и кандидатов для заседания в горских словесных судах Кубанской и Терской областей»), так и делопроизводственные документы. При исследовании штатной структуры словесных судов предпринимались и попытки определения их персональных составов или указаний на персоналии отдельных служащих (чаще – председателей). Однако такие данные не сопровождены просопографическим анализом. Установлено, что число судей и кандидатов в округах Терской области варьировалось от 3 (Назрановский и Веденский) до 4 (Нальчикский, Грозненский, Хасав-Юртовский, Аргунский) [5, с. 190].

Определенное внимание в современной историографии уделено документальному обеспечению деятельности горских словесных судов. В этом отношении наиболее подробно проработаны материалы горского суда в Нальчикской слободе, определена информативная отдача его делопроизводственной документации для исследования различных аспектов социально-политической, экономической и этнической истории народов региона [3, с. 8–15]. Предприняты попытки дифференциации документов на группы в зависимости от их функционала и характера внешней коммуникации [2].

В некоторых исследованиях приведены сведения о финансовом сопровождении деятельности некоторых словесных судов (источниках и механизмах сбора финансовых средств [28], размерах должностных окладов председателей и отдельных категорий работников судов и т.п.). Затрагивались вопросы координации деятельности горских словесных с сельскими (аульными) [31] и медиаторскими (посредническими) [3, с. 13, 63–70] судами. Рассматривались формы фиксации результатов заседаний посреднических судов в

письменном виде или их отражения в подаваемых в горские суды апелляционных жалоб на их решения [3, с. 13, 63–70] и т.п.

Большое внимание в исследовательской практике уделяется отправлению основной функции словесных судов – деятельности по решению споров и конфликтов в отношении коренных жителей подведомственных территорий. В современной историографии так или иначе затрагивались вопросы организации судебного процесса в них [3, с. 40–48], изучались формы применения доказательств в судебном процессе (в том числе и очистительных присяг [36, с. 73]) и вовлечения в процессуальную деятельность отдельных категорий участников разбирательств (например, присяжных поверенных [14]), описывались механизмы принятия решений по отдельным категориям споров и конфликтов (например, связанных с наследованием имущества [11; 12]), рассматривались вопросы о пределах применения норм обычного права [33] местных жителей и шариата при вынесении решений [5, с. 186; 36, с. 72], влияния их деятельности на правовую и политическую культуру отдельных народов региона (адыгов [9; 15], осетин [23], чеченцев [10; 11; 12; 13; 32], ингушей [10] и др. народов региона), предпринимались попытки характеристики региональных особенностей их функционирования (например, временного (второго, балкарского) отделения горского словесного суда в Нальчикском округе [3, с. 48–51]; двух словесных судов в Грозненском округе [5, с. 191]), рассматривались вопросы о порядке исполнения решений словесных судов по спорам и конфликтам [5, с. 189].

Некоторые современные исследователи определяли специфику деятельности словесных судов и их территориальной организации с учетом административно-территориальных преобразований в областях. В частности, некоторые из них обращали внимание на стабильное функционирование Нальчикского суда в 70–80-е гг. и отнесение к его подведомственности представителей кабардинского и балкарского населения вне зависимости от того, в состав каких именно территориальных образований они были включены в это время (сначала Кабардинского, после Георгиевского, Пятигорского, Нальчикского округов) [5, с. 167]. При этом видно, что территориальная организация деятельности горских словесных судов не всегда находилась в строгой зависимости от административно-территориального устройства округа, в котором располагалась. К подсудности этих учреждений могли относиться народы (или группы народов), проживавшие за пределами округа (например, к подсудности горского словесного суда в Нальчике относилось население Малой Кабарды в период ее вхождения в состав Сунженского отдела Терской области). При этом в качестве постановки проблемы в историографии предпринимались попытки соотношения деятельности словесных судов с вопросами административно-территориального реформирования региона (в том числе и на материалах деятельности специализированных комиссий [35]).

Предпринимались попытки оценки эффективности деятельности словесных судов. В частности, в исследовании А. Т. Урущадзе говорится о таковых оценках со стороны государственных служащих и общественных деятелей в начале XX в., приводятся разные точки зрения и делается вывод о низкой эффективности их работы в указанное время [35, с. 923] и о необходимости преобразований. При этом уточняется, что при всем при этом их «упразднила не реформа, а революция 1917 г.» [35, с. 923]. Обзор произведений дореволюционных авторов, в которых предпринимались попытки оценки эффективности деятельности словесных судов, даются и в трудах других современных исследователей [24].

Заключение

Таким образом, в современной кавказологии исследование истории деятельности горских словесных судов в Кубанской и Терской областях привлекает внимание ученых, затрагивающих проблемы административно-территориальных преобразований, правовых реформ в регионе в последней трети XIX – начале XX в., трансформации институтов этнической культуры под влиянием этих преобразований и т.п. Исследователи обращали вни-

мание на судебное устройство в областях, структуру, обеспеченность кадрами, подсудность и территориальную подведомственность отдельных горских словесных судов, документальное обеспечение и финансирование их деятельности, особенности принятия решений по разным категориям дел, эффективность их деятельности, оценки современников и т.п. При этом основное внимание уделяется в большей мере выявлению локальных особенностей этих процессов и явлений. Тогда как доступная источниковая база позволяет ставить и решать вопросы обобщающего характера по истории горских словесных судов в этих регионах, их роли в условиях интеграции проживающих в них народов в политико-правовое пространство России, сравнительно-исторического исследования с аналогичными структурами в других регионах Большого Кавказа и т.п. Все это открывает дополнительные возможности исследования истории деятельности горских словесных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абазов А. Х.* Горские словесные суды Терской и Кубанской областей в 1871–1918 гг. // История государства и права. 2015. № 23. С. 58–63.

2. *Абазов А. Х.* Документирование деятельности Нальчикского горского словесного суда: делопроизводство и обеспечение внешней коммуникации // Электронный журнал «Кавказология». 2022. № 4. С. 239–255.

3. *Абазов А. Х.* Нальчикский горский словесный суд в судебной системе Терской области в последней трети XIX – начале XX в. // Вопросы истории. 2014. № 12. С. 141–148.

4. *Абазов А. Х.* Нальчикский округ в судебной системе Терской области (последняя треть XIX – начало XX в.). Нальчик: Издательский отдел КБИГИ, 2014. 108 с.

5. *Абазов А. Х.* Народы Центрального Кавказа в судебной системе Российской империи в конце XVIII – начале XX в. Нальчик: Печатный двор, 2016. 264 с.

6. *Абазов А. Х.* Формы социальных конфликтов у кабардинцев в последней трети XIX – начале XX вв. (на материалах Нальчикского горского словесного суда) // История науки и техники. 2017. № 12. С. 37–43.

7. *Абазов А. Х., Достова А. И.* Из истории правоприменительной деятельности горских словесных судов на Северном Кавказе: обзор судебной практики Екатеринодарского суда (1871–1920 гг.) // Вестник Кабардино-Балкарского института гуманитарных исследований. 2022. № 4–1(55). С. 7–14.

8. Адыги: Адыгейцы. Кабардинцы. Черкесы. Шапсуги / от ред. А. Х. Абазов, А. В. Кушхабиев [и др.]. Москва: Наука, 2022. 870 с.

9. *Анчабадзе Ю. Д.* Политическая культура адыгов: традиционные институты и их эволюция (вторая половина XIX в. – 1920-е годы). Москва: Институт этнологии и антропологии им. Н.Н. Миклухо-Маклая РАН, 2012. 340 с.

10. *Арсанукаева М. С.* Государственно-правовая политика Российской империи в Чечне и Ингушетии (XIX – начало XX вв.): автореф. дис. … д-ра юрид. наук. Москва, 2010. 51 с.

11. *Арсанукаева М. С.* Наследование по шариату и адатам у чеченцев и ингушей (XIX – начало XX в.) // Евразийский юридический журнал. 2009. № 6(13). С. 23–29.

12. *Арсанукаева М. С.* Правовая культура чеченцев и ингушей: (XIX – начало XX века): монография. Москва: РПА Минюста России, 2009. 198 с.

13. *Арсанукаева М. С.* Судебный процесс по адатам чеченцев и ингушей (XIX в. – начало XX в.) // Ученые труды Российской академии адвокатуры. 2008. № 6(11). С. 62–68.

14. *Арсанукаева М. С., Биттирова Т. Ш.* Присяжные поверенные из горцев и их роль в развитии правовой культуры народов Северного Кавказа (вторая половина XIX – начало XX века) // Правовая культура. 2015. № 3(22). С. 30–38.

15. *Бабич И. Л.* Эволюция правовой культуры адыгов. Москва: Российская государственная библиотека, 1999. 239 с.

16. Века совместной истории: народы Кабардино-Балкарии в российском цивилизационном процессе (1557–1917 гг.). Нальчик: Издательский отдел ИГИ КБНЦ РАН, 2017. 544 с.

17. *Гладунец А. В.* Судебный процесс на Северном Кавказе во второй половине XIX – начале XX века // Право и политика. 2009. № 9. С. 1956–1959.

18. *Дарчиева С. В.* Проблемы политико-административного управления на Северном Кавказе в начале XX в. (на примере Терской области) // Известия СОИГСИ. 2016. № 22(61). С. 47–55.

19. История Северного Кавказа: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2017. 282 с.

20. История Чечни с древнейших времен до наших дней: В 2-х томах. Том 1. Грозный: Книжное издательство, 2006. 828 с.

21. *Кобахидзе Е. И.* «Не одним оружием...» (Опыт судебно-административных преобразований в Осетии в 30-х – начале 60-х гг. XIX в.) // Кавказский сборник / отв. ред. В. В. Дегоев. Москва: Русская панорама, 2010. С. 157–175.

22. *Кобахидзе Е. И.* Горский словесный суд и проблема реорганизации судопроизводства для горцев Центрального Кавказа // Социокультурные и политические проблемы высокогорных районов Кавказа: прошлое, настоящее, будущее: материалы Всероссийской научной конференции, 28–30 октября 2010 года. Карачаевск: Карачаево-Черкесский государственный университет им. У. Д. Алиева, 2010. С. 212–219.

23. *Кобахидзе Е. И.* Интеграция Осетии в судебно-административную систему Российской империи // Российская история. 2012. № 4. С. 3–15.

24. *Кобахидзе Е. И.* Очерк К. Л. Хетагурова «Горский словесный суд» и проблема реорганизации судопроизводства для горцев Северного Кавказа в 70-х гг. XIX – начале XX вв. // Известия СОИГСИ. 2010. № 4(43). С. 37–47.

25. *Кобахидзе Е. И.* Специфика и итоги реформирования судебной системы на Центральном Кавказе в 60–70-х гг. XIX в. // Вестник Северо-Осетинского государственного университета имени К. Л. Хетагурова. 2010. № 2. С. 70–76.

26. *Кудаева С. Г.* Адыги (черкесы) Северо-Западного Кавказа в XIX веке: проблемы трансформации и дифференциации адыгского общества. Майкоп, 2006. С. 265–266.

27. *Мальцев В. Н.* Политико-юридический аспект реформирования горских судов в Кубанской и Терской областях в конце 60-х – начале 70-х гг. XIX в. // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 1: Регионоведение: философия, история, социология, юриспруденция, политология, культурология. 2008. № 8. С. 96–108.

28. *Прасолов Д. Н.* Съезды доверенных в политической культуре кабардинцев и балкарцев. Нальчик: ОПР, 2022. 240 с.

29. *Прасолов Д. Н.* Съезды доверенных в практиках местного самоуправления кабардинцев и балкарцев во второй половине XIX – начале XX в. Нальчик: Издательский отдел ИГИ КБНЦ РАН, 2019. 208 с.

30. Россия и народы Северного Кавказа в XVI – середине XIX века: социокультурная дистанция и движение к государственно-политическому единству. Нальчик: Издательский отдел ИГИ КБНЦ РАН, 2018. 268 с.

31. *Сайдумов Д. Х.* Сельские аульные и Горские словесные суды Терской области: порядок производства и решения дел в сельских судах // Европейский журнал социальных наук. 2010. № 3. С. 132–137.

32. *Сайдумов Д. Х.* Суд, право и правосудие у чеченцев и ингушей (XVIII–XX вв.). Грозный: ИП Бисултанова П. Ш., 2014. 526 с.

33. *Сайдумов Д. Х., Сайдумов М. Х.* Суд и судопроизводство по обычному праву чеченцев // Вестник Самарского государственного университета. 2008. № 5–2(64). С. 263–272.

34. *Сердюк А. В.* Особенности судопроизводства Северного Кавказа в составе Российской империи в середине XIX – начале XX вв. // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2012. № 4(23). С. 150–153.

35. *Урушадзе А. Т.* «Мнимая юстиция»: горские словесные суды и проблема судебно-административного реформирования Кавказского края в материалах ревизии Н. М. Рейнке // Новейшая история России. 2019. Т. 9. № 4. С. 914–927.

36. *Хасбулатов А. И.* Суд и судебные реформы в Чечне (вторая половина XIX – начало XX вв.) // Научная мысль Кавказа. 2007. № 1(49). С. 67–77.

REFERENCES

1. Abazov A.Kh. Mountain verbal courts of Terek and Kuban regions in 1871-1918. *Istoriya gosudarstva i prava* [History of state and law]. 2015. No. 23. Pp. 58–63. (In Russian)

2. Abazov A.Kh. Documentation of the activities of the Nalchik Highland Court of Words: paperwork and external communication. *Elektronnyy zhurnal «Kavkazologiya»* [Electronic journal "Caucasology"]. 2022. No. 4. Pp. 239–255. (In Russian)

3. Abazov A.Kh. Nalchik Mountain Court of Words in the judicial system of the Terek region in the last third of the XIX – early XX centuries. *Voprosy istorii* [Questions of history]. 2014. No. 12. Pp. 141–148. (In Russian)

4. Abazov A.Kh. *Nal'chikskiy okrug v sudebnoy sisteme Terskoy oblasti (poslednyaya tret' XIX – nachalo XX v.)* [Nalchik district in the judicial system of the Terek region (the last third of the XIX – the beginning of the XX century)]. Nal'chik: Izdatel'skiy otdel KBIGI, 2014. 108 p. (In Russian)

5. Abazov A.Kh. *Narody Tsentral'nogo Kavkaza v sudebnoi sisteme Rossiiskoi imperii v kontse XVIII – nachale XX v.* [The peoples of the Central Caucasus in the judicial system of the Russian Empire in the late XVIII – early XX centuries]. Nal'chik: Pechatnyi dvor, 2016. 264 p. (In Russian)

6. Abazov A.Kh. Forms of social conflicts among Kabardians in the last third of the XIX – early XX centuries. (Based on the materials of the Nalchik Mountain Court of Words). *Istoriya nauki i tekhniki* [History of science and technology]. 2017. No. 12. Pp. 37–43. (In Russian)

7. Abazov A.Kh., Dostova A.I. From the history of law enforcement activities of mountain verbal courts in the North Caucasus: an overview of the fate and practice of the Yekaterinodar court (1871–1920). *Vestnik Kabardino-Balkarskogo instituta gumanitarnykh issledovaniy* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Institute for Humanitarian Research]. 2022. No. 4–1(55). Pp. 7–14. (In Russian)

8. *Adygi: Adygeytsy. Kabardintsy. Cherkesy. Shapsugi* [Adygi: Adygea. Kabardians. Circassians. Shapsugs]. / ot red. A.Kh. Abazov, A.V. Kushkhabiev [et al.]. Moscow: Nauka, 2022. 870 p. (Seriya «Narody i kul'tury»). (In Russian)

9. Anchabadze Yu.D. *Politicheskaya kul'tura adygov: traditsionnye instituty i ikh evolyutsiya (vtoraya polovina XIX v. – 1920-e gody)* [Political culture of the Adyghs: traditional institutions and their evolution (the second half of the 19th century – the 1920s)]. Moscow: Institut etnologii i antropologii im. N.N. Miklukho-Maklaya RAN, 2012. 340 p. (In Russian)

10. Arsanukaeva M.S. *Gosudarstvenno-pravovaya politika Rossiyskoy imperii v Chechne i Ingushetii (XIX – nachalo XX vv.)* [State-legal policy of the Russian Empire in Chechnya and Ingushetia (XIX – early XX centuries)]: avtoref. dis. … d-ra yurid. n-k. Moscow, 2010. 51 p. (In Russian)

11. Arsanukaeva M.S. Inheritance in Sharia and Adates among the Chechen Tsev and Ingush (XIX – early XX centuries). *Evraziyskiy yuridicheskiy zhurnal* [Eurasian Legal Journal]. 2009. No. 6(13). Pp. 23–29. (In Russian)

12. Arsanukaeva M.S. *Pravovaya kul'tura chechentsev i ingushey: (XIX - nachalo XX veka): monografiya* [Legal culture of Chechens and Ingush: (XIX – early XX centuries): monograph]. Moscow: RPA Minyusta Rossii, 2009. 198 p. (In Russian)

13. Arsanukaeva M.S. Trial on Adates of Chechens and In-Gush (XIX century – beginning of XX century). *Uchenye trudy Rossiyskoy akademii advokatury* [Scientific works of the Russian Academy of Advocacy]. 2008. No. 6(11). Pp. 62–68. (In Russian)

14. Arsanukaeva M.S., Bittirova T.Sh. Sworn attorneys from the highlanders and their role in the development of the legal culture of the peoples of Northern Kavkaz (the second half of the XIX – the beginning of the XX century). *Pravovaya kul'tura* [Legal culture]. 2015. No. 3(22). Pp. 30–38. (In Russian)

15. Babich I.L. *Evolyutsiya pravovoy kul'tury adygov* [Evolution of the legal culture of the Adyghs]. Moscow: Rossiyskaya gosudarstvennaya biblioteka, 1999. 239 p. (In Russian)

16. *Veka sovmestnoy istorii: narody Kabardino-Balkarii v rossiyskom tsivilizatsionnom protsesse (1557–1917 gg.)* [Centuries of joint history: the peoples of Kabardino-Balkaria in the Russian civilizational process (1557–1917)]. Nal'chik: Izdatel'skiy otdel IGI KBNTs RAN, 2017. 544 p. (In Russian)

17. Gladunets A.V. Trial in the North Caucasus in the second half of the XIX – early XX centuries]. *Pravo i politika* [Law and Politics]. 2009. No. 9. Pp. 1956–1959. (In Russian)

18. Darchieva S.V. Problems of political and administrative administration in the North Caucasus at the beginning of the 20th century (on the example of the Terek region). *Izvestiya SOIGSI* [News of SOIGSI]. 2016. No. 22(61). Pp. 47–55. (In Russian)

19. *Istoriya Severnogo Kavkaza: uchebnoe posobie* [History of the North Caucasus: a textbook]. Rostov-na-Donu: Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2017. 282 p. (In Russian)

20. *Istoriya Chechni s drevneyshikh vremen do nashikh dney* [The history of Chechnya from ancient times to the present day]: V 2-kh tomakh. Tom 1. Groznyy: Knizhnoe izdatel'stvo, 2006. 828 p. (In Russian)

21. Kobakhidze E.I. “Not one weapon...” (Experience of judicial and administrative transformations in Ossetia in the 30s – early 60s of the XIX century). *Kavkazskiy sbornik* [Caucasian collection]. / otv. red. V. V. Degoev. Moskva: Russkaya panorama, 2010. Pp. 157–175. (In Russian)

22. Kobakhidze E.I. Highland verbal court and the problem of reorganization of legal proceedings for the highlanders of the Central Caucasus. *Sotsiokul'turnye i politicheskie problemy vysokogornykh rayonov Kavkaza: proshloe, nastoyashchee, budushchee: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, 28–30 oktyabrya 2010 goda.* Karachaevsk: Karachaevo-Cherkesskiy gosudarstvennyy universitet im. U.D. Alieva, 2010. Pp. 212–219. (In Russian)

23. Kobakhidze E.I. Integration of Ossetia into the judicial and administrative system of the Russian Empire. *Rossiyskaya istoriya* [Russian history]. 2012. No. 4. Pp. 3–15. (In Russian)

24. Kobakhidze E.I. Essay K.L. Khetagurov “Mountain Verbal Court” and the problem of reorganization of legal proceedings for the highlanders of the North Caucasus in the 70s. XIX – early XX centuries. *Izvestiya SOIGSI* [News of SOIGSI]. 2010. No. 4(43). Pp. 37–47. (In Russian)

25. Kobakhidze E.I. Specificity and the results of the reform of the judicial system in the Central Caucasus in the 60–70s. XIX century. *Vestnik Severo-Osetinskogo gosudarstvennogo universiteta imeni K.L. Khetagurova*. [Bulletin of the North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov]. 2010. No. 2. Pp. 70–76. (In Russian)

26. Kudaeva S.G. *Adygi (cherkesy) Severo-Zapadnogo Kavkaza v XIX veke: problemy transformatsii i differentsiatsii adygskogo obshchestva* [Adygi (Circassians) of the North-West Caucasus in the 19th century: the problems of transformation and differentiation of the Adyghe community]. Maykop, 2006. Pp. 265–266. (In Russian)

27. Mal'tsev V.N. Political and legal aspect of reforming mountain courts in the Kuban and Terek regions in the late 60s – early 70s. XIX century. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Regionovedenie: filosofiya, istoriya, sotsiologiya, yurisprudentsiya, politologiya, kul'turologiya* [Bulletin of the Adygea State University. Series 1: Regional studies:

philosophy, history, sociology, jurisprudence, political science, cultural studies]. 2008. No. 8. Pp. 96–108. (In Russian)

28. Prasolov D.N. *S"ezdy doverennykh v politicheskoy kul'ture kabardintsev i balkartsev* [Congresses of Kabardians and Balkarians trusted in political culture]. Nal'chik: OPR, 2022. 240 p. (In Russian)

29. Prasolov D.N. *S"ezdy doverennykh v praktikakh mestnogo samoupravleniya kabardintsev i balkartsev vo vtoroy polovine XIX – nachale XX v.* [Congresses of Kabardians and Balkarians trusted in the practices of local samunicipal management in the second half of the XIX – early XX century]. Nal'chik: Izdatel'skiy otdel IGI KBNTs RAN, 2019. 208 p. (In Russian)

30. *Rossiya i narody Severnogo Kavkaza v XVI – seredine XIX veka: sotsiokul'turnaya distantsiya i dvizhenie k gosudarstvenno-politicheskomu edinstvu* [Russia and the peoples of the North Caucasus in the XVI – mid-XIX centuries: sociocultural distance and movement towards state-political unity]. Nal'chik: Izdatel'skiy otdel IGI KBNTs RAN, 2018. 268 p. (In Russian)

31. Saydumov D.Kh. Rural aul and Mountain verbal courts of the Terek region: the procedure for the production and decision of cases in rural courts. *Evropeyskiy zhurnal sotsial'nykh nauk*. [European Journal of Social Sciences]. 2010. No. 3. Pp. 132–137. (In Russian)

32. Saydumov D.Kh. *Sud, pravo i pravosudie u chechentsev i ingushey (XVIII–XX vv.)* [Court, law and justice among Chechens and Ingush (XVIII–XX centuries)]. Groznyy: IP Bisultanova P.Sh., 2014. 526 p. (In Russian)

33. Saydumov D.Kh., Saydumov M.Kh. Court and legal proceedings on the customary law of Chechens. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Samara State University]. 2008. No. 5–2(64). Pp. 263–272. (In Russian)

34. Serdyuk A.V. Features of the proceedings of Northern Kavkaz because of the composition of the Russian Empire in the middle of the XIX – early XX centuries. *Nauka i obrazovanie: khozyaystvo i ekonomika; predprinimatel'stvo; pravo i upravlenie* [Science and education: farming and economics; entrepreneurship; law and management]. 2012. No. 4(23). Pp. 150–153. (In Russian)

35. Urushadze A.T. “Imaginary Justice”: Mountain Verbal Courts and the Problem of Judicial and Administrative Reform of the Caucasus Region in the Materials of the Revision of N.M. Reinke. *Noveyshaya istoriya Rossii* [Contemporary history of Russia]. 2019. Vol. 9. No. 4. Pp. 914–927. (In Russian)

36. Khasbulatov A.I. Court and judicial reforms in Chechnya (second half of XIX – beginning of XX centuries). *Nauchnaya mysl' Kavkaza* [Scientific thought of the Caucasus]. 2007. No 1(49). Pp. 67–77. (In Russian)

Информация об авторе

Хагажеев Мирбек Асланович, аспирант, Научно-образовательный центр Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

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

ma_khagazheev@mail.ru

Information about the author

Khagazheev Mirbek Aslanovich, Post-graduate student, Scientific and Educational Center Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

ma_khagazheev@mail.ru

ФИЛОЛОГИЯ

УДК 821.352.3 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-375-383
EDN: OYDIQN

Эволюция творчества адыгских писателей XX века

Ю. М. Тхагазитов

Институт гуманитарных исследований –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18

Аннотация. В статье анализируются истоки формирования кабардинской новописьменной литературы 20–30-х годов. Рассматриваются характерные и основные тенденции развития кабардинской поэзии (Бекмурзы Пачева, Туты Борукаева, Али Шогенцукова, Алима Кешокова, Лиуана Губжокова и др.). Цель – раскрыть художественные достижения и противоречия в самом литературном процессе, творчестве отдельных писателей и художественных произведениях. В результате исследования выявлено, что литературный процесс определялся сложным политическим и культурным синтезом, идеологизацией, лежащей в основе художественного мышления. Многовековую логику развития национальной литературы следует рассматривать как эволюционный процесс, вписавшийся в советскую глобализацию, открывший новые пути дальнейшего развития кабардинской литературы в условиях современной культурной универсализации.

Ключевые слова: кабардинская литература 20–30-х гг., эволюция, эстетическая актуальность, идеологизация

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023, принята к публикации 02.12.2023

Для цитирования. Тхагазитов Ю. М. Эволюция творчества адыгских писателей XX века // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 375–383. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-375-383

Original article

The evolution of creativity of Adyghe writers of the 20th century

Tkhagazitov Yu.M.

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 origins of the formation of Kabardian new written literature of the 20–30s. The characteristic and main trends in the development of Kabardian poetry are considered (Bekmurza Pachev, Tut Borukaev, Ali Shogentsukov, Alim Keshokov, Liuan Gubzhokov, etc.). The goal is to reveal artistic achievements and contradictions in the literary process itself, the work of individual writers and works of art. As a result of the study, it was revealed that the literary process was determined by a complex political and cultural synthesis, ideologization underlying artistic thinking. The centuries-old logic of the development of national literature should be considered as an evolutionary process that fit into Soviet globalization, opening up new ways for the further development of Kabardian literature in the conditions of modern cultural universalization.

Keywords: Kabardian literature of the 20–30s, evolution, aesthetic relevance, ideologization

© Тхагазитов Ю. М., 2023

Submitted 27.11.2023, approved after reviewing 29.11.2023, accepted for publication 02.12.2023

For citation. Tkhagazitov Yu.M. The evolution of creativity of Adyghe writers of the 20th century. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 375–383. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-375-383

Связь письменной литературы с фольклором пережила сложную эволюцию: от прямого заимствования сюжетов, художественных конфликтов и проблематики до переосмысления функций фольклора, определения его роли в становлении и развитии образного мира литературы. Другим источником для развития кабардинской литературы является творчество адыгских просветителей XIX века.

Анализируя истоки формирования новописьменной литературы в 20–30-е годы, следует помнить, что они связаны прежде всего с художественным опытом русской литературы.

Художественные открытия, достижения и противоречия в самом литературном процессе, творчестве отдельных писателей и художественных произведениях определялись тогда сложным политическим и культурным синтезом, идеологизацией, лежащей в основе художественного мышления.

Масштабные социальные преобразования в Кабардино-Балкарии в 20-е годы прошлого века вызвали к жизни многие литературные жанры, призванные в эпоху социальных потрясений и духовного перелома запечатлеть образ человека и времени.

В годы становления кабардинской литературы доминирующее положение в ней занимала поэзия. Наиболее характерные и основные тенденции развития кабардинской поэзии были реализованы в творчестве Бекмурзы Пачева и Туты Борукаева.

Бекмурза Пачев знал тонкости адыгского фольклора, исторические предания своего народа. В своем письменном творчестве он развил фольклорно-эпические традиции. Его творчество стало связующим звеном перехода от фольклора к письменной литературе.

В знаменитом стихотворении «Ветер», написанном в 1912 году, Пачев создает картину разрушения национального мира. Символ ветра предстает у поэта в своей суровой однозначности, как разрушительная стихия этнических оснований народа после «национальной катастрофы» (С. Сиюхов) [1, с. 24].

К особенностям развития кабардинской литературы означенного периода относится и обращение к игровым началам творчества джегуако, что нашло художественное претворение у Т. Борукаева, сумевшего соединить в структуре художественного текста фольклорные и личностные основы этнической традиции.

В идеологизированном литературном процессе 20–30-х годов совмещаются различные тенденции, представляемые не столько творческой индивидуальностью, сколько самим литературным процессом. В этом смысле кабардинская литература развивалась в том же русле, что и другие литературы бывшего Советского Союза.

Литературный процесс 20–30-х годов и становление творческой индивидуальности невозможно представить себе без творчества Али Шогенцукова, автора лирических стихотворений, поэм «Зимняя ночь», «Мадина», «Вчерашние дни Тембота», а также романа в стихах «Камбот и Ляца», являющихся художественной летописью кабардинского народа [2].

Основатель и главная действующая фигура советской кабардинской литературы начальных этапов ее становления и развития, ученик баксанских просветителей Али Шогенцуков сохраняет свою эстетическую актуальность именно ввиду органичной связи со значимыми структурами этноментального сознания, национальной специфики художественной рефлексии.

Поэт ищет пути выхода из кризиса после Кавказской войны, а для него это прежде всего создание национальной литературы, являющейся «инобытием» богатейшего пласта национально-эпической традиции и возможностью ее выживания в личностно-поэтической интерпретации.

Поэт вобрал в свой художественный мир эстетические ценности инонациональных литератур и выстроил его по координатам непреходящих традиционных ориентиров. Надо подчеркнуть, что выдающийся национальный поэт Али Шогенцуков вслед за Бекмурзой Пачевым становится неподкупным голосом своего народа. Уже в самой его личности и жизненном пути, как и в поэзии, сопрягаются все лучшие традиции национальной культуры, а также русской, европейской (жанровая система, принципы русского и европейского стихосложения и т.д.) и восточной поэтики.

В годы Великой Отечественной войны и послевоенные годы по-прежнему интенсивно и успешно развивалась поэзия. В 40–50-е годы лирика Бетала Куашева, Алима Кешокова и Адама Шогенцукова получает признание у всесоюзного читателя.

В обширном ряду произведений А. Кешокова, датируемых 40–50-ми годами XX века, трудно найти художественные тексты, полностью вычлененные из общего потока советской эстетики и утверждающие этническую рефлексию автора.

Первые попытки равноправного представления национального и общесоветского, как нам кажется, связаны с военной лирикой поэта.

Значительным произведением военного и послевоенного творчества А. Кешокова стала драматическая поэма «Земля нартов». Поэма начинается с возвращения воина-победителя на родину: «Я вернулся с вещевым мешком». Он видит разоренную врагом землю, где все разрушил «побежденный враг». Священная война видится поэту как битва за спасение человечества, как борьба света с тьмой. Поэт убежден, что у народа хватит сил возродить разоренную землю, возродить «молодость и красоту земли». Кешоков не случайно делает эту строку своеобразным лейтмотивом драматической поэмы. Сохраняя в основном идейно-тематическую структуру нартского эпоса, он углубляет психологические мотивировки, глубже раскрывает внутренний мир героев.

К какой бы теме Алим Кешоков не обращался в послевоенные годы, всегда можно наблюдать в его творчестве органический синтез лирического начала с народно-эпической традицией:

О, если б мне чудесный конь достался,
Не стал бы я на нем сидеть в седле,
Вскочил бы на хребет его и мчался,
И Млечный Путь провел бы на земле [2, с. 67].

Так, приблизительно в середине XX столетия в кабардинской поэзии сознательным введением в текст закрепляются традиционные ценности и, что самое главное, тенденция отказа А. Кешокова от идеологических установок к постижению индивидуального лирического переживания, что находит свое дальнейшее развитие у Б. Куашева и других поэтов послевоенного поколения.

Замечательным литературным дебютом Б. Куашева явилось стихотворение «Индыл» (1948). Его деятельность этого периода многогранна: он пишет стихи, поэмы, либретто, сказки. Вобрав в себя опыт двух прославленных мастеров слова – А. Шогенцукова и А. Кешокова, он расширил художественную выразительность национального и поэтического текста.

Художественный опыт А. Кешокова и Б. Куашева развивается поэтами-шестидесятниками, которые выбирают в литературе наиболее близкую для своей индивидуальности художественно-стилевую тенденцию (З. Тхагазитов, Л. Губжоков, К. Эльгар, Б. Кагермазов, П. Кажаров и др.).

Отмечая вклад и место Зубера Тхагазитова в истории кабардинской поэзии, следует подчеркнуть важность его роли в плане связующего звена между поколениями писателей. Первые его опыты выделены естественным синтезом национального и гражданского.

Важно отметить, что условно-индивидуальное «Я» в лирике З. Тхагазитова – исходная точка осмысления окружающего в рамках традиционной этничности:

Когда свершить я подвиг не смогу,
ты изгони меня, о, родина моя…
Но и прости меня.
Когда же я смогу, но убегу,
когда же я сумею, но солгу,
ты прокляни меня, страна кипучих рек!.. [3, с. 89]

Лирическая канва произведения реализовывается тоже в русле советской патетики, но одновременно мы наблюдаем равноправное присутствие в приведенных строках «своих» национальных базовых ценностей и идеалов. Внутренняя художественная раскрепощенность поэта делала возможным эволюционное развитие его художественного мышления даже в жестких рамках сугубо официальной эстетики [4].

В качестве характерной черты поэтики и образного мышления З. Тхагазитова все же стоит выделить субъективизацию эстетического переживания. Данный феномен в художественном мире поэта отчетливо проявляется. Поэзия З. Тхагазитова самобытна и представляет собой огромный шаг вперед на пути формирования национально-эстетического отражения. Также, абстрагируясь от обобщенного коллективного переживания, писатель сохраняет в стихотворениях актуальные для своего времени особенности семантики и риторики.

Источником поэзии Лиуана Губжокова стала сама жизнь во всех ее проявлениях. Поэт смотрел на мир под «исключительно поэтическим углом зрения» (В. Белинский). Как настоящий художник слова, он отличался исключительной добротой и отзывчивостью. Об этом свидетельствуют его произведения, в особенности стихотворение «Я в милых горах не однажды...»:

Я в милых горах не однажды
Страдал от обилья дождя,
Но почву спасал он от жажды,
И не обиделся я... [5, с. 112].

Поэт каждый раз предстает в новых и неожиданных образах: охотником («Я охотник, охочусь за счастьем…»); женой охотника («Жена охотника»); ракушкой, «выловленной в море» и «грустящей о родине» («Морская ракушка»); влюбленным морем, скучающим по своей возлюбленной («Прибоем прибрежную гальку дробило»); стаей голубей, каждый день прилетающей к инвалиду за кормом («Гулкий стук костылей…»); материнским сердцем («Баллада о материнских слезах»); волнами Черека («Волны Черека») [5].

Важное место в творчестве Лиуана Губжокова занимает образ матери. Для поэта, которому не посчастливилось почувствовать прикосновение «шершавой отцовской руки», мать оставалась опорой во всем, и ее утрата стала самой большой трагедией в его жизни. Обращаясь к душе матери, поэт пишет:

Я вечного покоя не нарушу –
Не обману я чаяний твоих:
В душе своей ношу твою я душу
И жизнь любить сумею за двоих [5, с. 37].

Герой Лиуана Губжокова в постоянном поиске неизведанного. Мотив следования мечте, поиск счастья близок и другим авторам, однако у Лиуана Губжокова он неповторим. Всю жизнь поэт посвятил светлой надежде на лучшее будущее своего народа.

После меня – пусть цветет все, как прежде!
Жизнь посвящаю я этой надежде [5, с. 90].

Следующее поколение, которое привнесло в поэзию на кабардинском языке новые пути развития литературы, представлено А. Бицуевым, Х. Бештоковым, Р. Ацкановым и А. Оразаевым.

Творчество А. Бицуева оформлялось в поисках органичного единства национального этико-эстетического мышления (Одни и пред буранами тверды, // Других пугает шорох листопада) [6, с. 13]. Поэту не чужды и высокие лирические откровения:

Снег идет… Скрываясь от тепла,
Вслед за ним иду я наугад,
Только не уйти мне от тебя:
Ты всегда любила снегопад…
Мне б через сугробы и года
Миновать бы прошлое в обход…
Только как забыть тебя, когда
Снег идет! Снег идет… [6, с. 45].

Стихотворение А. Бицуева «Снегопад» нужно рассматривать в ряду таких шедевров кабардинской лирики, как «Зимняя ночь» А. Шогенцукова, «Поэзия» А. Кешокова, «Черное море» З. Тхагазитова, «Земля моя» Л. Губжокова, «82-й сонет» Р. Ацканова.

В первой книге Х. Бештокова «Ракетодромы» присутствует дерзкий порыв к художественному освоению духовного мира современника. Уже в этом сборнике стихов удалось преодолеть внутреннюю точку зрения на традицию.

Поиск новых художественно-стилевых тенденций Х. Бештоков продолжил в «Каменном веке», где намеренно и осознанно дистанцировался от национального и одновременно социологического подхода, уведя событийное художественное ядро произведения в доэтническое, досоциальное бытие человека.

Поэтическое своеобразие романа в стихах «Каменный век» как этапного для кабардинской литературы явления есть результат органичного синтеза анимистической языковой стихии с инонациональным художественным опытом.

К достижениям кабардинской литературы в полной мере нужно отнести и поэзию Руслана Ацканова. Он обладает даром настоящего поэта – ненавязчиво вступать в диалог со своим читателем. Больше всего поэт опасается обесценивания родного слова. Зачастую точность и лаконизм его поэтического стиля уходят в мир «ностальгической элегантности» (А. Кармова).

Р. Ацканов сумел убедительно воспроизвести в своем творчестве открытие мира, радость его познания и грусть, ставшую основой тонкого лиризма и элегической тональности. Его поэтическое мироощущение отмечено совершенно неожиданной тягой к единению, казалось бы, взаимоисключающих художественных тенденций, восприимчивых к жесткой линии горизонта и к переливающейся светотени, мимо которой протекает взор поэта на пути к месту соединения земли и неба.

Художественное мышление Афлика Оразаева также подчеркнуто неравнодушно к ключевым национальным концептам, природа которых органично объединяет устоявшиеся в художественном сознании составные национального универсума с нетривиальным переходом к процессу с соответствующими нюансами возникающих при этом переходе смыслов. Семантически неоднозначные концепты А. Оразаева, как и изменчивые объекты («дождь», «снег», «свет», «ветер» и др.), – не просто индивидуальные слепки с реалий бытия. Их зыбкость – тревога поэта о будущем. Это прежде всего ощущение неустойчивости и хрупкости национального бытия, мироздания в целом.

Именно в поэзии названной выше плеяды, во многом завершающей нюансы развития кабардинских этико-эстетических ценностей, появляются апокалиптические мотивы, редкие для авторов новописьменных литератур.

С 60-х годов кабардинский роман органично вписывается в общесоюзный литературный процесс. Писатели обобщают исторический опыт народа, его прошлое и настоящее, отражают соотношение истории и личности в ее становлении и во взаимосвязях с национальной культурой [7].

Роман А. Шортанова «Горцы», обращенный к истории народов Кавказа (начало XIX века), поднимает значительные проблемы художественного обобщения, связанные с военными, политическими событиями этого периода, уделяя также внимание жизни, нравам, быту Дагестана, Осетии, Черкесии, Кабарды и Балкарии.

Уже первая книга романа «Горцы» явилась значительным вкладом в кабардинскую литературу, представляя собой относительно законченное произведение. Многие сюжетные линии и характеры в романе четко обозначены: это и Бекмурза Ногмов, и Батоко, и кузнец Дабеч, и Ермолов, и многие другие. Но особый интерес вызывает у автора образ кабардинского просветителя Шоры Ногмова.

В романе тесно сплетены глобальные исторические проблемы и судьбы отдельных людей. В постижении сложнейшей эпохи первой половины XIX века сказались большая эрудиция и высокая профессиональная культура писателя, этнографа и фольклориста А. Шортанова. Исторические и фольклорно-этнографические познания автора помогли созданию того фона, на котором развертывались события и человеческие судьбы, вводя читателя в своеобразный мир Кавказской войны.

Сближением Ногмова с русскими просветительскими идеями автор определяет роль и место конкретного человека в истории кабардинского народа. И это позволило ему в новом ракурсе осветить историческое прошлое кабардинского народа и пути его дальнейшего развития.

Для полноправной характеристики развития кабардинской прозы наиболее удачными представляются романы «Род Шогемоковых» Х. Теунова, «Вершины не спят» и «Сломанная подкова» А. Кешокова, «Достойны гыбзы» С. Мафедзева.

Уже название романа «Род Шогемоковых» определяет его жанрово-композиционную особенность: история рода воссоздается писателем на фоне событий Зольского восстания кабардинских крестьян и значительных политических событий в России начала XX века.

Наряду с семейно-бытовой проблематикой в романе зримо прослеживается нарастающая линия повествования: от частного протеста к глубокому пониманию социальных проблем и формированию внутреннего мира личности героя.

Повествуя о поворотных этапах истории и жизни кабардинского народа – предоктябрьской, революционной и послереволюционной эпохи, А. Кешоков в романе «Вершины не спят» художественно исследует закономерности исторического движения, связывая воедино большие исторические события с судьбами своих героев. Народ и революция, драматизм становления национального самосознания, борьба за утверждение нового мира, становление национальной интеллигенции – вот проблемы, поставленные и реализованные в данном произведении.

Лейтмотивом другого известного произведения А. Кешокова «Сломанная подкова» является судьба малых народов, волею истории оказавшихся на перекрестке социальных катаклизмов. Находящаяся в процессе становления нация вновь предстала перед выбором, от которого зависела ее дальнейшая судьба. Сюжетную основу романа «Сломанная подкова» составляют события, развернувшиеся в Кабардино-Балкарии осенью 1942 года. Быстро приближающаяся война диктует в кратчайшие сроки решение сложнейших политических и хозяйственных задач, важных не только для самой республики, но и для страны в целом. Как провести эвакуацию скота? Нужно ли при этом руководствоваться мест-

ными решениями или ждать приказа вышестоящих органов? Оправдано ли формирование кавалерийской нацдивизии в условиях ведения современной войны?

Экстремальные условия, в которых приходится решать эти принципиальные вопросы, подчеркивают неоднозначность проблем, поставленных историей, не только выявляют затаившихся врагов советской власти, но и приводят к столкновению людей, связанных общими целями и задачами. Особенно удались А. Кешокову образы Локотоша и Бештоева, непримиримый конфликт между которыми позволяет писателю художественно воссоздать драматизм ситуации.

Герои А. Кешокова выдерживают трудные испытания, нравственный итог которым подводит Бекан, выражая в формулах традиционной мудрости новое отношение к историческому пути своего народа: «Мой дом в развалинах. Не беда. Лишь бы голова была цела – шапка найдется. Построю я дом. Еще лучше и красивей. Построю на радость потомству. Не сломанная подкова прерывает путь, а сломанная воля. У нас сломана лишь подкова, воля не сломана» [8, с. 98].

При всем трагическом развороте Кавказской войны, завершившейся в XIX веке, ее кровавых законов Северный Кавказ становится для русской культуры символом вольности, а горцы – его живым воплощением. Взаимосвязи двух различных культур не будут отменены ни самой войной, ни ее последствиями.

В этой трагической ситуации и рождается у М. Лермонтова вопрос:

Я думал: жалкий человек.
Чего он хочет!.. Небо ясно,
Под небом места много всем,
Но беспрестанно и напрасно
Один враждует он – зачем? [9, с. 27].

Лучший ответ на этот трагический вопрос в кабардинской литературе 80-х годов – роман Сараби Мафедзева «Достойны гыбзы».

Воссоздавая в своем романе подобную противоречивую историческую ситуацию, С. Мафедзев ведет речь о погибших на поле брани с оружием в руках: таков смысл гыбзы.

Главная особенность романа в том, что С. Мафедзев показывает ситуацию войны с точки зрения России и с точки зрения Кавказа, стремится увидеть ее не только «изнутри», но и извне, со стороны русских.

В кабардинской литературе повесть занимает особое место. В отличие от романа с его выраженной акцентацией на прошлое повесть сосредоточена на современности. И в этом нужно видеть закономерность освоения реальной действительности. Каждый раз, когда перед национальной литературой встает задача освоения жизни народа и человека на новом историческом этапе, функции эти зачастую выполняет повесть.

Сложность развития национальной повести усугублялась идеологизацией современной действительности. С этим связана внутренняя противоречивость поэтики жанра, ее художественная неровность и порой отсутствие возможности подняться над журналистикой. Здесь надо сказать, что новым, современно звучащим явлением для кабардинской литературы стала повесть К. Эльгарова «Ночное солнце», в которой семья уже не является нравственным центром повествования, как у его предшественников, асоциально-нравственный раскол проходит в рамках патриархальной семьи, что, собственно, и явилось оригинальным шагом к деидеологизации кабардинской литературы.

Среди удачных примеров следует также назвать повесть «Ранняя весна» Б. Журтова. В ней автор нашел верный лирический тон, временную дистанцию (герой повести заново переживает давно минувшую историю), оправдывающую сюжетно-композиционный

строй произведения. Повесть сыграла свою заметную роль в лиризации данного жанра в кабардинской литературе.

В отличие от повести современный кабардинский рассказ, его тематика и проблематика, жанровые модификации определяют особые функции в современном литературном процессе. С этим связаны высокие художественные задачи и достижения кабардинского рассказа. Система жанровых модификаций и художественные достижения писателей-новеллистов, формирование творческих индивидуальностей определяются прежде всего тем, что этот жанр отличается новым уровнем понимания и прочтения национально-эпической традиции.

Можно утверждать, что рассказ в переходный для литературы период обновляет поэтику прозы в целом. Такая тенденция связана с именами Ахмедхана Налоева, Заура Налоева, Бориса Мазихова, Бориса Кагермазова, Сафарби Хахова, определившими стилевую динамику данного жанра.

Таким образом, кабардинский рассказ выявил кризис псевдоэпоса и утвердил тенденцию «стяжения» структуры пространственного рассказа.

Еще одним вектором развития кабардинской литературы, оказавшим решающее влияние на формирование новой художественности, оказался процесс преодоления пространных, поэтических и повествовательных жанров в национальной литературе. Наиболее показательные его образцы в лучших афоризмах и миниатюрах С. Бейтуганова. Они сохраняют свой этический, дидактический и жизненный потенциал, являя собой концентрированные резюме, сделанные в процессе наблюдения за реальной действительностью.

Таким образом, столетнюю логику развития национальной литературы следует рассматривать как эволюционный процесс, вписавшийся в советскую глобализацию, открывший новые пути дальнейшего развития кабардинской литературы в условиях современной культурной универсализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сиюхов С.* Воскресение из мертвых. Майкоп: Адыгейское книжное изд-во, 1991. 189 с.

2. *Кешоков А.* Стихотворения и поэмы. Москва: Гослитиздат, 1957. 336.

3. *Тхагазитов З.* Избранное: Стихи, поэмы. В 2 т. Нальчик: Эльбрус, 1994. 414 с.

4. *Тхагазитов Ю.* Этнокультурные основы романа «Сломанная подкова» А. Кешокова // Вестник Кабардино-Балкарского института гуманитарных исследований. № 1(52). 2022. С. 93–98.

5. *Губжоков Л.* Живу для живых. Жизнь и творчество. Нальчик: Эльбрус, 2013. 176 с.

6. *Бицуев А.* Позывные жизни. Стихотворения. Баллады. Поэмы. Нальчик: Эльбрус, 2000. 223 с.

7. *Тхагазитов Ю. М., Толгуров Т. З., Хавжокова Л. Б.* Эволюция кабардинской прозы XX в. (к 100-летию государственности КБР) // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2021. № 3(54). С. 123–127. DOI: 10.25744/vestnik.2021.54.3.017

8. *Кешоков А.* Сломанная подкова. Москва: Мол. Гвардия, 1973. 527 с.

9. *Лермонтов М.* Сильней страданий роковых. Стихотворения. Поэмы. Москва: Военное изд-во, 1992. 558 с.

REFERENCES

1. Siyukhov S. *Voskreseniye iz mertvykh* [Resurrection from the Dead]. Maykop: Adygeyskoye knizhnoye izd-vo, 1991. 189 p. (In Russian)

2. Keshokov A. *Stikhotvoreniya i poemy* [Poems and poems]. Moscow: Goslitizdat, 1957. 336 p. (In Russian)

3. Tkhagazitov Z. *Izbrannoye: Stikhi, poemy* [Favorites: Poems, poems]. Nal'chik: El'brus, 1994. 414 p. (In Russian)

4. Tkhagazitov Yu. Ethnocultural foundations of the novel “The Broken Horseshoe” by A. Keshokov. *Vestnik Kabardino-Balkarskogo instituta gumanitarnykh issledovaniy* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Institute for Humanitarian Research]. No. 1(52). 2022. Pp. 93–98.

5. Gubzhokov L. *Zhivu dlya zhivykh. Zhizn' i tvorchestvo* [I live for the living. Life and creativity]. Nal'chik: El'brus, 2013. 176 p. (In Russian)

6. Bitsuyev A. *Pozyvnyye zhizni. Stikhotvoreniya. Ballady. Poemy* [Call signs of life. Poems.]. Nal'chik: El'brus, 2000. 223 p. (In Russian)

7. Tkhagazitov Yu.M., Tolgurov T.Z., Khavzhokova L.B. The evolution of Kabardian prose of the 20th century (to the 100th anniversary of the statehood of the Kabardino-Balkaria). *Vestnik Akademii nauk Chechenskoy Respubliki* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic]. 2021. No. 3(54). Pp. 123–127. DOI: 10.25744/vestnik.2021.54.3.01

8. Keshokov A. *Slomannaya podkova* [Broken horseshoe]. Moscow: Mol. Gvardiya, 1973. 527 p. (In Russian)

9. Lermontov M. *Sil'ney stradaniy rokovykh. Stikhotvoreniya. Poemy* [Stronger than fatal suffering. Poems]. Moscow: Voyennoye izd-vo, 1992. 558 p. (In Russian)

Информация об авторе

Тхагазитов Юрий Мухамедович, д-р филол. наук, вед. науч. сотр., Институт гуманитарных исследований – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

yutkhag@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5566-9156

Information about the author

Tkhagazitov Yuri Mukhamedovich, Doctor of Philology, Leading Researcher, Institute of Humanitarian Researches – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street;

yutkhag@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5566-9156

ФИЛОЛОГИЯ

УДК 811.512.142 Научная статья
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-384-390
EDN: PQFTCR

Асхат Биджиев: врач, поэт, просветитель

Ф. Т. Узденова

Институт гуманитарных исследований –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18

Аннотация. В статье отражены жизнедеятельность и творческие изыскания карачаевского поэта, просветителя, переводчика Асхата Биджиева, подчеркиваются значение и роль его переводческого наследия («Песня о Соколе» и «Песня о Буревестнике» М. Горького, «Капитанская дочка» А. С. Пушкина, «Демон» М. Ю. Лермонтова, басни И. А. Крылова и др.) и просветительской мысли в становлении профессиональной карачаевской литературы. Анализ поэтических текстов выявил мастерство автора в передаче национальной самобытности, языковой «оснащенности», мировоззренческой позиции. Так, к примеру, идейно-сюжетная составляющая стихотворения «Плачет лес» может считаться безусловным маркером эволюционного качества текста, а выразительный художественно-изобразительный и стилистический инструментарий (главным образом метафоры и эпитеты) – высоким показателем эстетического воплощения авторского замысла. В работе применены структурно-описательный и лингвистический методы исследования, когнитивный и аксиологический подходы.

Ключевые слова: Асхат Биджиев, карачаевская литература, поэзия, переводческая деятельность, врач, просветительская мысль

Поступила 02.12.2023, одобрена после рецензирования 07.12.2023, принята к публикации 10.12.2023

Для цитирования. Узденова Ф. Т. Асхат Биджиев: врач, поэт, просветитель // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 384–390. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-384-390

Original article

Askhat Bidzhiev: doctor, poet, educator

F.T. Uzdenova

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 reflects the life activity and creative research of the Karachay poet, educator, translator Askhat Bidzhiev, emphasizing the significance and role of his translation heritage (“Song of the Falcon” and “Song of the Petrel” by M. Gorky, “The Captain’s Daughter” by A.S. Pushkin, “Demon" by M.Yu. Lermontov, fables by I.A. Krylov, etc.) and educational thought in the formation of professional Karachai literature. Analysis of poetic texts revealed the author’s skill in conveying national identity, linguistic “equipment,” and individual ideological position. So, for example, the ideological and plot component of the poem “The Forest is Crying” can be considered an unconditional marker of the evolutionary quality of the text, and the expressive artistic, visual and stylistic tools (mainly metaphors and

© Узденова Ф. Т., 2023

epithets) can be considered a high indicator of the aesthetic embodiment of the author's intention. The work used structural-descriptive, linguistic research methods, cognitive and axiological approaches.

Keywords: Askhat Bidzhiev, Karachay literature, poetry, translation activity, doctor, educational thought

Submitted 02.12.2023, approved after reviewing 07.12.2023, accepted for publication 10.12.2023

For citation. Uzdenova F.T. Askhat Bidzhiev: doctor, poet, educator. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 384–390. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-384-390

Асхат Басиятович Биджиев (1900–1958) – карачаевский поэт, переводчик, первый детский писатель, член Союза писателей СССР, первый кандидат медицинских наук (1934) из карачаевцев, первый хирург, один из образованнейших людей своего времени. Родился 17 января 1900 года в карачаевском ауле Учкулан (Баталпашинский отдел Кубанской области). В 1929 г. с отличием окончил медицинский факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. В 1934 году защитил кандидатскую диссертацию. В течение ряда лет работал в одной клинике с президентом Академии медицинских наук СССР Н. Н. Бурденко, зарекомендовал себя высококлассным специалистом, безупречно знающим свое дело, внимательным и чутким к людям.

В 1934 году А. Биджиева приглашают в Карачаевскую автономную область на должность главного врача областной больницы, параллельно он заведует хирургическим отделением, проводит сложнейшие операции. Под его руководством в Микоян-Шахаре (ныне – г. Карачаевск) построен новый корпус поликлиники, создана лаборатория, открыта медицинская школа.

В 1937 г. Асхат Биджиев был оклеветан, осужден как враг народа и сослан в Сибирь. Около двадцати лет отсидел в лагерях Гулага. На свободу вышел в 1954 году. После возвращения в Москву, к семье, его назначают заведующим хирургическим отделением московской больницы. Это было абсолютное признание и высокая оценка его профессионализма и человеческих качеств; он успешно трудился в коллективе, в котором работало свыше двадцати хирургов, докторов, профессоров.

В 1958 году Облисполком Карачаево-Черкесской автономной области и Обком КПСС приглашают А. Биджиева на работу в областной комитет по здравоохранению. Новость он встречает с воодушевлением: желание вернуться на Родину, трудиться на благо народа сопровождало его всю жизнь. Однако этим порывам не суждено было сбыться: 3 мая 1958 года его не стало.

На смерть любимого поэта остро отреагировала общественность. Представители Карачаево-Черкеской автономной области организовали комиссию во главе с А.Ш. Шамановым и приняли решение похоронить Асхата Басиятовича Биджиева на исторической родине. Однако по просьбе работников 48-й московской больницы, в которой он работал в последние годы, друзей и коллег талантливый хирург и поэт Карачая похоронен в Москве на Введенском кладбище.

В 1990 году состоялась научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения А. Биджиева. В его родном селе Учкулане, в хирургическом отделении карачаевской городской больницы и на Аллее знатных людей Карачая установлены мемориальные доски. Больничный переулок переименован в улицу имени А.Б. Биджиева. Постановлением мэра Карачаевского городского муниципального образования в 2003 году больнице г. Карачаевска присвоено имя А.Б. Биджиева.

В литературу А. Биджиев пришел в 20-е годы XX века. Свободный от конъюнктурщины и политдиктата (хотя он не был противником идеологии социализма), он писал пре-

имущественно в жанрах гражданской поэзии и пейзажной лирики. Многие произведения автора носят просветительский характер, об их значимости свидетельствуют сами названия стихотворений: «Чистота – залог здоровья», «Город и село» и др.

Первые его стихотворения «Къарачай тил» («Карачаевский язык») и «Бешик джыр» («Колыбельная песня») были опубликованы в 1925 г. в газете «Таулу джашау» («Горская жизнь»).

Первая книга поэта «Билим» («Знание»), впоследствии послужившая основой учебника, вышла в 1926 г. Карачаевский критик и литературовед А. И. Караева акцентирует внимание на ее воспитательном и прикладном значении: «…В книге для чтения много рассказов. Язык их прост и точен. В них повествуется о том, как сбивают масло, варят сыр, приготовляют, косят и копят сено, стригут овец, собирают ягоды, даются жанровые сценки, описания народных танцев («Той»), цитируются образцы народной поэзии (например, песня «Долай»)» [1, с. 50–51]. Представители старшего поколения декламировали его знаковые стихотворения, характеризующиеся разноплановостью, посвященные, главным образом, матери, родному языку, природе, родной земле: «Къыш» («Зима»), «Джаз» («Весна»), «Къайын» («Береза»), «Эмен» («Дуб»), «Нызы» («Ель»), «Нарат» («Сосна»), «Къач» («Осень») и др.

Исследователь творчества поэта З. Биджиева отмечает: «Имя Асхата Басиятовича ассоциируется со становлением всеобщего образования как в Карачае, так и на всем Северном Кавказе. Будучи главным редактором Северо-Кавказской секции Центрального издательства народов СССР в Москве, он принимал активное участие в издании книг на всех языках народов Северного Кавказа. Это был огромный труд в реализации правительственных программ по ликвидации безграмотности» [2, с. 40–41].

В 1929 г. поэт публикует на русском языке обличительное стихотворение «Плачет лес (к хищническому истреблению лесов)». Стихотворение выразительно палитрой интонационных оттенков: ноты сострадания перемежаются с обличительной характеристикой палачей, спорадически напоминая лермонтовское «Смерть поэта», но без автологического гневно-декламационного пафоса последнего, и сцены рубки леса в стихотворении Николая Некрасова «Саша» («Много тут было печальных картин: / Стоном стонали верхушки осин, / Из перерубленной старой березы / Градом лилися прощальные слезы») [3].

Над лесом факел смерти, догорая,
Трепещет, выбившись из сил,
И плачет лес, и стонет, умирая,
И смертный час его пробил.
Он плачет, гордой головой качая,
Перед убийцею-врагом;
Тот враг – свирепая злоба людская,
Вооружился мечом,
Разбил тебя тяжелою рукою,
А ты, сраженный топором,
Упал пред нею гривою густою,
У ног ее ты бьешь челом!
Смирись, судьбы печальное решенье! [4, с. 115].

Произведение А. Биджиева является прямым императивом, предупреждением о том, что сохранение лесов, красоты и богатств природы – святой долг человечества.

Критиками и литературоведами особо отмечено и его стихотворение «Басхыч» («Лестница»). В нем четко проявлено просветительское начало. Автор преподает уроки жизни на примере лестницы, актуализируя традиционно назидательное слово (*насийхат сез*):

Къабыргъада тураед
Басхыч ёрге таяныб,
Башха аягъы махтанныганд
Тюб аякъгъа айланыб.
«Кенглигибиз бир ючюн,
Сенден ёрге минибме,
Кёремисе мен сенден
Нечик башма, мийикме».
Ол махтана тургъанлай,
Бир джолоучу баргъанды,
Анга ачыугъа, баш джанын
Тюб джанына бургъанды.
Махтаныргъа керек тюлдю,
Не аламат болсанг да,
Уллу кёллю сёлешме,
Не мийикде турсанг да.

К стене прислоненная
Лестница стояла,
Ножка верхняя бахвалится,
Обращаясь к нижней:
«Вширь мы одинаковы,
Взобралась я выше,
Ты заметь,
Я голова, и, конечно, выше».
К хвастуну эдакому
Путник вдруг подходит,
Вмиг хватает лестницу,
Ставит вверх тормашками.
Хвастаться не надобно,
Каким хорошим бы ни был,
Не говори высокомерно,
На какой бы высоте ни находился [4, с. 154]. (*Подстр. пер.)*

Поэзия А. Биджиева преломляет в своем первоистоке многообразие жизненных перипетий, людских судеб; есть стихи, созданные в формате загадки: «Какое это время? / Плоды на деревьях созреют, / А как подует ветерок, / На землю падают они. / Пшеница колосится / На широкой ниве, / Словно волны морские» [4, с. 153], в афористической (либо паремиологической) форме: «Иги къойчу чабырын / Тюз тешгенлей тындырыр. / Аман къойчу къойларын / Джаллылагъа къырдырыр» [5, с. 17] – «Хороший чабан [дела свои по кошу] справит, снявши чабуры. / Плохого чабана овцы / Хищниками задраны будут» (подстр. пер.).

Великолепно владеющий русским языком, молодой и талантливый А. Биджиев большое внимание уделяет переводам. В 1928 году он переводит с русского языка на карачаево-балкарский шесть из тридцати пяти глав поэмы М. Ю. Лермонтова «Демон». По воспоминаниям современников, благодарные читатели неоднократно обращались к поэту с просьбой перевести и оставшиеся главы поэмы. Увы, в силу занятости писать чаще не удавалось, и этот факт удручал его. Осознание необходимости продолжать литературную деятельность, которой он был предан, и святой долг врача терзали его сердце; на чаше весов – два любимых занятия, совмещение которых практически невозможно – слишком большие объемы работ, слишком много тех, кто связывает с ним надежду на исцеление.

В 1935 году он переводит «Песню о Соколе» и «Песню о Буревестнике» М. Горького на карачаево-балкарский язык (впервые опубликованы в газете «Къызыл Къарачай», 21 ок-

тября, 7 ноября); в 1937-м – «Гробовщик», «Конь», «Капитанская дочка» А.С. Пушкина, басни И. А. Крылова «Лебедь, щука и рак», «Ворона и лисица».

Не умаляя сделанного в жанрах художественной литературы, мы объективно понимаем, что призвание Асхата Биджиева связано во многом с переводами. В начале XX столетия в горных селениях процент людей, знавших русскую грамоту, посредством которой осуществлялся выход к произведениям мировой классики, был невелик. Точные высокохудожественные переводы А. Биджиева не только способствовали знакомству с русской и шедеврами мировой литературой, они стали достоянием карачаевского народа, частью его культурного наследия.

Портрет Биджиева-переводчика, а также человека широкой эрудиции и культуры, врача от бога представлен в книге мемуаров А. Урусовой «Ёмюр танышланы сагъыныу» («Воспоминания о современниках») [6]: «…Когда Асхат (Асхат Биджиев. – *Ф.У.*) стал работать в областной больнице, мы виделись с ним почти ежедневно... Зять наш хирург Баскаев работал с Асхатом, бывал вместе с ним у моих родителей и у меня. Особенно привлекала Асхата возможность послушать народные песни в исполнении Исхака (Исхак Урусов, основоположник карачаевской музыкальной фольклористики. – *Ф.У.*), замечательно игравшего на всех инструментах (мандолине, скрипке, пианино и других). К тому же в тот период часто собирались у меня по выходным наши литераторы, чтобы обменяться мнениями о рукописях или публикациях, читали стихи, полемизировали и т.п. Часто посещавшие в такие дни Кипкеев Мухаммат, Уртенов Азрет, Байкулов Дауд, Бостанов Хасан, Урусов Махамет, Урусов Юнус и другие разом поднимались, когда неожиданно заявлялся Асхат. Приход его вносил ощутимое тепло в наш круг. Интеллектуальное превосходство было заметно, это чувствовали все.

…В те годы в свободные от работы дни работники активно общались: собирались послушать песню, пошутить, подкрепиться здоровым смехом, а то и поделиться своими мыслями. Это не требовало особенных физических и материальных затрат. Все было проще: хычины, айран, самовар и локумы к чаю. Так было и у моего отца, где частенько сиживали Акбаев Исмаил, Текеев Рамазан, Курджиев Курман, Кубанов Ахмат, Байкулов Исмаил и другие, их тоже тянуло к молодым, но не умещались, и без того было тесно у нас. Как-то читали по жеребьевке. Читать «Демона» на карачаевском языке (в переводе А. Биджиева. – *Ф.У.*) выпало К. Курджиеву (один из ответственных работников Карачаевской области в 20-е годы, председатель Карачаевского облисполкома. – *Ф.У.*). Знаток родного языка, он, однако, почувствовал затруднение в уже отошедшей латинской графике. И ему по предложению Асхата протянули русский текст «Демона». Курман закрутил свои пышные усы, окинул всех взором и начал читать с жаром души. Мы все слушали стоя и испытывали большое удовольствие. Когда он закончил, все бурно зааплодировали. Асхат же подошел к Курману и обнял.

…В последние годы (1936–1937 гг.) Асхат становился все более задумчивым, подвергал анализу прожитые годы, реже стал встречаться и с молодыми творческими работниками. Желание служить музе, стремление творить и на карачаевском и на русском языках в нем возникли с раннего возраста. В нем было два начала: большой талант, тонко понимающий красоту языка, способный создать запоминающиеся образы, и человек с чувствительными руками и добрым сердцем, жаждавшим служить медицине. Он старался совместить литературное творчество с работой хирурга. Жизнь распорядилась по-своему. Влюбленный в медицину, все больше и больше уходил в нее, производя все больше и больше сложных хирургических операций…

…Ну, а как с музой, служить которой он желал всем сердцем? Асхат, прожив тридцать пять лет, оглянулся назад и не заметил, скольким сохранил жизнь, как много людей он спас от неминуемой гибели. Он увидел лишь скромность своего литературного творчества и оторопел: «Успею ли теперь создать более значительное?» Профессия хирурга, преждевременно старящая человека, не пощадила и его, он выглядел старше своих лет. Целеустремленный, полный творческих замыслов, казалось, решался многое сделать, но на смену вдохновению приходила неуверенность, которую он старался изгнать. Он намерен

был перейти к поэме и прозе. Особенно большие надежды возлагал на последнюю. В такой период раздумий были осуществлены им переводы «Буревестника» и «Песни о соколе». «Буревестник» был прочитан им самим у меня дома в присутствии Аппаева Хасана, Кипкеева Мухаммата, Урусова Махамета и Уртенова Азрета. Перевод «Буревестника» я тогда же взяла у Асхата и отдала в печать. Он был опубликован седьмого ноября 1936 г. Чтобы суметь переводить, как он, надо было обладать его кругозором, его мастерством стихосложения. Асхат ценил в романе Аппаева «Черный сундук» более всего его язык. В те годы особенно нужно было акцентировать внимание на идейной наполненности романа. Однако, отдавая должное и идейной насыщенности романа, автор этих строк и Ислам Карачайлы исключительную ценность труда Аппаева, как и Асхат, видели в его языке» [6, с. 35–36, 45–46].

Произведения самого поэта переведены на русский язык известным поэтом-песенником Осипом Колычевым (настоящее имя Иосиф Сиркес). В их числе «Къыш» («Зима»), «Сюрюучюле» («Пастухи»), «Белляу» («Колыбельная песня»). Мастерство переводчика позволило максимально передать национальную самобытность, авторскую позицию, языковое богатство.

В 1963 году избранные стихотворения, рассказы, переводы А. Биджиева вышли одной книгой на русском и карачаево-балкарском языках «Сайланнганлары. Назмула. Кёчюрюлген хапарла бла назмула» (Избранное. Стихи. Переводы) [5]. Сила и мощь эстетического слова ощутимы в строках:

Тау артындан джылтыраб,
Кюн башлагъа тийгенди.
Кьарлы тау да башына
Алтын джабыу кийгенди… [5, с. 10]

Солнце, сияя из-за гор,
Солнечных вершин коснулось.
Заснеженная гора на голову
Накинула золотое покрывало.
Кюн («Солнце»). (Подстр. пер.)

Исследование устойчивых концептуальных образов национальных художественных текстов (в вышеприведенной строфе: «къарлы тау» («заснеженная гора»), «кюн» («солнце») свидетельствует: таковые существуют в границах сложившейся традиционной архитектуры и, как правило, отмечены высокой достоверностью и суггестивным потенциалом в силу длительного оборота в коллективном сознании.

Таким образом, становится очевидным, что для решения проблемы осмысления фундаментальных закономерностей литературного процесса, вопросов, связанных со спецификой той или иной субкультуры, репрезентацией представлений о «человеке в социуме», «формированием художественно-эстетического мышления, адаптированного к современности и в то же время сохраняющего этноидентификационные признаки, целесообразным представляется рассмотрение феномена авторской личности с позиции объективного внедрения в сюжетную ткань произведения фактов, обладающих необходимым информационным ресурсом» [7, с. 261]. В этом смысле многоплановое творчество одного из пассионариев, первых деятелей культуры Карачая А. Биджиева весьма показательно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Караева А. И.* Очерк истории карачаевской литературы. Москва: Наука, 1966. 320 с.

2. *Биджиева З. С.-М.* Слово о первом поэте (о творчестве Асхата Биджиева) // Национальные литературы и национальное литературоведение. Сто лет пути: материалы Всероссийской научной конференции. Карачаевск: КЧГУ, 2017. С. 40–44.

3. *Некрасов Н.* Саша. https://www.culture.ru/poems/39600/sasha (дата обращения: 16 ноября 2023).

4. *Каракетов Исса, Биджиев Асхат.* Эркинликни саугъасы (Подарок свободы). Ставрополь: Карачаево-Черкесское отделение, 1980. 224 с.

5. *Биджиланы А.* Сайланнганлары. Назмула. Кёчюрюлген хапарла бла назмула. (Избранное. Стихи. Переводы). Черкесск: Карачай-Черкес. издательство, 1963. 110 б.

6. *Узденова Ф. Т.* Мемуарные практики в художественном тексте (на примере творчества А. Урусовой) // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 6(104). С. 260–267. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-260-267

7. *Орусланы А.* Ёмюр танышланы сагъыныу (Воспоминания о современниках). На карач. яз. Черкесск: Карачаево-Черкесское отделение Ставропольского кн. изд-ва, 1975. 128 с.

REFERENCES

1. Karayeva A.I. *Ocherk istorii karachayevskoy literatury* [Essay on the history of Karachay literature]. Moscow: Nauka, 1966. 320 p. (In Russian)

2. Bidzhiyeva Z.S.-M. *Slovo o pervom poete (o tvorchestve Askhata Bidzhiyeva)* [A word about the first poet (about the work of Askhat Bidzhiev)]. *Natsional'nyye literatury i natsional'noye literaturovedeniye. Sto let puti: mat-ly vserossiyskoy nauch. konf.* [National literatures and national literary studies. A hundred years of journey: materials of the All-Russian scientific conference]. Karachayevsk: KCHGU, 2017. P. 40–44. (In Russian)

3. Nekrasov N. Sasha. https://www.culture.ru/poems/39600/sasha (accessed November 16, 2023).

4. Karaketov I., Bidzhiyev A. *Podarok svobody* [Gift of freedom]. Stavropol: Karachaevo-CHerkesskoe otdelenie, 1980. 224 p. (In Russian, In Karachay-Balkarian)

5. Bidzhilany A. *Izbrannoye. Stikhi. Perevod* [Favourites. Poems. Translations]. Cherkessk: Karachaj-Cherkes. izdatel'stvo, 1963. 110 p. (In Karachay-Balkarian)

6. Uzdenova F.T. Memoir practices in artistic text (on the example of the works of A. Urusova). *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2021. № 6(104). P. 260–267. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-260-267. (In Russian)

7. Oruslany A. *Vospominaniya o sovremennikakh* [Memories of contemporaries]. Cherkessk: Karachaevo-Cherkesskoe otdelenie Stavropol'skogo kn. izd-va, 1975. 128 p. (In Karachay-Balkarian)

Информация об авторе

Узденова Фатима Таулановна, д-р филол. наук, вед. науч. сотр., Институт гуманитарных исследований – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Пушкина, 18;

uzdenova_kbigi@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-9514

Information about the author

Uzdenova Fatima Taulanovna, Doctor of Philological Sciences, Leading Researcher, Institute of Humanitarian Researches – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 18 Pushkin street;

uzdenova_kbigi@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5378-9514

КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛИНГВИСТИКА

УДК 004.89
DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-391-399
EDN: QKJSEE

Научная статья

Теории воплощенного познания в задаче формальной репрезентации семантики на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур

Д. Г. Макоева, К. Ф. Край, А. З. Энес

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

Аннотация. Сегодня, когда нас окружают устройства с элементами искусственного интеллекта, очевидно, что удобнее всего ими пользоваться посредством естественно-языковой коммуникации. Для достижения такого уровня общения интеллектуальные системы должны уметь понимать язык на семантическом уровне. Формальное представление семантики на протяжении десятилетий было препятствием на пути развития систем понимания речи. В этой статье мы представляем краткий обзор теорий воплощенного познания, которые, как мы полагаем, дают достоверное объяснение того, каким образом семантическое значение находит свое отображение в нашем мозге, а мультиагентные системы могут стать надежным инструментом для моделирования этих процессов.

Ключевые слова: мультиагентные системы, нейрокогнитивные архитектуры, воплощенное/телесное познание, формальная семантика, репрезентация значения, сенсомоторный опыт

Поступила 15.11.2023, одобрена после рецензирования 23.11.2023, принята к публикации 02.12.2023

Для цитирования. Макоева Д. Г., Край К. Ф., Энес А. З. Теории воплощенного познания в задаче формальной репрезентации семантики на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 391–399. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-391-399

Original article

Theories of embodied cognition in the task of formal representation of semantics based on the multiagent neurocognitive architectures

D.G. Makoeva, K.F. Krai, A.Z. Enes

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. Today being surrounded by devices with artificial intelligence, it is obvious that natural language is the most convenient way to use them. To achieve this level of communication, intelligent systems have to understand language at semantic level. Formal representation of semantics has been an obstacle to the development of speech understanding systems for decades. In this article, we present a brief overview of theories of embodied cognition that we argue provide a plausible explanation of how semantic meaning is mapped into our brains, and multi-agent systems can provide a reliable tool for modeling these processes.

© Макоева Д. Г., Край К. Ф., Энес А. З., 2023

Keywords: multi-agent systems, neurocognitive architectures, grounded/embodied cognition, formal semantics, meaning representation, sensori-motor experience

Submitted 15.11.2023, approved after reviewing 23.11.2023, accepted for publication 02.12.2023

For citation. Makoeva D.G., Krai K.F., Enes A.Z. Theories of embodied cognition in the task of formal representation of semantics based on the multiagent neurocognitive architectures. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2023. No. 6(116). Pp. 391–399. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-391-399

Введение

Сложно себе представить взаимодействие с миром без помощи языка. Язык дает нам возможность обличать наши мысли в слова и делиться ими с другими, насколько бы замысловатыми и неоднозначными они ни были. Кодирование и передача информации восходят к двум важнейшим функциям языка: символической и интерактивной [1].

Символическая функция языка отвечает за передачу наших мыслей посредством символов (знаков). Под символами понимаются значимые единицы языка (морфемы, слова, предложения). Символы имеют план выражения, т.е. могут быть представлены в письменной, устной и знаковой форме, и план содержания, непосредственное значение, между которыми установлены конвенциональные отношения [2].

Интерактивная функция языка обслуживает наше взаимодействие с обществом, позволяя нам сообщать и получать информацию. Данная функция тесно связана с таким явлением, как концептуализация, суть которой сводится к выделению набора признаков чего-либо в реальном или воображаемом мире. Этот фрагмент знаний, базовая единица мыслительного процесса, хранящаяся у нас в мозге, о некотором явлений/предмете/объекте и т.д. мира в парадигме когнитивной лингвистики принято называть концептом. Соответственно, получение новых знаний о мире влечет за собой формирование новых концептов, что и называется концептуализацией [2].

Объект исследования работы – применение методов теории телесного познания и методов обучения агентов в нейрокогнитивной архитектуре.

Предмет исследования – использование экспериментального роботизированного стенда для отработки процесса концептуализации на основе мультиагентного подхода.

Цель работы – разработка основных принципов концептуализации семантического значения знака/символа в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре.

1. Краткий обзор теорий воплощенного (телесного) познания

Мощный когнитивный навык, отличающий людей от большинства других разумных существ, – это способность пользоваться символами и образно-символическим мышлением (symbolic thought) в целом, дающим нам возможность вспоминать прошлое и предполагать будущее, другими словами, перемещать нас из текущей ситуации в воображаемую [3, 4]. Под символами понимаются произвольные токены, наделенные определенным семантическим значением и подчиняющиеся определенным комбинаторным правилам. Наиболее значимая и доступная для нас символьная система – это естественный язык, другими примерами могут служить математическая нотация, языки программирования, формальная логика и т.д. Предполагается, что в человеческом мозге слова представляются как концепты, реализованные в виде «ментальных символов» или «символических репрезентаций», которые принимают участие в различных символических операциях [4, 5].

С конца XX века ведутся споры о природе и формате символьной репрезентации в человеческом мозге [6–8]. Во многих классических теориях предполагается, что концепты представлены в произвольном амодальным виде [7, 9–12]. Амодальность означает несвязанность с сенсорной и моторной информацией, т.е. постулируется произвольность связи между концептами и теми объектами реального мира, к которым они отсылают. В качестве примера в работе [13]

приводится анализ слова «лошадь», сама эта лексическая единица не имеет ничего общего ни с одной реальной лошадью, это подтверждается тем фактом, что в разных языках для обозначения того же самого объекта используются разные слова: «pferd» в немецком, «horse» в английском и т.д. Теперь рассмотрим концепт/ментальный символ ЛОШАДЬ. Следует помнить, что концепт – это единица мышления, а не объект в окружающей среде, поэтому в рамках теорий воплощенного познания принято считать, что концепты абстрактны [7].

Существует ряд смежных теорий, в рамках которых концепты также рассматриваются как абстрактные, амодальные символы. К ним можно отнести модели семантических сетей (semantic network models) [10, 11, 14], распределенные модели семантики (distributional models of semantics) [12, 15], подходы к семантике, основанные на выделении признаков (feature-based approaches to semantics) [16, 17].

Рассмотрим пример с концептом ЛОШАДЬ посредством выделения семантических признаков (feature-based approaches to semantics) через следующие пропозиции: ЯВЛЯТЬСЯ (ЛОШАДЬ, МЛЕКОПИТАЮЩЕЕ), ОБЛАДАТЬ (ЛОШАДЬ, ГРИВА) и ЕСТЬ (ЛОШАДЬ, СЕНО). Стоит отметить, что в парадигме всех вышеперечисленных теорий концепты обычно определяются через другие концепты, с которыми они связаны. Такой подход к репрезентации концептов имеет ряд недостатков. Одним из аргументов, часто приводимых не в пользу предположения о том, что ментальные символы представлены в виде амодальных и абстрактных единиц, – это известная проблема обоснования символов (symbol grounding problem), которая часто иллюстрируется примером с толковым словарем китайского языка (Chinese-Chinese dictionary argument), описанным в работе [3], который в свою очередь создан на основе мыслительного эксперимента «китайская комната» (Chinese room), описанного Джоном Серлом в 1980 г. [18]. Пример со словарем – это мыслительный эксперимент, в котором ученику необходимо выучить китайский, используя только монолингвальный словарь китайского языка. Когда у ученика возникает необходимость найти значение одного конкретного символа, он открывает словарь и находит словарную статью, где искомый символ описывается другими неизвестными ему символами, которые также описаны другими неизвестными символами и т.д. В итоге вместо того, чтобы найти хоть одно значение в словаре, ученик получает бесконечную регрессию.

Из вышесказанного можно заключить, что символы должны быть обоснованы таким образом, чтобы иметь некое семантическое значение. Одним из подходов к решению проблемы обоснования символов в когнитивной психологии является воплощенность (телесность) (embodiment), т.е. воплощенное (телесное) познание (grounded/embodied cognition). Данный подход выдвигает на первый план необходимость обоснования символов посредством сенсомоторного опыта [6, 19]. Основное предположение состоит в том, что высокоуровневые когнитивные системы, такие как язык и концептуализация окружающего мира, не могут быть независимыми от восприятия и движения, поэтому они априори не могут быть абстрактными и амодальными. Более того, они используют те же способы репрезентации и задействуют те же когнитивные системы. В парадигме теорий воплощенности (embodiment) понимание речи – это процесс моделирования содержания входного языкового сигнала посредством тех же систем, которые задействуются для восприятия, действий и эмоций [6, 20]. Другими словами, в рамках данной теории концепт ЛОШАДЬ не имеет сходства ни с одним реальным животным, так как концепт – это мыслительная единица, а лошади – это животные, однако этот концепт имеет сходства с *опытом*, который у нас может быть с этими животными, т.е. наш опыт и наша ментальная репрезентация представлены в одном и том же формате в одних и тех же системах. Согласно этой теории если мы услышали или подумали о лошади, это активирует те же системы (отделы мозга), как если бы мы ее увидели, услышали ее ржание и прикоснулись бы к ней [13].

С целью дать ответ на вопрос: каким образом создаются такие воплощенные репрезентации концептов, в [21] предложили модель эмпирических следов (experiential trace model) воплощен-

ности освоения и понимания языка. Данная модель постулирует, что освоение языка происходит посредством совместного появления (co-occurrence) перцептивного сигнала и действия, с одной стороны, и языкового сообщения – с другой [22]. Когда мы смотрим на бегущую лошадь и в этот момент слышим слово «лошадь», у нас устанавливается ассоциация между визуальным опытом наблюдения за лошадью и аудиальным опытом восприятия единицы естественного языка «лошадь». В следующий раз, когда мы услышим слово «лошадь» в другой ситуации, созданная ассоциация даст сигнал для (частичной) реактивации пережитого ранее опыта. Именно активация перцептивного сигнала и действия дают нам возможность понимать соответствующий концепт, давая ему обоснование через сенсорно-моторный опыт [13]. Эмпирические подтверждения вышесказанному можно найти в работе [23].

Стоит отметить, что в рамках теории воплощенности познания существует два взгляда на степень «воплощенности». В ряде работ [6, 21] утверждается, что *все* знания имеют в своей основе перцептивные, моторные и/или эмоциональные процессы, другими словами, все ментальные репрезентации основаны на опыте, и по этой причине все ментальные символы должны быть эмпирически обоснованными. А. М. Гленберг в [6] сформулировал это следующим образом: в абстрактных символах нет необходимости, т.к. воплощенные модели семантики могут описать все вокруг нас.

В противовес этому взгляду в работе [13] приводится контраргумент, заключающийся в следующем: представим человека, который никогда не видел и не имел опыта с акулами, однако из книг и историй других людей он знает об их существовании. Не имев возможности видеть акул, т.е. не имев никакого перцептивного опыта с ними, этот человек все же понимает из своего опыта и знаний о мире, что акулы пребывают в вертикальном положении и живут в воде. Все эти сведения были получены из языковых источников информации, а не сенсомоторных.

Рассмотрим пример с толковым словарем китайского языка еще раз, но теперь представим, что словарь снабжен небольшой главой, содержащей переводы значений самых распространенных символов на родной язык ученика. В этом случае ученик будет иметь возможность выяснить значения более сложных символов, имея при себе перевод базовых. На основе этого можно заключить, что нет необходимости в непосредственном обосновании всех символов, достаточно обосновать определенный набор символов, а семантику остальных выводить по ассоциации и совпадениям [3].

В работе [3] автор утверждает, что система ментальных символов имеет гибридный характер, т.е. некоторые элементарные символы имеют несимвольный характер репрезентации. В качестве доказательства автор приводит следующий пример: предположим, что нам известны такие слова, как «лошадь» и «полосы», т.е. эти символы получили свое обоснование у нас в мозге. Таким образом, мы можем легко понять значение слова «зебра» как «лошадь с полосами». Другими словами, символ «зебра» наследует свое значение от «лошадь» и «полосы», т.е. человек, который никогда не видел зебру и не имеет сенсомоторного опыта с ней, сможет легко ее распознать при первой встрече, несмотря на то, что он имел до этого только лингвистический, т.е. символьный опыт взаимодействия с данным объектом.

Теории воплощенного (телесного) познания (embodied cognition) предполагают, что концепты получают свое обоснование посредством не только лингвистического, но и сенсомоторного опыта. С целью моделирования процесса концептуализации для задачи формальной репрезентации семантики естественного языка нами создана программная имитационная модель, представляющая собой мультиагентную нейрокогнитивную архитектуру. В работе [24] выдвигается гипотеза, что мультиагентная нейрокогнитивная архитектура – это формализм, применение которого в качестве основы системы искусственного интеллекта позволит смоделировать вышеупомянутые процессы, имеющие место в мозге человека при обосновании символов. Данная гипотеза основывается на предположении о функциональном и структурном сходстве мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры с головным мозгом человека [25, 26]. Применение данного подхода позволит погрузить интеллектуального агента в реальную среду с целью имитации процесса освоения естественного языка.

2. Программная реализация

Если следовать теории построения семантики естественного языка на основе телесного опыта, то интеллектуальный агент должен иметь возможность взаимодействовать с окружающим миром для получения телесного и перцептивного опыта. Для этих целей лучше всего подходят роботы [27], погруженные в реальную среду посредством системы сенсоров и актуаторов. Роботы имеют возможность обосновать символы естественного языка в процессе его освоения в коммуникативных ситуациях при взаимодействии с людьми, которые «общаются» с ним на языке с упрощенной грамматикой. Общение происходит пересылкой сообщений посредством дисплея и клавиатуры через чат системы (рис. 1).

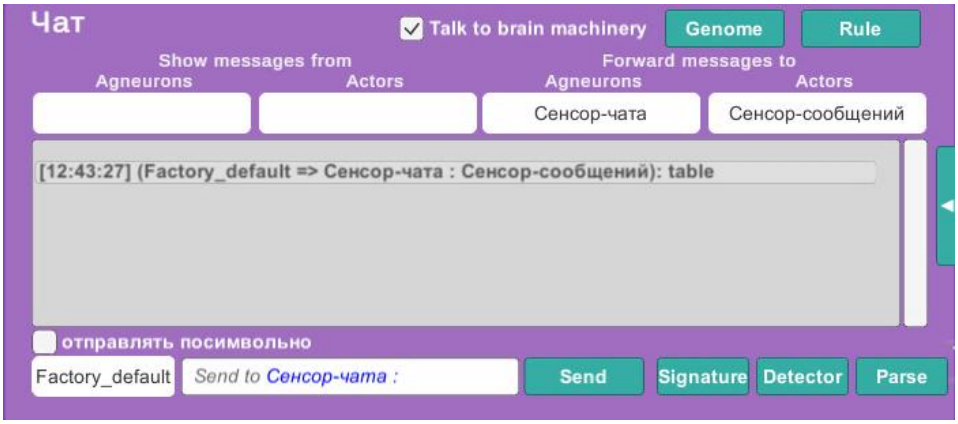
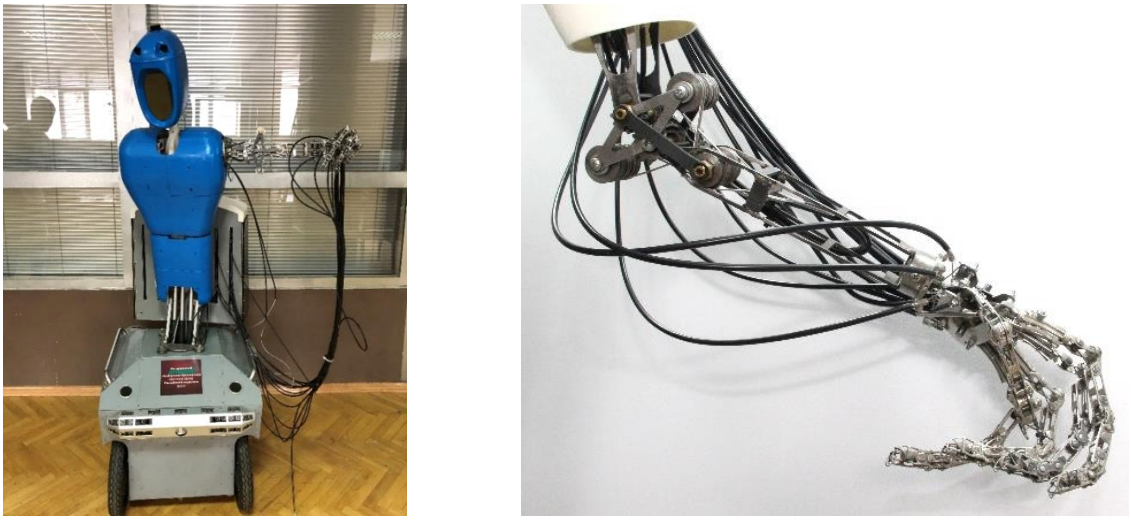


Рис. 1. *Чат системы*

Fig. 1. *System chat*

На следующей картинке представлен экспериментальный стенд (рис. 2а) для отработки систем нейрокогнитивного управления многозвенным манипулятором (рис. 2б), используемый для получения опыта взаимодействия с окружающим миром. В манипулятор робота вложили яблоко. Используя сенсоры, установленные в «руке», робот получает сигналы о том, что почувствовал что-то твердое, гладкое и круглое. Камеры, встроенные в «голову» робота, посредством системы распознавания образов фиксируют его цвет, размер и форму.



а) б)

Рис. 2. а) *экспериментальный стенд для отработки систем нейрокогнитивного управления многозвенным манипулятором;* ***б)*** *манипулятор*

Fig. 2. a) *experimental stand for testing neurocognitive control systems for a multi-link manipulator;* ***b)*** *manipulator*

Данные с сенсоров попадают в «мозг» робота, в мультиагентную нейрокогнитивную архитектуру, где под каждый входной сигнал создаются нейронные ансамбли, которые в дальнейшем соединяются между собой как сигналы, которые были получены вместе. Сигналы с двигательной системы, манипулятора и результаты процесса распознавания образов объединяются в один нейронный ансамбль, группу нейронов. Таким образом в «мозге» робота появится нейронное представительство, отвечающее за внешний вид и текстуру яблока. Далее необходимо дать новому объекту реального мира название. Для этого появившиеся агенты, следуя правилам в своих базах данных, при условии, что подобный объект попадается в первый раз, зададут пользователю вопрос: «Что это?». Ответ пользователя также отправится в систему через чат: «Яблоко». Данная символьная строка будет обработана мультиагентной системой посимвольно, т.е. на каждый символ будет сгенерирован отдельный нейрон типа символ (рис. 3).

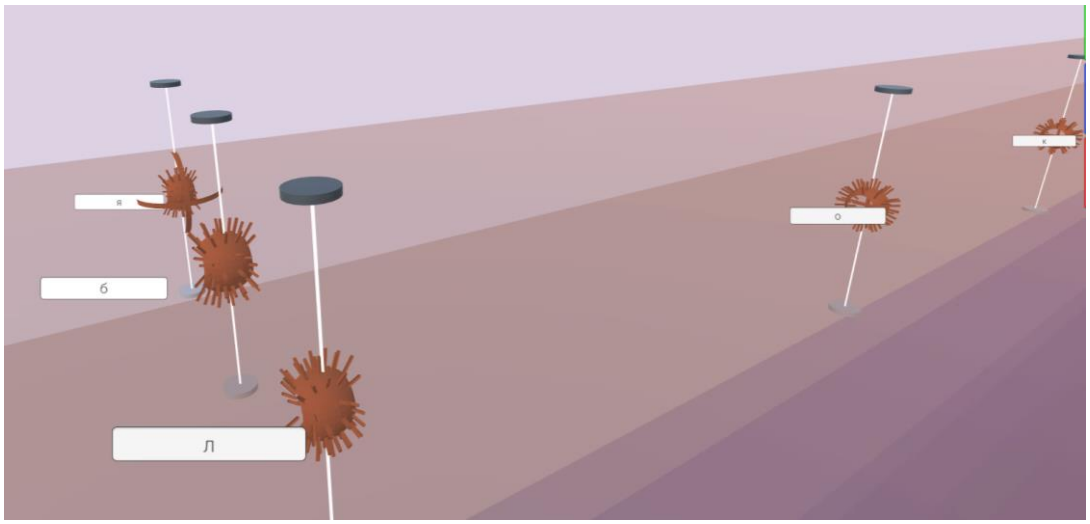


Рис. 3. *Символьные агенты*

Fig. 3. *Symbolic agents*

Далее эти нейроны, следуя своей внутренней логике выживания, создадут агента-нейрона более высокого уровня – слово с соответствующим названием: «Яблоко» (рис. 4).

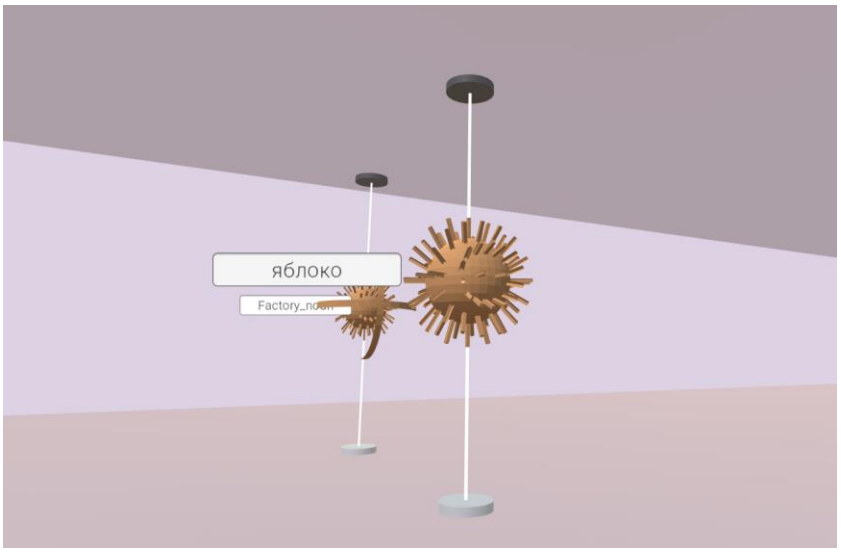


Рис. 4. *Агент слово*

Fig. 4. *Word agent*

Таким образом нейроны в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре принимают участие в функциональной репрезентации понятия «яблоко». Из этого можно заключить, что концептуализация понятий – это мультиагентный процесс, в котором задействованы различные агнейроны, взаимодействующие друг с другом с помощью мультиагентных контрактов. Эти нейроны относятся к разным типам, и, соответственно, входным сигналом для них является информация разного вида: моторная, визуальная, естественно-языковая и т.д.

Заключение

Все агенты, возникшие в ходе некого сенсомоторного и языкового опыта интеллектуального агента, связаны друг с другом таким образом, что могут запрашивать и предоставлять информацию об изученном объекте. Из этого следует, что формальная концептуальная репрезентация понятия «яблоко» будет состоять из его внешнего описания (формы, цвета и т. д.), способа физического взаимодействия (например, держать в «руке») и его названия.

В этой статье мы проиллюстрировали упрощенный способ формального представления семантики отдельного слова, применяя инструментарии теорий воплощенного познания. Мы предполагаем, что использование мультиагентных систем в сочетании с имитационным моделированием может стать эффективным инструментом решения задач обоснования символов и концептуализации в целом. Более того, имитационное моделирование даст нам возможность отслеживать процесс концептуализации, происходящий в интеллектуальной системе.

REFERENCES

1. Evans V., Green M. Cognitive Linguistics. Edinburgh: Edinburgh University Press, 2006. 857 p.

2. Langacker R. Foundations of Cognitive Grammar. Vol. 1. Stanford: CA: Stanford University Press, 1987. 540 p.

3. Harnad S. The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1990. No. 42. Pp. 335–346. DOI: 10.1016/0167-2789(90)90087-6

4. Hummel J.E. Symbolic versus associative learning. *Cognitive Science*. 2010. No. 34. Pp. 958–965.

5. Murphy G.L. The big book of concepts. MA: MIT Press, 2002. 568 p.

6. Glenberg A.M. Few believe the world is flat: How embodiment is changing the scientific understanding of cognition. *Canadian Journal of Experimental Psychology*. 2015. No. 69. Pp. 165–171. DOI: 10.3758/BF03196313

7. Mahon B.Z. The burden of embodied cognition. *Canadian Journal of Experimental Psychology*. 2015. No. 69. Pp. 172–178.

8. Masson M.E.J. Toward a deeper understanding of embodiment. *Canadian Journal of Experimental Psychology*. 2015. No. 69. Pp. 159–164. DOI: 10.1037/cep0000055

9. Anderson J.R. The architecture of cognition. MA: Harvard University Press, 1983. 360 p.

10. Collins A.M., Quillian M.R. Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*. 1969. Vol. 8. Pp. 240–147. DOI: 10.1016/S0022-5371(69)80069-1

11. Kintsch W. The role of knowledge in discourse processing: A construction-integration model. *Psychological Review*. 1988. Vol. 95. Pp. 163–182. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)61551-4

12. Landauer T.K., Dumais S.T. A solution to Plato's problem: The Latent Semantic Analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge. *Psychological Review*. 1997. Vol. 104. Pp. 211–240. DOI: 10.1037/0033-295X.104.2.211

13. Fritz G., Dudschig C., Kaup B. Symbol Grounding Without Direct Experience: Do Words Inherit Sensorimotor Activation From Purely Linguistic Context? *Cognitive Science*. 2018. No. 42(2). Pp. 336–374. DOI: 10.1111/cogs.12549

14. Quillian M.R. Word concepts: A theory and simulation of some basic semantic capabilities. *Behavioral Science*. 1967. No. 12. Pp. 410–430. DOI: 10.1002/bs.3830120511

15. Lund K., Burgess C. Producing high-dimensional semantic spaces from lexical co-occurrence. *Behavior Research Methods, Instrumentation, and Computers*. 1996. No. 28. Pp. 201–208. DOI: 10.3758/BF03204766

16. McRae K., Cree G. S., Seidenberg M. S., McNorgan C. Semantic feature production norms for a large set of living and nonliving things. *Behavior Research Methods*. 2005. No. 37. Pp. 547–559. DOI: 10.3758/BF03192726

17. Smith E.E., Medin D.L. The classical view. *Categories and concepts*. 1981. Pp. 22–60.

18. Searle J.R. Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*. 1980. No. 3. Pp. 417–424. DOI: 10.1017/S0140525X00005756

19. Barsalou L.W. Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*. 1999. Vol. 22. Pp. 637–660. DOI: 10.1017/S0140525X99002149

20. Johnson-Laird P.N. Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness. *Language*. 1983. Pp. 897–903. DOI: 10.2307/414498

21. Zwaan R.A., Madden C.J. Embodied sentence comprehension. *Grounding cognition: The role of action and perception in memory, language, and thinking*. 2005. Pp. 224–245. DOI: 10.1017/CBO9780511499968.010

22. Hebb D. The organization of behavior. New York: Wiley, 1949. 378 p.

23. Lachmair M., Dudschig C., De Filippis M., de la Vega I., Kaup B. Root versus roof: Automatic activation of location information during word processing. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2011. No. 18. Pp. 1180–1188. DOI: 10.3758/s13423-011-0158-x

24. *Нагоев З. В., Нагоева О. В.* Обоснование символов и мультиагентные нейрокогнитивные модели семантики естественного языка. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2022. 150 с.

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)

25. *Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 232 с.

Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p. (In Russian)

26. *Нагоев З. В.* Онтонейроморфогенетическое моделирование // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 4(54). С. 46–56.

Nagoev Z.V. Ontoneuromorphological modelling. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 4(54). Pp. 46–56. (In Russian)

27. Vogt P. Language evolution and robotics: Issues on symbol grounding and language acquisition. *Artificial Cognition Systems*. 2006. Pp. 89–118.

Информация об авторах

Макоева Дана Гисовна, канд. филол. наук, зав. лабораторией «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

makoevadana@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5955-2262

Край Карина Фаезовна, мл. науч. сотр. отдела «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

kraykarina@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6927-7361

Энес Ахмед Зюльфикар, мл. науч. сотр. отдела «Компьютерная лингвистика», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

ahmedenes@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3633-4910

Information about the authors

Makoeva Dana Gisovna, Candidate of Philological Sciences, Head of the Laboratory of Computational Linguistics, 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;

makoevadana@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5955-2262

Krai Karina Faezovna, Junior Researcher of the Laboratory of Computational Linguistics, 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;

kraykarina@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6927-7361

Enes Akhmed Zyulfikar, Junior Researcher of the Laboratory of Computational Linguistics, 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;

ahmedenes@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3633-4910

ЮБИЛЯРЫ

Фатимат Асланбиевне Темботовой – 65 лет



Фатимат Асланбиевна Темботова – директор Института экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, академик Адыгской (Черкесской) международной АН, заслуженный деятель науки КБР, заслуженный эколог РФ.

Ф. А. Темботова – специалист в области систематики, эволюционной морфологии и экологии млекопитающих. Как лидер школы члена-корреспондента РАН А. К. Темботова «Биологический эффект взаимодействия факторов зональности на равнине и поясности в горах» Фатимат Асланбиевна консолидирует исследования специфики горных экосистем и их биотических компонентов. Она автор (и соавтор) 250 научных работ, из них 8 монографий.

Под научным руководством и при участии Ф. А. Темботовой в рамках основных направлений деятельности института доказано определяющее влияние высотно-поясной структуры горных экосистем на морфологическое, генетическое разнообразие и распределение в трехмерном пространстве животных Кавказа – ряда таксонов беспозвоночных (дождевых червей, прямокрылых) и позвоночных (млекопитающих, хищных птиц). Также впервые для Юга России исследуются наиболее уязвимые луговые и лесные экосистемы, охотничья фауна и почвы с использованием адаптированных к горам методов зондирования Земли из космоса; ведутся долгосрочный мониторинг популяций ресурсных видов животных и разработка научных основ их восстановления. Междисциплинарные исследования биоты горных территорий позволили за последние 5 лет подготовить обоснование для Программы по восстановлению аборигенного подвида кавказского благородного оленя для представления в МПР РФ; для реализации Программы в КБР создать питомник в Нальчикском государственном охотхозяйстве и сформировать размножающуюся группу кавказского оленя, а также наладить долгосрочный мониторинг копытных на Северном Кавказе (кормовая база в целях восстановления переднеазиатского леопарда).

Фатимат Асланбиевна вела курсы и спецкурсы в вузах Кавказа, в настоящее время – профессор Кабардино-Балкарского госуниверситета им. Х. М. Бербекова. Под ее руководством защищены 9 кандидатских диссертаций.

Ф. А. Темботова – член ВАК при Минобрнауки России, эксперт Российской академии наук, эксперт Федерального реестра экспертов научно-технической сферы, член редколлегий трех журналов из списка ВАК, организатор ряда международных конференций и редактор их материалов, член бюро Териологического общества при РАН, научного совета «Проблемы экологии биологических систем» РАН и др. На постоянной основе участвует в работе научно-консультационных советов и комиссий органов государственной власти КБР. Активно содействует популяризации науки и формированию экологически-ориентированного менталитета населения, является председателем межрегионального общественного движения «Экология ↔ жизнь».

Редколлегия журнала поздравляет Фатимат Асланбиевну с 65-летием и желает ей крепкого здоровья, благополучия и новых творческих успехов!

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 16 000 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 15.02.2023, п. 1163):

группа специальностей 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (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 окончательный макет направляется на корректуру. Окончательный вариант предоставляется автору на вычитку.

5. Полнотекстовые версии статей, публикуемых в журнале, размещаются в Интернете в свободном доступе на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Киберленинка. Статьи по математике, физике, информатике, математическому моделированию в экономике и по наукам о земле размещаются на сайте 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. Материалы предоставляются в редакционно-издательский отдел. 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 (специальность 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике); MSC2020 (по специальностям в области 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 – не более 150–250 слов, в ней четко должны отражаться новизна, актуальность и методика научного исследования;
- ключевые слова на русском и английском языках – не более 10–15 слов;
- основной текст статьи (примерная схема): введение, цели и задачи исследования, методы исследования, результаты исследования, выводы (заключение).

В аннотации и заключении не допускается использование громоздких формул, ссылок на текст работы или список литературы.

Сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, название подразделения, полное название места работы (может быть более одного), рабочий адрес, контактный телефон.

8. Список литературы должен содержать только те источники, на которые имеются ссылки в тексте работы, расположенные в порядке цитирования, и не более 20. 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 25 % от общего количества источников за последние 5 лет (как самого автора, так и сторонних авторов, работающих в данном направлении). 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. Том *. Город: Издательство, Год. … с.

• коллективная монография – Название книги / Фамилия И.О. автора; 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. Nazvanie stat'i [Title of article]. Zaglavie jurnala [Title of Journal]. Year. Vol. ... No. ...iss. … Pp. ...-… (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. Nazvanie [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. Nazvanie [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;

- статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 14, полуторный интервал;

- таблицы, алгоритмы, рисунки, схемы и т.п. должны быть выполнены в формате А4 книжной ориентации.

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 16000 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 February 15, 2023, p. 1163) :

group of specialties 2.3. Information technology and telecommunications:

2.3.1. System analysis, management and information processing (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 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.

5. Full-text versions of articles published in the journal are posted on the Internet in free access on the website of the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU. Articles on mathematics, physics, computer science, mathematical modeling in economics and geosciences are posted on the website 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. Materials are submitted to the Editorial and Publishing Department. 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); MSC2020 (for specialties in 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;**
- annotation in Russian and English – no more than 150–250 words; it should clearly reflect the novelty, relevance and methodology of scientific research;
- keywords in Russian and English – no more than 10–15 words;
- main text of the article (approximate scheme): introduction, goals and objectives of the research, research methods, research results, conclusions.

The annotation and conclusion should not contain cumbersome formulas, references to the text of the work or the list of references.

Information about the authors: 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.

8. The list of references should contain only those sources to which there are references in the text of the work, arranged in the order of citation, no more than 20 altogether. 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 25% 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). 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. volume *. City: Publisher, Year. … p.

• collective monograph – Title of the book / Surname and initials of the name and patronymic of the author; 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:

magazine article

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Nazvanie stat'i [Title of article]. Zaglavie jurnala [Title of Journal]. Year. Vol. ... No. ... issue. … Pp. ...-… (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. Nazvanie [Title of paper]. Nazvanie zhurnala [Title of journal], 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;
- tables, algorithms, figures, diagrams, etc. must be in A4 format, portrait orientation.

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

№ 6(116) 2023

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 18.12.2023 г. Дата выхода в свет: 26.12.2023 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 20.03.2003 г. в Министерстве 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
Подписной индекс 20145