

ISSN 2712-9942

АКАДЕМИК В. Б. БЕТЕЛИН

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2026
Т. 7 № 2

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

Том 7
№ 2

Vol. 7
No. 2

Москва

2026

Учредитель и издатель
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ)

«Успехи кибернетики» — это рецензируемый научный журнал, в котором публикуются научные статьи по следующим специальностям (физико-математические, технические науки):

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;
2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств;
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации.

Миссия журнала — развитие научных направлений по заявленной тематике в России и за рубежом, соответствующих приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации, а также перечню важнейших наукоемких технологий.

Журнал ориентирован на пропаганду передовых идей в области физики, математики, технических наук, участие в реализации задач Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, обеспечение печатными площадями высококвалифицированных кадров, повышение качества диссертационных исследований в данных отраслях путем развития механизма профессионального и общественного обсуждения их научных результатов, воспитание молодого поколения ученых.

Журнал принимает к публикации оригинальные статьи; переводы статей, опубликованных в зарубежных журналах (при согласии правообладателя на перевод и публикацию); обзоры; эссе; комментарии; другие информационные материалы.

Издание будет полезно ученым, работающим в соответствующих областях наук, а также аспирантам и студентам.

Главный редактор
Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Заместитель главного редактора
Галкин Валерий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, директор, Сургутский филиал НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Сургут
Члены редакционной коллегии
Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, вице-президент РАН, председатель Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России, вице-президент НИЦ «Курчатовский институт», заведующий кафедрой медицинской физики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
Власов Сергей Евгеньевич, д. т. н., заместитель директора по стратегическим инфокоммуникационным и квантовым технологиям, НИЦ «Курчатовский институт», Москва
Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, МСЦ — филиал НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Сойфер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований, Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С. П. Королева, Институт систем обработки изображений РАН, Самара
Чубариков Владимир Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой математических и компьютерных методов анализа, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, Московский институт электронной техники, Москва
Петров Игорь Борисович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой информатики, Московский физико-технический институт, Москва
Смирнов Николай Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заместитель декана механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, заместитель директора по стратегическим информационным технологиям, НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Тишкин Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры вычислительных методов, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
Губайдуллин Амир Анварович, д. ф.-м. н., профессор, директор, Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН, Тюмень
Якобовский Михаил Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва
Шагалиев Рашит Мирзагалиевич, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., заместитель директора Федерального научного центра
Старков Сергей Олегович, д. ф.-м. н., профессор, начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск
Еськов Валерий Матвеевич, д. ф.-м. н., д. б. н., профессор, заведующий отделом, Сургутский филиал НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Сургут
Кабанихин Сергей Игоревич, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск
Лаврентьев Михаил Михайлович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск
Пятков Сергей Григорьевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск
Ильин Валерий Павлович, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры прикладной математики, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск
Крыжановский Борис Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., руководитель, Центр оптико-нейронных технологий НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Нагорнов Олег Викторович, д. ф.-м. н., профессор, первый проректор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
Земпо Ясунари, PhD (Physics), Университет Хосэй, Токио, Япония
Пападопулос Атанас, Doctorat d'Etat (Habilitation), mathematics, Университет Страсбурга, Национальный центр научных исследований Франции, Страсбург, Франция

Ответственный секретарь
Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н.
Ответственный редактор
Чалова Анна Петровна, к. филол. н.
Технические редакторы
Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент; Горбунов Дмитрий Владимирович, к. т. н.
Амелин Максим Евгеньевич, Батуро Серафим Александрович, Бобровская Ольга Павловна, Гавриленко Михаил Тарасович
Переводчик
Троицкий Дмитрий Игоревич, к. т. н., доцент
Фото на обложке
Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, научный руководитель НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77-78857 от 04.08.2020.
Решением Высшей аттестационной комиссии с 27 июня 2022 года 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».

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, 117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1.
Телефон: +7 9226-54-57-88, факс: +7 (495) 719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Сайт: jcyb.ru.

© НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
© Авторы

Founder and Publisher
Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute"
(NRC "Kurchatov Institute" – SRISA)

Russian Journal of Cybernetics is peer-reviewed.
The journal publishes papers on physics, mathematics, and engineering. The key areas of interest are:
– simulation, numerical methods, and simulation software
– electronic components for micro- and nanoelectronics, and quantum devices
– system analysis, control, and information processing.
Our mission is advancing these research areas in Russia and globally, supporting Russia's national science and technology priorities, and science-intensive sectors.
The Journal promotes advanced concepts in physics, mathematics, engineering, and facilitates Russia's Science and Technology Development Strategy. We offer an opportunity for professional researchers to publish. We improve the doctorate research quality through public peer review and educate the new generation of researchers.
The Journal accepts original papers; translations of papers from international journals (consent of the right holders for the translation and publication is required); reviews; essays; remarks, and event reports.
The Journal is intended for researchers, university, and doctorate students.

Chief Editor
Prof. *Vladimir B. Betelin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, Moscow
Vice Chief Editor
Prof. *Valery A. Galkin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Surgut Branch of NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, Surgut
Editorial Board
Prof. *Vladislav Ya. Panchenko*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Vice President of the Russian Academy of Sciences, Head of the National Academic Degrees Authority, Russian Ministry of Science and Education, Vice President of the NRC "Kurchatov Institute", Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow
Prof. *Sergey E. Vlasov*, Deputy Director for Strategic Information, Communication, and Quantum Technologies, NRC "Kurchatov Institute", Moscow
Prof. *Gennady I. Savin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math),
Academic Director, Joint Supercomputer Center – Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow
Prof. *Viktor A. Soifer*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, Chief Researcher Lab for Automated Research Systems, Korolev Samara National Research University, Academic Director, Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara
Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Mathematical and Computer Analysis Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow
Prof. *Yuri A. Chaplygin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, National Research University of Electronic Technology, Moscow
Prof. *Igor B. Petrov*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Informatics,
Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
Prof. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Deputy Director for Strategic Information Technology, NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, Moscow
Prof. *Vladimir F. Tishkin*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow
Prof. *Amir A. Gubaidullin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Tyumen Division, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, RAS Siberian Branch, Tyumen
Prof. *Mikhail V. Iakobovski*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow
Prof. *Rashit M. Shagaliyev*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director, Federal Research Center
Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head, Division of Intelligent Cybernetic Systems, Obninsk Institute of Atomic Energy, Obninsk
Prof. *Valery M. Eskov*, Doctor of Science (Phys&Math), Doctor of Science (Biology), Head of Division, Surgut Branch of NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, Surgut
Prof. *Sergey I. Kabanikhin*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Principal Researcher, Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk
Prof. *Mikhail M. Lavrentiev*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Institute of Automation and Electrometry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk
Prof. *Sergey G. Pyatkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Further Mathematics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk
Prof. *Valerii P. Ilyin*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk
Prof. *Boris V. Kryzhanovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Director, Opto-neural Technologies Center, NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, Moscow
Prof. *Oleg V. Nagornov*, Doctor of Science (Phys&Math), First Vice-Rector, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow
Prof. *Yasunari Zempo*, PhD (Physics), Hosei University, Tokyo, Japan
Prof. *Athanase Papadopoulos*, Doctorat d'Etat (Habilitation), Mathematics, University of Strasbourg, French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

Executive Editor
Taras V. Gavrilenko, Ph.D. (Engineering)
Managing Editor
Anna P. Chalova, Ph.D. (Linguistics)
Technical Editors
Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof.; Dmitry V. Gorbunov, Ph.D. (Engineering)
Maksim E. Amelin, Serafim A. Baturo, Olga P. Bobrovskaya, Mikhail T. Gavrilenko
Translator
Dmitry I. Troitsky, Ph.D. (Engineering), Assoc. Prof.
Cover Image
Prof. Vladimir B. Betelin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, NRC "Kurchatov Institute" – SRISA

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Mass media registration certificate EL No. FS 77-78857 dated on 04.08.2020.
On June 27, 2022 the National Board for Academic Degrees and Titles put the Russian Journal of Cybernetics on the list of leading journals for publishing papers by doctorate students.

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:
NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, Russia 117218, Moscow, Nakhimovsky pr., 36/1.
Tel.: +7(922)654-5788, fax: +7(495)719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Web: jcyb.ru.

© NRC "Kurchatov Institute" – SRISA
© Authors

СОДЕРЖАНИЕ

Поздравление с 80-летним юбилеем академика В. Б. Бетелина от НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ и от редакции журнала «Успехи кибернетики» 8

В. Я. Панченко

80 лет Бетелину Владимиру Борисовичу 9

Резюме Оргкомитета международной конференции «Математические идеи академика П. Л. Чебышёва, их приложения в естественных науках и технологиях искусственного интеллекта», приуроченной к 205-й годовщине со дня его рождения (Обнинск, 14–16 мая 2026 г.) 13

В. Б. Бетелин, В. А. Галкин, Т. В. Гавриленко

Достоверность исходных данных — основа достоверности применений технологий искусственного интеллекта при решении практических задач 16

А. Л. Семенов, Т. А. Рудченко

Образование. Роль государства, общества, личности 31

Р. Д. Гимранов, В. А. Галкин, Т. В. Гавриленко, Д. А. Моргун, М. Т. Гавриленко, М. Е. Амелин, С. А. Батуро, А. И. Грюнталь

Концепция платформы генерации прикладных систем управления 41

В. А. Юдин, Ю. М. Штейнберг, Н. П. Ефимова, И. В. Афанаскин

Возможность выделения на нефтяном месторождении непроницаемого экрана по данным гидропрослушивания двух скважин, расположенных возле разлома. Часть 1. Оценка возможности применения методики 52

А. М. Гиацинтов, А. Н. Еременчук, К. А. Мамросенко, К. В. Пугин

Методы ввода данных в микроядерных операционных системах на примере операционной системы реального времени «Багет» 59

К. В. Губарева, Е. Ю. Просвиряков

Точное решение уравнений неоднородного течения Куэтта–Пуазейля с трением Рэлея . . 66

В. Ж. Куклин, М. А. Кочаров, Е. А. Тихонов, А. Д. Коцаренко

Оценка теплового состояния устройства локальной автоматизации для морских электроэнергетических систем на базе российской элементной базы 74

В. В. Шеденко, С. У. Увайсов, В. С. Иванов, М. С. Христюк

Исследование согласования GaAs кристалла усилителя мощности СВЧ-диапазона с керамическим корпусом QFN 84

Е. В. Страшнов, И. П. Саблин

Моделирование звука при коллизиях объектов в системах виртуального окружения . . . 94

О. С. Володько, Н. А. Буряк

Нейросетевая модель временных рядов для прогнозирования уровня углекислого газа в атмосфере Центральной Сибири 102

Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов

Методика распознавания активности в умном доме с использованием беспроводных сенсорных сетей (WSN) и Интернета вещей (IoT) 109

А. А. Кобзев, О. Н. Крахмалев

Ансамблевый метод глубокого обучения с подкреплением для управления инвестиционным портфелем на российском фондовом рынке 119

А. В. Макаров
Стохастический подход к оценке ресурсов газовых месторождений в условиях неопределенности исходных данных 126
В. А. Солозобов, С. А. Лысенкова
Сравнение ансамблевых методов машинного обучения при решении задачи прогнозирования окончания периода заморозков 132
Э. Г. Тунян, Р. С. Сазиков, Т. В. Гавриленко
Классификация изображений временных рядов с использованием глубоких сверточных нейронных сетей 139
Т. Г. Бурдыко, К. И. Бушмелева
Классификация и критерии оценки функциональной полноты программного обеспечения Сургутского государственного университета в контексте политики импортозамещения . . 146
А. А. Драган, А. В. Гавриленко
Алгоритм формирования адаптивной траектории обучения школьников на основе данных об их успеваемости в центре подготовки к ЕГЭ и ОГЭ 151
Д. А. Яременко, К. И. Бушмелева
Оптимизация процесса эвакуации в современных многофункциональных комплексах . . 157

CONTENTS

Happy 80^{th} Birthday and Best Wishes to Prof. Vladimir Betelin, Member of the RAS. Greetings from the NRC "Kurchatov Institute" – SRISA and the Editorial Board, Russian Journal of Cybernetics 8

V. Ya. Panchenko

80^{th} Anniversary of Vladimir B. Betelin 9

Overview: the Organizing Committee of the Mathematical Ideas of Prof. P.L. Chebyshev, their Applications in Natural Sciences and Artificial Intelligence Technologies International Conference Commemorating Chebyshev's 205^{th} Anniversary (Obninsk, May 14–16, 2026) . . 13

V. B. Betelin, V. A. Galkin, T. V. Gavrilenko

Reliable Input Data as the Foundation for Trustworthy AI Applications 16

A. L. Semenov, T. A. Rudchenko

Education: The Contribution of the Government, Society, and the Individual 31

R. D. Gimranov, V. A. Galkin, T. V. Gavrilenko, D. A. Morgun, M. T. Gavrilenko, M. E. Amelin, S. A. Baturo, A. I. Gryuntal

The Concept of a Platform for Application-Centric Control System Synthesis 41

V. A. Yudin, Yu. M. Shteinberg, N. P. Efimova, I. V. Afanaskin

Impermeable Barrier Detection in an Oil Field Using Interference Testing Data from Two Wells Near a Fault. Part 1. Verification of the Proposed Methodology 52

A. M. Giatsintov, A. N. Eremenchuk, K. A. Mamrosenko, K. V. Pugin

Data Input Methods in Microkernel Operating Systems: A Case Study of the Baget Real-Time Operating System 59

K. V. Gubareva, E. Yu. Prosviryakov

Exact Solution of the Equations for Inhomogeneous Couette–Poiseuille Shear Flow with Rayleigh Friction 66

V. Zh. Kuklin, M. A. Kocharov, E. A. Tikhonov, A. D. Kotsarenko

Thermal Analysis of a Local Automation Unit in Marine Integrated Electrical Power Systems Using Domestic Components 74

V. V. Shedenko, S. U. Uvaysov, V. S. Ivanov, M. S. Hristyuk

Impedance Matching of a GaAs Microwave Power Amplifier Die to a Ceramic QFN Package . 84

E. V. Strashnov, I. P. Sablin

Sound Simulation for Object Collisions in Virtual Environments 94

O. S. Volodko, N. A. Buryak

A Neural Network Time Series Model to Forecast Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations in Central Siberia 102

N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov

Human Activity Recognition in Smart Homes Using WSN and IoT 109

A. A. Kobzev, O. N. Krakhmalev

Ensemble Deep Reinforcement Learning Approach for Portfolio Management in the Russian Equity Market 119

A. V. Makarov
A Stochastic Approach to Estimating Gas Field Resources under Input Data Uncertainty . . 126
V. A. Solozobov, S. A. Lysenkova
Comparison of Ensemble Machine Learning Methods for Predicting the End of the Frost Period 132
E. G. Tunyan, R. S. Sazikov, T. V. Gavrilenko
Time Series Classification Using Recurrence Plots and Deep Convolutional Neural Networks . 139
T. G. Burdyko, K. I. Bushmeleva
Categorization and Evaluation of Software Used at Surgut State University under the Import Substitution Policy 146
A. A. Dragan, A. V. Gavrilenko
A Method for Building Adaptive Learning Paths for School Students Based on Academic Performance in Standardized School Exams 151
D. A. Yaremenko, K. I. Bushmeleva
Optimization of Evacuation Systems in Modern Multifunctional Buildings 157

ПОЗДРАВЛЕНИЕ С 80-ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ АКАДЕМИКА В. Б. БЕТЕЛИНА ОТ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» — НИИСИ И ОТ РЕДАКЦИИ ЖУРНАЛА «УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ»

Уважаемый Владимир Борисович!

Коллектив Научно-исследовательского института системных исследований сердечно поздравляет Вас с 80-летним юбилеем! Этот знаменательный день является замечательным поводом выразить Вам глубокое уважение и признательность за многолетнее служение отечественной науке, выдающийся вклад в развитие информационных технологий, систем автоматизации, программно-аппаратных комплексов, микропроцессорных и суперкомпьютерных технологий.

Ваша научная и организационная деятельность неразрывно связана с развитием НИИСИ. В течение многих лет Вы определяете стратегические направления исследований института и формируете вектор развития научных школ для проведения комплексных междисциплинарных работ, укрепляющих позиции НИИСИ как одного из ведущих научных центров страны в области системных исследований, вычислительных и информационных технологий. Результаты работ по созданию аппаратно-программных платформ, операционных систем реального времени, современных средств автоматизации, отечественных микропроцессоров, сложных СБИС, а также высоконадежных вычислительных систем специального назначения вносят существенный вклад в развитие технологической независимости России и обеспечение потребностей стратегически важных отраслей ее промышленности.

Ваши труды в области инструментального программного обеспечения, машинной графики и САПР, высокопроизводительных вычислений получили широкое признание в научном сообществе. Ваша деятельность как академика Российской академии наук, научного руководителя НИИСИ, организатора крупных научно-технических проектов, автора многочисленных научных работ и наставника молодых исследователей служит примером высокой ответственности, профессиональной принципиальности и преданности делу развития российской науки.

Коллектив НИИСИ высоко ценит Вашу роль в становлении и развитии института, Ваше стратегическое видение, научную требовательность, умение объединять фундаментальные исследования с решением прикладных задач государственного значения. В день Вашего юбилея примите наши искренние пожелания крепкого здоровья, благополучия, неиссякаемой энергии, новых научных достижений, поддержки коллег и учеников, дальнейшей плодотворной работы на благо отечественной науки!

С глубоким уважением, коллектив НИИСИ,
редакция журнала «Успехи кибернетики»

80 ЛЕТ



Бетелину Владимиру Борисовичу

8 августа 2026 года исполняется 80 лет академику РАН, одному из основателей и научному руководителю НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ Владимиру Борисовичу Бетелину, директором которого он являлся с 1989 по 2015 годы. В. Б. Бетелин родился 8 августа 1946 г. в г. Кинешме Ивановской обл. В 1970 г. окончил механико-математический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1986 г. — докторскую. В 1991 г. ему было присвоено звание профессора. В 1997 г. избран членом-корреспондентом РАН по Отделению информатики, вычислительной техники и автоматизации РАН (специальность «Автоматизация программирования»), а в 2003 г. — действительным членом РАН по Отделению информационных технологий и вычислительных систем РАН (специальность «Информационные технологии и автоматизация»). Владимир Борисович Бетелин — широко известный специалист в области информационных технологий и систем автоматизации, внес большой вклад в развитие теории и практики разработки инструментальных систем программного обеспечения, систем интерактивной машинной графики и геометрического моделирования, а также программных систем машиностроительных САПР.

В. Б. Бетелин в течение многих лет преподавал на механико-математическом факультете МГУ. Он является автором целого ряда методических пособий для студентов. В 1971–1986 гг. на механико-математическом факультете МГУ и в ИПМ АН СССР (1975–1979 гг.) занимался проблемами создания отладочных компиляторов с языка высокого уровня и на этой основе — эффективных компиляторов с языка ФОРТРАН с расширенной диагностикой для вузовских вычислительных центров. Разработанные под его руководством и при его непосредственном участии системы пакетной обработки АСФОР и диалоговая многотерминальная система ЭКСПРЕСС для ЕС ЭВМ эксплуатировались в МГУ, МИСИС, МГПИ и в ряде других вузов страны. Результаты этих работ составили основу диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Также в этот период под его руководством и при его непосредственном участии на механико-математическом факультете разрабатывается специальное программное обеспечение практикумов по программированию и другим математическим дисциплинам, дающее студенту возможность диалогового взаимодействия с ЭВМ в терминах объектов изучаемой дисциплины при относительно низких затратах на выполнение рутинных работ. Система диалогового доступа к учебным пакетам прикладных программ по алгебре, дифференциальным уравнениям, математической статистике и т.д. для СМЭВМ эксплуатировалась в МГУ, МГПИ, МЭИ, МФТИ и ряде других вузов страны. В 1979–1991 гг. занимался проблемами создания аппаратно-программных систем автоматизации проектирования в машиностроении в рамках совместных работ МГУ и АН СССР с ПО ЗИЛ. Именно в те годы В. Б. Бетелин разработал методологию и технологию создания программно-аппаратных комплексов систем автоматизированного проектирования для машиностроения, а также соответствующие средства автоматизации программирования. Был решен ряд оптимизационных задач, убедительно показавших, что без ущерба для прочности несущую раму кузова грузового автомобиля ЗИЛ можно облегчить на 40 килограммов. В этот период под его руководством и при его непосредственном участии были разработаны основные программные системы геометрического моделирования двумерных и трехмерных объектов, поверхностей сложной формы, а также подсистемы интерактивной машинной графики для визуализации результатов моделирования. Результаты этих работ легли в основу диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (1986 г.). В этот же период под руководством В. Б. Бетелина совместно со специалистами ПО ЗИЛ ведутся работы по созданию первых отечественных рабочих станций на базе 32-разрядных микропроцессоров с операционной системой UNIX, а также мини-фабрик по производству этих станций, в первую очередь, для обеспечения конструкторско-технологических служб ПО ЗИЛ. В марте 1989 г. была выпущена установочная партия рабочих станций «БЕСТА-88», а к 1990 г. было произведено более тысячи таких систем с наработкой на отказ 10 000 часов. В настоящее время область научных интересов В. Б. Бетелина включает суперкомпьютерные технологии, архитектуру, элементную базу супер-ЭВМ. Основные результаты научной деятельности В. Б. Бетелина за последние 20 лет: отечественная информационно-безопасная аппаратно-программная платформа, отечественные субмикронные 32- и 64-разрядные микропроцессоры с RISC-архитектурой, отечественная операционная система реального времени, а также современные средства автоматизации разработки прикладных программ, отечественная технологическая линия по производству СБИС с субмикронными проектными нормами.

Период с 2007 по 2020 годы ознаменовался следующими результатами. В. Б. Бетелиным была осуществлена разработка и организация серийного производства отечественных 32- и 64-разрядных микропроцессоров и коммуникационных СБИС, в том числе устойчивых к воздействиям факторов космического пространства, вычислительных систем специального назначения на их основе, в том числе высокопроизводительных систем терафлопсного класса. В этот период произведено и поставлено заказчикам более 300 тыс. отечественных микропроцессоров и СБИС, 75 тыс. электронных модулей и 15 тыс. ЭВМ на их основе. В. Б. Бетелиным осуществлено научное руководство и непосредственное участие в реализации проекта «Развитие суперкомпьютерных и грид-технологий» в 2010–2012 гг. в интересах атомной энергетики, ракетно-космической, авиационной и автомобильной отраслей. Проект утвержден в 2009 г. Комиссией при Президенте РФ по вопросам модернизации и технологического развития экономики России в 2009–2012 гг. Под руко-

водством В. Б. Бетелина осуществлены разработка современного отечественного 64-разрядного микропроцессора двойного назначения с рабочей частотой функционирования 1 ГГц и создание на его основе семейства настольных и мобильных персональных компьютеров.

В это же время (2005–2012 гг.) совместно с Институтом проблем лазерных и информационных технологий РАН была разработана и установлена в реальной системе оптическая полимерная шина (скорость передачи $\geq$ 120 ГБт/сек) для межчипового соединения на печатной плате.

В 2014–2020 гг. В. Б. Бетелин организовал и координировал развитие и становление Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), миссия и стратегическая цель которого состояла в обеспечении ведущих отраслей экономики России (машиностроительная, атомная, авиакосмическая, нефтегазовая) перспективными образцами высоконадежной аппаратуры, ПО реального времени, технологий, гарантированно выполняющими критические функции и не уступающими лучшим зарубежным продуктам по технико-экономическим характеристикам. Результаты высоко оценены контролирующими организациями, по итогам реализации Программы развития ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на 2016–2020 гг. Федеральный научный центр подтвердил свою принадлежность к 1 (высшей) категории научных организаций. С 1997 г. В. Б. Бетелин — директор Института микротехнологий РНЦ «Курчатовский институт», где к 2003–2004 гг. была запущена мини-фабрика — кластерная технологическая линия для изготовления микропроцессоров и сложных СБИС. В 2005 г. он стал вице-президентом Научного центра «Курчатовский институт». С 2010 г. В. Б. Бетелин — научный руководитель создания и применения суперкомпьютерных технологий в гражданских отраслях промышленности РФЯЦ-ВНИИЭФ. В. Б. Бетелин — член бюро Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук, сопредседатель Совета РАН по координации научных исследований по направлению «Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения», член Научно-координационного совета членов РАН — научных руководителей научных организаций, подведомственных Минобрнауки России и находящихся под научно-методическим руководством РАН, член Научно-координационного совета РАН по проблемам прогнозирования и стратегического планирования в Российской Федерации, председатель Экспертной комиссии по премии имени С. А. Лебедева РАН, член Экспертной комиссии Министерства науки и высшего образования РФ по направлению «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии», член редакционного совета журнала «Информационные технологии и вычислительные системы» РАН, член редколлегии журнала «Вопросы атомной науки и техники» (серия «Математическое моделирование физических процессов») РФЯЦ-ВНИИЭФ, главный редактор журнала «Успехи кибернетики», член Научного совета при Совете безопасности Российской Федерации, член НТС ВПК РФ, член Секции «Цифровые регионы: лучшие практики и стратегии развития» Совета по развитию цифровой экономики при Совете Федерации ФС РФ, член Межведомственной рабочей группы Совета при губернаторе Самарской области по науке, технологиям и высшему образованию по направлению «Инфокоммуникационные и цифровые системы и технологии», член Консультативного научного совета Некоммерческой организации Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий («Сколково»).

В. Б. Бетелин — заведующий кафедрой высокопроизводительных вычислений МГУ имени М. В. Ломоносова, на которой ежегодно проходят вычислительный практикум студенты механико-математического и других факультетов. Он подготовил 1 доктора и 8 кандидатов наук.

Владимир Борисович Бетелин на протяжении последних 10 лет является неизменным председателем оргкомитета международных конференций, посвященных памяти великого русского математика академика П. Л. Чебышёва, получил фундаментальные результаты в области обоснованных ИИ-технологий.

В. Б. Бетелин — автор и соавтор более 200 научных работ, в том числе 10 монографий и 9 патентов. Издано 20 монографий и сборников статей под редакцией В. Б. Бетелина. Из числа научных работ, индексируемых в международных системах цитирования, 12 вышли в высокорейтинговых журналах, входящих в первый квартиль. Наиболее цитируемые публикации насчитывают 274 и 256 цитирований соответственно, по данным Scopus.

В. Б. Бетелин — лауреат Государственной премии РФ 2005 года, лауреат премии Правительства Российской Федерации 2014 года в области науки и техники, награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, орденом Дружбы, орденом Почета, юбилейной медалью Совета безопасности Российской Федерации и орденом Александра Невского.

От всей души поздравляем Владимира Борисовича Бетелина — великого российского ученого, патриота и гражданина — со славным юбилеем и желаем ему доброго здоровья, удачи во всех начинаниях и больших творческих успехов!

Вице-президент РАН,
председатель ВАК
академик РАН



РЕЗЮМЕ ОРГКОМИТЕТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИДЕИ АКАДЕМИКА П. Л. ЧЕБЫШЁВА, ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА», ПРИУРОЧЕННОЙ К 205-Й ГОДОВЩИНЕ СО ДНЯ ЕГО РОЖДЕНИЯ (ОБНИНСК, 14–16 МАЯ 2026 Г.)



Пафнутий Львович Чебышёв (1821-1894)

На базе ИАТЭ НИЯУ МИФИ состоялась международная конференция «Математические идеи академика П. Л. Чебышёва, их приложения в естественных науках и технологиях искусственного интеллекта», открытие которой прошло 14 мая в обнинском Доме ученых. Конференция продлилась до 16 мая. В рамках конференции собрались выдающиеся ученые Российской Федерации, приняли участие ученые из Франции, значимо представлены молодые ученые.

Оргкомитет выражает глубокую признательность и благодарность за оказанную финансовую поддержку в проведении конференции: АО КБ «Корунд-М» (академик В. Б. Бетелин) и ООО «Креативный институт идей и новых технологий» (к.э.н., доцент Р. Д. Гимранов, д.э.н., профессор Г. Е. Каратаева).

Заседания открыл академик РАН В. Б. Бетелин (научный руководитель НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ). На протяжении последних 32 лет неизменным организатором конференции является профессор В. А. Галкин (директор Сургутского филиала НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ).

Конференция проходила при поддержке Правительства Калужской области, Администрации города Обнинска. С приветственными обращениями к участникам выступили: вице-президент РАН академик В. Я. Панченко, заместитель Губернатора Калужской области И. А. Агеева, глава города Обнинска С. В. Перевалов, первый проректор НИЯУ МИФИ профессор О. В. Нагорнов (от имени ректора НИЯУ МИФИ профессора В. И. Шевченко), заместитель директора НИЦ «Курчатовский институт» профессор Т. Н. Леонова, директор по информационным и цифровым технологиям ГК «Росатом» профессор РАН Е. М. Абакумов.

Тематика докладов охватывает глубинные проблемы технологий искусственного интеллекта, математического обоснования искусственных нейронных сетей, развитие научного наследия великого русского математика академика П. Л. Чебышёва, а также актуальные проблемы современного математического образования.

В конференции принимали участие 136 ученых, в том числе 3 академика РАН, 2 чл.-корр. РАН, 28 профессоров, 46 докторов наук, 40 кандидатов наук. Представлены крупные университеты, научные центры РФ и СНГ: Москва, Сургут, Челябинск, Обнинск, Ханты-Мансийск, Великий Новгород, Кострома, Нижний Новгород, Рязань, Санкт-Петербург, Саров, Новосибирск, Минск и др., а также дальнее зарубежье: Страсбург, Тур (Франция).



Значительный вклад в проведение мероприятий конференции внесли сотрудники Сургутского филиала НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ доцент Д. А. Моргун и доцент Т. В. Гавриленко, а также Обнинского филиала НИЯУ МИФИ — член Оргкомитета профессор С. О. Старков и ведущий инженер ЦОНД ИАТЭ НИЯУ МИФИ Г. А. Непомнящих.

Оргкомитет выражает благодарность Администрации города Обнинска и обнинскому Дому ученых за поддержку мероприятий конференции.

По итогам проведенной конференции планируется издание сборника трудов участников конференции.

Оргкомитет

Сопредседатели Оргкомитета



Бетелин В. Б. — академик РАН, научный руководитель НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ



Шевченко В. И. — ректор НИЯУ «МИФИ»

Заместители сопредседателей Оргкомитета



Галкин В. А. — директор Сургутского филиала НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ



Гимранов Р. Д. — начальник управления ИТ ПАО «Сургутнефтегаз»



Нагорнов О. В. — первый проректор НИЯУ «МИФИ»

Члены Оргкомитета:

1. Панченко В. Я. — академик РАН, вице-президент РАН.
2. Представитель Правительства Калужской области.
3. Представитель Администрации гор. Обнинска.
4. Гавриленко Т. В. — к.т.н., доцент, заместитель директора Сургутского филиала НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ.
5. Гранков П. Ю. — директор ГАУ КО «Технопарк «Обнинск».
6. Кабанихин С. И. — чл.-корр. РАН, Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН.
7. Кудряшов Н. А. — профессор, НИЯУ «МИФИ».
8. Лаврентьев М. М. — чл.-корр. РАН, Новосибирский государственный университет.
9. Леонова Т. Н. — профессор, заместитель директора НИЦ «Курчатовский институт».
10. Моргун Д. А. — к.ф.-м.н., доцент, заведующий отделом, Сургутский филиал НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ.
11. Осипова Т. А. — заместитель директора, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.
12. Панов А. В. — профессор, директор, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.
13. Papadopoulos A. — профессор, Университет Страсбурга, Франция.
14. Петров И. Б. — чл.-корр. РАН, Московский физико-технический институт.
15. Пухначёв В. В. — чл.-корр. РАН, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН.
16. Радкевич Е. В. — профессор, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.
17. Старков С. О. — профессор, НИЯУ «МИФИ».
18. Толоконников Г. К. — к.ф.-м.н., академик Российской инженерной академии (РИА), соруководитель Секции РИА «Системный подход и искусственный интеллект», соруководитель Секции НСМИИ РАН «Математическая биология».
19. Филимонов М. Ю. — профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения РАН.
20. Чубариков В. Н. — профессор, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.
21. Шагалиев Р. М. — чл.-корр. РАН, заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ.
22. Якобовский М. В. — чл.-корр. РАН, директор, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН.
23. Яковлев М. С. — заместитель директора, НАЦ РН им. В. И. Шпильмана, Ханты-Мансийск.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ — ОСНОВА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИМЕНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В. Б. Бетелин[1,а], **В. А. Галкин**[2,б], **Т. В. Гавриленко**[2,в]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация*

[2] *Сургутский филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация*

[а] *ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6646-2660, betelin@niisi.msk.ru*

[б] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9721-4026, val-gal@yandex.ru*

[в] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3243-2751,* ✍ *taras.gavrilenko@gmail.com*

Аннотация: в статье анализируются фундаментальные ограничения и риски, связанные с повсеместным внедрением технологий искусственного интеллекта (ИИ), и в частности универсальных моделей типа GPT. Показано, что эпоха экстенсивного масштабирования ИИ завершается из-за исчерпания качественных человеческих данных. Рассмотрены задачи ИИ через призму теории некорректно поставленных обратных задач, доказано, что вычислительная неустойчивость является объективным математическим свойством. Обосновано, что основа архитектуры «Трансформер», опирающаяся на структурную лингвистику, не имеет строгого математического обоснования при переносе на области без формального синтаксиса (медицина, промышленность), что ставит под сомнение достоверность получаемых данных. На примерах из академической и школьной среды продемонстрированы фактические признаки стагнации науки и образования, вызванные делегированием интеллектуального труда генеративному ИИ. Сформулирован вывод о необходимости перехода от универсальных моделей к специализированным ИИ-решениям, требующим математического обоснования классов корректности, верификации исходных данных предметной области и обязательного контроля со стороны человека при работе с критической инфраструктурой.

Ключевые слова: искусственный интеллект, архитектура трансформера, некорректно поставленные обратные задачи, вычислительная нестабильность, качество данных, контроль человеком.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Бетелин В. Б., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. Достоверность исходных данных — основа достоверности применений технологий искусственного интеллекта при решении практических задач. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):16–30.

Поступила в редакцию: 20.05.2026. *В окончательном варианте: 23.06.2026.*

RELIABLE INPUT DATA AS THE FOUNDATION FOR TRUSTWORTHY AI APPLICATIONS

V. B. Betelin[1,a], **V. A. Galkin**[2,b], **T. V. Gavrilenko**[2,c]

[1] *Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation*

[2] *Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Surgut, Russian Federation*

[a] *ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6646-2660, betelin@niisi.msk.ru*

[b] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9721-4026, val-gal@yandex.ru*

[c] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3243-2751,* ✍ *taras.gavrilenko@gmail.com*

Abstract: we analyzed the fundamental limitations and risks of artificial intelligence (AI), with particular emphasis on large general-purpose models such as GPT. We showed that the era of extensive AI growth is approaching its limits because the supply of high-quality human-generated data is becoming exhausted. We considered AI-related challenges within the framework of ill-posed inverse problems and demonstrated that computational instability is an inherent mathematical property of such problems. We examined the theoretical foundations of the Transformer architecture and showed that its application to domains without formal syntactic structures, such as medicine and industry, lacks rigorous mathematical justification, raising concerns about the reliability of the resulting outputs. We analyzed examples from secondary and higher education and identified signs of stagnation associated with the delegation of intellectual tasks to generative AI systems. Based on our findings, we concluded that future AI development should shift from universal models toward specialized solutions supported by mathematical justification, verification of domain-specific source data, and mandatory human oversight in applications involving critical infrastructure.

Keywords: artificial intelligence, Transformer architecture, ill-posed inverse problems, computational instability, data quality, human oversight.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, project No. 1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Betelin V. B, Galkin V. A., Gavrilenko T. V. Reliable Input Data as the Foundation for Trustworthy AI Applications. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):16–30.

Original article submitted: 20.05.2026. *Revision submitted: 23.06.2026.*

Введение

Технологии искусственного интеллекта (ИИ) стремительно интегрируются во все сферы человеческой деятельности: от фундаментальной науки, промышленности и медицины до образования и военного планирования. Однако за внешне впечатляющим технологическим рывком, сулящим небывалые перспективы развития не только сфер образования, науки и промышленности, но и гуманитарной сферы, и самого человека, скрывается, по сути дела, **угроза стагнации как всех этих сфер,** так и собственно сферы ИИ. Технология ИИ не является автономным «сверхразумом»; по своей природе это информационная технология, достоверность и результаты применения для **решения практической задачи** которой в какой-либо сфере определяются человеком. Прежде всего, такими результатами его деятельности для решения **конкретной практической задачи,** как достоверность подготовленных им данных, достоверность формализации им предметной области и достоверность и устойчивость выбранных им алгоритмов. **Развитие массовых ИИ-технологий** типа GPT как **универсальных многоцелевых технологий** без частичного или полного учета этих обстоятельств уже **привело**, по сути дела, **к стагнации этих технологий**. Действительно, ведущие мировые лидеры массовых технологий ИИ Илья Суцкевер, Сэм Альтман, Демис Хассабис констатируют завершение эпохи экстенсивного масштабирования ИИ: **качественные человеческие данные исчерпаны,** вероятность достижения «дна» в 2026 г. по оценкам Epoch AI составляет 80%, а простое наращивание параметров и флопсов перестало давать взрывной рост [6–12]. При этом США уже инвестировали сотни миллиардов долларов в развитие вычислительной инфраструктуры, дата центров, обеспечивающих эти технологии, главным показательным которых стали не флопсы, а мегаватты [3, 4], поскольку в настоящее время они потребляют около 4% электроэнергии в США, а к 2030 г. это потребление удвоится. Один из планируемых способов удовлетворения этого спроса — строительство малых ядерных реакторов мощностью 500 Мвт [5]. Одно из последствий инвестирования в инфраструктуру ИИ США — острый дефицит компонентов памяти (DDR5, HBM, SSD) из-за переориентации производства под нужды ИИ [13–18]. США также ограничили экспорт передовых чипов через GAIN AI Act [1, 2].

Аналогичным образом применение массовых ИИ-технологий типа GPT в различных сферах деятельности без учета этих обстоятельств может привести, а в сферах науки и образования уже привело к **появлению фактических признаков стагнации**. Например, до 90% статей аспирантов, поступивших в редакцию научного журнала «Успехи кибернетики» в 2025–26 гг., были сгенерированы ИИ с фальшивыми списками литературы, а в старших классах

одной из школ г. Сургута ученики делегируют выполнение домашних заданий чат-ботам, что препятствует формированию у них знаний, умений и навыков, необходимых для выполнения этих заданий, и тем самым **ставит под сомнение** возможность **освоения** в перспективе **даже уже существующих технологий**, не говоря уже о разработке новых.

Проект Wordfreq, занимавшийся анализом частотности слов в онлайн-пространстве, прекратил свою работу из-за невозможности отделить созданный искусственным интеллектом текст от контента, написанного людьми. Создательница проекта Робин Спир объяснила, что нейросети наводнили интернет таким количеством искусственного текста, что он стал непригоден для изучения реального языкового использования. Wordfreq отслеживал изменения в употреблении слов в более чем 40 языках, анализируя разнообразные источники, включая Википедию, субтитры к фильмам, новостные статьи, книги, публикации в Twitter и Reddit. Полученные данные использовались лингвистами для изучения динамики языковых изменений в контексте современной культуры [40]. Многие проекты, вместо полного закрытия, переходят на использование ИИ для обработки языков, что меняет роль лингвиста с «собирателя» на «редактора» ИИ-данных [41]. Подобные сообщения вызывают тревогу и свидетельствуют о появлении **фактических признаков стагнации** естественных языков.

В обобщенной постановке задача построения технологии искусственного интеллекта сводится к задаче **итерационного построения аппроксимирующей функции** (обучения ИИ) и **метрики близости** к этой функции на основе множества **достоверных данных** об интеллектуальной деятельности человека при решении им, вообще говоря, любой практической задачи из любой области деятельности (сильный ИИ). Однако в настоящее время существует **только предположение о возможности** создания таких технологий, но не **научные обоснования** возможности **существования** технологий **сильного ИИ** не только для любой, но и для какой-либо конкретной области человеческой деятельности, такой, например, как медицина. В том числе **предположение о достоверности** множества **данных, и сходимости** итерационного процесса к требуемому результату, и **устойчивости метрики близости.**

В существующей сегодня практической постановке технологии ИИ — это технология компьютерного моделирования интеллектуальной деятельности человека при решении **конкретных практических задач, придуманных человеком.** Это **игровые ИИ-**решения (шахматы, шашки, го и т.д.), основанные на модели **противоборства двух человек** следующих **одним и тем же формальным правилам**, а также **компиляционно-поисковые ИИ**-решения (типа GPT), основанные на модели **формального языка человека** и множестве **текстовых данных** на этом языке, созданных человеком.

В настоящее время ИИ-решения типа GPT являются наиболее востребованными массовыми решениями, которые ведут поиск в информационной базе **достоверных текстовых данных, созданных человеком**, достоверных семантических аналогов **заданной человеком** текстовой последовательности. При этом сформированный ИИ-решением семантический аналог будет представлять собой только **изложение, компиляцию** имеющихся в базе текстовых данных, **но не сочинение** на заданную человеком тему, то есть **не создание** новых текстовых данных, **не имеющих семантических аналогов** в этой базе. Именно это обстоятельство в совокупности с **«исчерпанием качественных человеческих данных»** [6–12] и является основной **причиной угрозы стагнации всех сфер применения массовых ИИ-решений типа GPT,** включая и попытки обойти это «исчерпание» путем генерации нейросетями **синтетических данных.**

Альтернативой универсальным массовым технологиям ИИ типа GPT, обеспечивающей **развитие, а не стагнацию всех сфер применения**, являются **технологии ИИ для решения конкретных практических задач**, создание которых включает **наполнение достоверными данными** информационной базы множеством возможных решений, формируемых человеком, синтез на этой основе **достоверной метрики близости** к этим решениям, и **достоверность**, и **устойчивость** используемых при этом алгоритмов.

Математическая основа: неустойчивость как свойство задач ИИ

В математике обучающим набором является система аксиом. В математической физике — это функция Грина.

Традиционный взгляд на информационные технологии связан, прежде всего, с тем, что

предметом исследования является классификация данных на основе неким образом (экспериментально) установленных связей между ними. (Естественно, что установление таких связей является результатом деятельности человеческого интеллекта!)

В дальнейшем интерпретация получаемой экспериментальной информации на основе предпочтений носителя интеллекта именуется «обучающим набором».

В обобщенном виде задача построения технологий искусственного интеллекта (ИИ) состоит в построении аппроксимирующей функции, моделирующей интеллектуальную деятельность носителя интеллекта (человека) в некоторой конкретной выбранной области его деятельности на основе достоверного множества образцов этой деятельности (слепков). Процесс итерационного построения аппроксимирующей функции завершается при достижении минимума значения некоторого функционала. Эта функция, реализуемая в виде программного обеспечения, выполняемого на компьютере, моделирует интеллектуальную деятельность человека.

По своей сути, это задача интерполяции, которую стремятся сделать наилучшей (т.е. оптимальной), восходящая к работам акад. П.Л. Чебышёва по отысканию многочлена, наименее уклоняющегося от нуля. Этот класс задач — создание выделенных связей (отношений) между данными на основе их продолжения с заданного множества, составляющего обучающий набор. Это прямая задача синтеза связей. К ней примыкает обратная задача интерпретации полученной информации (по результатам наблюдений на основе выделенных связей нужно восстановить источник информации).

Зачастую обратная задача применяется в условиях заведомо противоречивых данных, что типично для некорректных задач, которые характеризуются выполнением хотя бы одного из следующих пунктов:

1) задача не имеет решения;
2) задача имеет больше, чем одно решение;
3) решение неустойчиво при «малых» изменениях полученной информации.

Этот класс задач разрабатывался школами акад. А.Н. Тихонова, акад. М.А. Лаврентьева. Были построены эффективные алгоритмы регуляризации, положенные в основу технологий неразрушающего контроля, компьютерной томографии, распознавания образов и т.п. Указанный подход основывается на том, что на основе «наблюдений» формируются гипотетические отношения $R(z,u)$ между множеством наблюдаемых информаций $u \in U$ и множеством неизвестных источников информации $z \in F$. Обычно эти отношения записываются в виде отображения $A : F \to U$ так, что

$$A(z) = u.$$

При этом достоверно неизвестны ни A, ни u, ни z! Обычно постулируется вид отображения A, а недостоверность его задания переносится в ошибку определения информации u.

Для того, чтобы иметь оценку качества получаемых результатов, на множествах F, U задают топологическую структуру при помощи метрик ρ_F, ρ_U соответственно. В теории некорректных задач целью является приближение неизвестной $z_\mathrm{T} \in F$ на основе полученной информации $u_\delta \in U$, подчиняющейся условию $\rho_U(u_\delta,u_\mathrm{T}) = \delta > 0$, где δ — точность наблюдений, и при этом u_T неизвестно.

Ситуацией общего положения является отсутствие решения уравнения:

$$A(z) = u_\delta$$

либо отсутствие непрерывности обратного отображения $A^{-1} : U \to F$ (неустойчивость решения обратной задачи) на заданной паре метрических пространств (F,ρ_F), (U,ρ_U). Последнее можно преодолеть за счет правильного подбора класса корректности сообразно рассматриваемой обратной задаче, к чему вернемся ниже.

Типичная форма для блоков ИНС — это интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода на пространствах функций $z(s)$ и $u(t)$, интегрируемых с квадратом:

$$\int_a^b K(t,s)z(s)ds = u(t), \qquad c \le t \le d,$$

где заданное ядро $K(t,s)$ подчиняется условию Фредгольма $\iint_{[a,b]\times[c,d]} |K(t,s)|^2 dtds < \infty$. Процедура обучения ИНС в этом случае состоит в формировании ядра $K(t,s)$ (являющегося в данном случае функцией Грина) на основе теоретических или экспериментальных данных. В реальных задачах вид этой функции известен весьма приближенно. Ядро $K(t,s)$ соответствует определению S-матрицы, введенной в квантовую механику В. Гейзенбергом в 1938 г. [42, с. 286].

Структурно интегральное уравнение Фредгольма аналогично задачам квантовой электродинамики (КЭД), для решения которых Р. Фейнманом был развит формализм диаграммной техники [42, 43]. В этом случае все рассматриваемые величины являются комплексными амплитудами вероятностей.

Важно отметить, что становление математической структуры квантовой механики существенно связано с принципом неопределенности, выведенным Вернером Гейзенбергом в 1927 году. Отметим, что математический аппарат квантовой механики был создан В. Гейзенбергом в 1925 году (матричная механика) и Э. Шрёдингером в 1926 году (волновая механика).

Задачи предсказания измерений в квантовой механике однозначно соответствуют основным задачам интерполяции и экстраполяции функций, восходящим к классическим работам Ньютона и Лагранжа, а также минимизации их уклонений, связанных с исследованиями многочленов академиком П.Л. Чебышёвым.

Явления неустойчивости аппроксимаций на безгранично измельчаемых равномерных сетках, выявленные в 1900 году Рунге и в 1912 году С.Н. Бернштейном, совершенно аналогичны явлениям неустойчивости для интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Для подавления неустойчивости в теории приближения функций и в теории некорректных задач разработаны мощные оптимизационные алгоритмы. Диаграммная техника Р. Фейнмана служит для решения аналогичных задач в квантовой электродинамике.

Отмеченная близость подходов, по-видимому, может составить основу дальнейшей разработки теории интеллектуальных систем с возможным развитием в направлении построения моделей кинетики больших потоков данных на основе подходов Гиббса, Больцмана, Смолуховского, Власова, Гейзенберга, Шрёдингера, Фейнмана. Это направление приобретает особую актуальность в связи с заметной кластеризацией систем ИИ, основанных на больших языковых моделях. Здесь важно иметь представления о пространственно-временных границах таких кластеров, их взаимодействии с носителями человеческого интеллекта и т.п. По сути, мы вступаем в мир, в котором элементом среды становятся автоматизированные системы, основанные на технологиях ИИ.

Еще одним примером, иллюстрирующим проблему, может служить поиск точки пересечения двух ограниченных упорядоченных множеств значений двух уравнений (1) на отрезке $[0;32]$ с шагом 1 по оси с априори «обученной» достоверной евклидовой метрикой близости, которая вычисляет расстояние между двумя точками.

$$\begin{aligned} x + 5y &= 17, \\ 1{,}5x + 7{,}501y &= 25{,}503. \end{aligned} \tag{1}$$

Таблица

X	0	1	2	3	...	31	32
Y	3.4	3.2	3.0	2.8	...	-2.8	-3.0
X	0	1	2	3	...	31	32
Y	3.39995	3.19997	3.0	2.80003	...	-2.79922	-2.99920

Точка пересечения — это, по сути дела, две точки, принадлежащие разным множествам, расстояние между которыми равно нулю, поскольку они имеют одни и те же координаты $(2;3)$. Этот результат может быть получен с помощью простейшей достоверной метрики близости, обеспечивающей достоверное вычисление с шестью или более значащими цифрами расстояния между двумя точками, что гарантирует единственность точки пересечения достоверным перебором на этой основе всех возможных пар точек ($1089 = 33 \times 32$) двух множеств. Вычисление же расстояния между двумя точками не с шестью, а с пятью значащими цифрами приведет к недо-

стоверности данных этих двух множеств, поскольку в них к двум точкам с координатами (2,3), расстояние между которыми равно нулю, добавятся еще две такие же точки с координатами $(3, 2.8)$. Следствием этой недостоверности данных является неединственность точки пересечения двух множеств, то есть недостоверность решения.

Первопричиной этой проблемы недостоверности данных двух множеств значений двух уравнений (1) является то, что на отрезке [0;32] эти уравнения задают две почти совпадающие прямые. Действительно, разность значений y для этих уравнений в окрестностях точки $[2; 3]$ составляет всего 0.00003, а на границах отрезка $[0; 32]$ 0.00005 и 0.0008 соответственно. Это одновременно и первопричина неустойчивости аналитического решения системы (1). Действительно, при изменении во втором уравнении коэффициента при переменной y всего на 0.002 решением этой системы будет пара $(32; -3)$:

$$\begin{aligned} &x + 5y = 17, \\ &1{,}5x + (7{,}501 - 0{,}002)\, y = 25{,}503. \end{aligned} \tag{2}$$

Неустойчивость аналитического решения системы (1) означает также и неустойчивость решения Поисковика, поскольку при небольших отличиях в коэффициентах систем уравнений (1) и (2) найденные им координаты точек пересечения для двух пар множеств значений (1), (2) будут значительно различаться.

Выбор классов корректности

В ряде вычислительных экспериментов по распознаванию образов, относящихся к акустической, видео и текстовой информации, были найдены подходы к созданию программного обеспечения для практического решения задач в соответствующих областях. Эти успехи явились источником интереса к созданию полуэмпирических методов, носящих название искусственные нейронные сети (ИНС). Идейной основой реализации ИНС является принятие гипотезы о возможности создания технического информационного устройства, которое можно обучить на серии заданных примеров распознаванию образа (отысканию решения) по информации, вообще говоря, не входящей в обучающий набор.

Указанные замечания относятся к общей фундаментальной проблеме анализа вычислительной устойчивости ИНС при наращивании объемов обучающих наборов и как следствие — границ реализуемости и безопасной применимости систем ИИ, построенных на комплексах ИНС, взаимодействующих между собой путем обмена информацией. Одной из существенных проблем построения технологий ИИ является вычислительная устойчивость ИНС, обеспечивающих надежную интерпретацию входной информации, которая передается между различными ИНС для детализации и уточнения принимаемых решений.

Практическое использование ИНС нацелено на реконструкцию недоступного для непосредственного наблюдения объекта $z \in F$ на основе обработки «сжатой» информации $u \in U$, полученной из входного потока больших объемов данных с целью их классификации и интерпретации.

Процедура сжатия больших объемов данных может быть рассмотрена как действие вполне непрерывного оператора A на заданной паре метрических пространств F,U, т.е. $A : F \to U$ (это отображение трактуется как математическая модель аппаратуры, при помощи которой получают информацию $u \in U$ при наблюдении за объектом $z \in F$).

$$A(z) = u. \tag{3}$$

Соответственно, процедуру «сжатия» входной информации под действием оператора A можно трактовать как то, что ограниченные множества входных данных Big Data z преобразуются в предкомпактные подмножества выходных данных (почти конечные множества, т.е. хорошо аппроксимируемые конечными ε-сетями). Задачи распознавания образов, задачи их классификации на основе ИНС можно сформулировать как построение обратного оператора $R = A^{-1} : U \to F$:

$$R(u) = z \tag{4}$$

на основе полученных данных, лежащих в предкомпактном множестве.

Центральной проблемой для отыскания (3) с компактным непрерывным оператором A является либо отсутствие решения уравнения (3) (т.е. не при всех значениях $u \in U$ существует решение уравнения (3)), либо отсутствие свойства непрерывности у обратного оператора R на множестве значений $A(F) \subset U$ — принципиальная вычислительная неустойчивость ИНС, основанная на формуле (4) [19, 20].

Природа отмеченной некорректности задачи (3) связана с произволом в выборе топологий, задаваемых пользователем на множествах F,U. Ниже рассматриваются согласованные топологии на этой паре множеств, позволяющих обеспечить построение классов корректности для широкого класса задач (3).

Таким образом, классы задач, основанные на применении ИНС как средства аппроксимации отображений и построения решений обратных задач с компактным оператором, обнаруживают общее математическое свойство — вычислительную неустойчивость при обработке больших массивов данных. Эти проблемы аналогичны также для задач «восстановления» образов по «цифровым двойникам», поскольку имеют ту же математическую природу.

Вспомогательные построения

Для заданного отображения (3), являющегося математической моделью получения информации $u \in U$, выделим классы корректности задачи об отыскании неизвестной $z \in F$ посредством задания метрики ρ_U на множестве допустимых значений информации U, которую ниже согласованным образом перенесем на множество F.

Определение 1. Назовем классом корректности для уравнения (1) на заданном информационном пространстве (U,ρ_U) такое метрическое подпространство (F_1,ρ_{F_1}), где $F_1 \subset F$, ρ_{F_1} — метрика на множестве F_1, что сужение отображения A на множество F_1

$$A|_{F_1} : (F_1,\rho_{F_1}) \to (U,\rho_U)$$

является гомеоморфизмом.

В общем случае для задания класса корректности считаем заранее определенной метрику ρ_U. Для каждого заданного $u \in A(F) \subset U$ рассмотрим полный прообраз $A^{-1}(u)$, который, очевидно, задает все множество решений уравнения (1) для указанных исходных данных.

Определим на множестве F отношение эквивалентности $\sim$, полагая $z' \sim z''$, если $A(z') = A(z'')$. Обозначим

$$F^* = \{A^{-1}(u),u \in A(F)\}.$$

На множестве классов F^* определим метрику

$$\rho^*(A^{-1}(u'),A^{-1}(u'')) \stackrel{\text{def}}{=} P_u(u',u''). \tag{5}$$

Отметим, что отображение $A : F \to U$ естественным образом продолжается до отображения $A^* : F^* \to U$ по формуле

$$A^*(z^*) = u \ \forall z^* \in F^*, \tag{6}$$

так как $\forall z \in z^* : A(z) = u$.

Определение 2. Элемент множества $z^* \in F^*$ назовем обобщенным решением уравнения (3), если для него выполнено равенство (4).

Лемма 1. *Отображение* $A^* : (F^*,\rho^*) \to (A(F),\rho_U)$ *является изометрическим гомеоморфизмом.*

Доказательство. Утверждение леммы 1 является прямым следствием формулы (5). Действительно, в силу (5) для любых элементов $z_1 \in z_1{}^*$ и $z_2 \in z_2{}^*$ таких, что $A(z_1) \stackrel{\text{def}}{=} u_1$ и $A(z_2) \stackrel{\text{def}}{=} u_2$, имеет место равенство

$$\rho^*(z_1{}^*,z_2{}^*) \stackrel{\text{def}}{=} \rho^*(A^{-1}(u_1),A^{-1}(u_2)) = \rho_U(u_1,u_2).$$

Следовательно, отображение $A^* : (F^*,\rho^*) \leftrightarrow (A(F),\rho_U)$ сохраняет расстояние, т.е. является изоморфизмом. Лемма доказана.

Следствие. Задача (6) является корректной на паре метрических пространств $(F^*,\rho^*)(A(F),\rho_U)$.

В силу множественности элементов, составляющих обобщенное решение $z^* \in F^*$, практическую значимость имеет принцип отбора точек $z \in z^*$. В частности, для этой цели может быть использована аксиома выбора Цермело (Zermelo) [19], постулирующая существование отображения $\tilde{Z} : F^* \to F$, такого, что $\tilde{Z}(z^*) = z(z^*) \in z^*$. Положим $F_1 \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{Z}(F^*)$. Зададим на этом множестве структуру метрического пространства посредством метрики

$$\rho_{F_1}(z_1,z_2) \stackrel{\text{def}}{=} \rho^*(z_1{}^*,z_2{}^*). \tag{7}$$

Теорема существования классов корректности

Теорема. *Сужение отображения $A|_{F_1} : (F_1,\rho_{F_1}) \to (A(F_1),\rho_U)$ является изометрическим гомеоморфизмом, а соответствующая пара метрических пространств $(F_1,\rho_{F_1}),(A(F_1),\rho_U)$ задает класс корректности уравнения (3), который назовем $\tilde{Z}$-классом корректности Цермело.*

Замечание. Точность «распознавания образа» z на основе решения задачи (3) в классе корректности Цермело полностью совпадает с точностью получения исходных данных в информационном пространстве (U,ρ_U).

Доказательство теоремы. Действительно, поскольку выполнены равенства

$$A(z_1) = A^*(z_1^*) = u_1, A(z_2) = A^*(z_2^*) = u_2,$$

то отображение $A|_{F_1} : F_1 \to A(F_1)$ является взаимно однозначным. Таким образом, справедливы следующие равенства:

$$\rho_{F_1}(z_1,z_2) = \rho^*(z_1{}^*,z_2{}^*) = \rho_U(u_1,u_2).$$

Следовательно, $\rho_{F_1}(A^{-1}(u_1),A^{-1}(u_2)) = \rho_U(u_1,u_2)$ и, значит, отображение A является изометрическим гомеоморфизмом на паре пространств $F_1,A(F_1)$.

Теорема доказана.

Практическую значимость имеет вопрос построения отображения выбора Цермело $\tilde{Z}$. Например, задание структуры вполне упорядоченного пространства на множестве F, что гарантируется теоремой Цермело [21] о вполне упорядоченных пространствах, индуцирует соответствующий полный порядок на подмножестве $z^* \subset F$. В этом случае в качестве значения отображения Цермело $\tilde{Z}$ можно взять минимальный элемент на z^*, то есть

$$\tilde{Z}(z^*) = \min\{\ z \in z^*\}. \tag{8}$$

Таким образом, построение классов корректности, указанных в теореме 1, по формуле (8) порождается всеми возможными способами полного упорядочивания множества неизвестных величин F. Отметим, что для счетных множеств F полный порядок определяется заданием взаимно однозначного его отображения на натуральный числовой ряд [44].

Достоверность данных и границы применимости ИИ-архитектур

Ключевым условием достоверности ИИ-решения является достоверность данных из предметной области и метрики их близости. В играх, придуманных человеком (шахматы, го), в основе которых — модель противоборства двух человек, играющих по единым формальным правилам, ИИ демонстрирует выдающиеся результаты, поскольку существуют достоверный алфавит (координаты доски, типы фигур), формальные правила перемещения и верифицируемая история партий. Однако в медицине, промышленности или социальных науках отсутствуют единые формальные правила «противоборства врача с болезнью» или «инженера с технологическим процессом». История болезни или отчет о производстве являются неформальными описаниями, в которых сложно выделить строгий синтаксис и однозначную семантику.

Попытки применять универсальные архитектуры, такие как Трансформер, к неструктурированным данным (например, томографическим снимкам или промышленным телеметрическим данным) сталкиваются с фундаментальным разрывом: концептуальная основа Трансформера опирается на структурную лингвистику и стохастическое моделирование текстов с четкими

правилами орфографии и синтаксиса. Перенос этой модели на области без формального языка описания ставит под сомнение достоверность формируемых метрик близости и, как следствие, надежность ИИ-решений.

О достоверности ИИ-решений на основе архитектуры Трансформер для решения практических задач

Вообще говоря, необходимым условием **обеспечения достоверности решения** какой-либо **практической задачи** на основе технологии ИИ является **обоснование достоверности данных** в информационной базе, на основе которых этого типа ИИ сформирован. Именно **практическая задача определяет объемы, структуру и семантику данных** в информационной базе, а также те научные и прикладные проблемы, которые необходимо решить для обоснования достоверности данных. Например, информационные базы практических задач медицинской диагностики заболеваний по томографическим и рентгенографическим изображениям и идентификации человека по изображению его лица представляют собой совокупность объектов, каждый из которых является неструктурированным множеством точек разного цвета и яркости. Однако типы семантических структур этих объектов для каждой из практических задач принципиально различны и должны формироваться специалистами в области медицины и криминалистики. При этом **уровень достоверности данных** в каждой из информационных баз будет определяться **уровнем достоверности** формирования этими специалистами соответствующих им **типов семантических структур**.

В настоящее время нейросетевая архитектура Трансформер позиционируется как универсальный метод создания метрики близости (обучения) технологий ИИ типа Поисковик для решения широкого класса практических задач в различных областях человеческой деятельности, в том числе в области медицины, промышленности, беспилотного транспорта и т.д. Концептуальной основой этой архитектуры являются идеи структурной лингвистики, которая понимает язык как знаковую систему с четко выделенными структурными элементами, имеющую **строгое формальное описание**. В соответствии с этим пониманием текст на языке представляет собой упорядоченное множество таких структурных элементов, как символы, буквы, слова, предложения, абзацы и т.д., которое имеет строгое формальное описание, отражающее, по сути дела, семантику этого текста. Математической основой формального описания текстов в архитектуре Трансформер являются цепи Маркова в конечных пространствах состояний, представленные в виде графов матриц переходных вероятностей как инструмент **стохастического моделирования семантики** текстовых данных, **созданных человеком**. При этом архитектура Трансформер **принципиально предполагает**, во-первых, **достоверность наличия** в этих текстах **семантики, заложенной человеком,** а во-вторых, что они созданы им на основе **достоверного конечного алфавита** букв и символов и **достоверных формальных правил** орфографии и синтаксиса. Именно эти обстоятельства и гарантируют возможность построения **достоверной компьютерной стохастической модели семантики** этого текста на основе цепей Маркова.

Изначально основная цель создания модели архитектуры Трансформер заключалась в решении задачи машинного (компьютерного) перевода путем поиска в информационной базе текстовых данных, созданных человеком, **достоверных семантических аналогов** орфографически и синтаксически правильных текстовых последовательностей **на одном языке** орфографически и синтаксически правильным текстовым последовательностям **на другом языке.**

Однако в настоящее время наиболее востребованным ИИ-решением на основе этой модели являются системы типа GPT, которые ведут поиск в информационной базе данных достоверных семантических аналогов на том же языке, что и заданная человеком орфографически и синтаксически правильная текстовая последовательность. При этом существенно важно, что семантический аналог, сформированный этим ИИ-решением, будет представлять собой **только изложение, компиляцию имеющихся** в информационной базе текстовых данных, но **не сочинение** на заданную человеком тему, то есть создание **новых текстовых данных, не имеющих семантических аналогов** в этой базе.

Рассмотрим проблемы, которые возникают при использовании архитектуры Трансформер для решения практической задачи медицинской диагностики заболеваний по томографическим и рентгенографическим изображениям. Прежде всего, согласно концептуальной основе этой ар-

хитектуры, **изображения должны являться текстами на некотором языке**, представляющем собой знаковую систему с четко выделенными структурными элементами, имеющую строгое формальное описание. Этот язык описания изображения должен иметь **достоверный алфавит**, **достоверные формальные правила** орфографии и синтаксиса, а тексты на этом языке, описывающие изображения, должны иметь **достоверную семантику**, заложенную человеком. Однако возможность создания такого языка ставят под сомнение те фактические изображения, на основе которых этот язык может быть сформирован, поскольку эти изображения, как правило, сделаны в разное время для разных пациентов с разными формами и длительностью заболеваний. Но, что наиболее важно, **отсутствуют** какие-либо **обоснования достоверности взаимосвязи** отдельных фрагментов этих изображений с конкретными формами и длительностью заболевания. В этих условиях обеспечить достоверность алфавита, правил орфографии, синтаксиса и семантики, заложенной человеком, практически невозможно, что ставит под сомнение и достоверность соответствующего ИИ-решения.

Аналогичные **проблемы создания языка**, представляющего собой знаковую систему с четко выделенными структурными элементами, имеющую строгое формальное описание, как **необходимого условия применения архитектуры Трансформер** и **достоверности ИИ-решения на этой основе,** возникают также при решении любых практических задач, которые не основаны исключительно на использовании текстовых данных. Например, при решении практических задач в различных отраслях промышленности или медицине, в том числе в онкологии и кардиологии. Именно по этой причине на Восточном экономическом форуме 2025 Председатель Совета директоров ПАО «КИФА» Сунь Тяньшу констатировал, что «искусственный интеллект — это пока как **игрушка**, а конкретные его **применения** в сфере **промышленности — это пока далеко**», а глава «СБЕРА» Герман Греф заявил, что для создания AGI, который сможет заменить практически любую роль человека, **потребуется не менее 10 лет.**

Следовательно, перед внедрением ИИ в критическую инфраструктуру (энергетика, транспорт, связь, ПВО) необходимо доказать для каждой конкретной задачи:

- достоверность исходных данных (какова погрешность измерений, как формировалась база);
- устойчивость алгоритма (принадлежит ли задача к классу корректности, какова обусловленность);
- возможность верификации решения (человек должен иметь право отклонить «достоверный» совет ИИ).

Основная проблема применения технологии ИИ для решения практических задач — обоснование достоверности исходных данных

Эта проблема, безусловно, успешно решена для ИИ-решения «Цифровой гроссмейстер» в рамках модели, которая принципиально основана на том, что игра в шахматы **придумана человеком** как процесс **противоборства двух человек**, с целью **выигрыша одного из них**, в соответствии с конечным фиксированным набором **формальных правил**, которым **следует каждый** из играющих. **Партия** — это одно из основных понятий **формального языка шахмат**, представляет собой **ограниченный во времени процесс** противоборства двух человек, **смысл** которого (**семантика партии**) — в выигрыше одного их них, или ничьей. Формальный язык шахмат **достоверен** и **адекватен** решаемой задаче, поскольку включает **достоверный алфавит** — координаты полей 64 клеточной шахматной доски и уникальные обозначения каждой из 16 типов фигур, а также **достоверные правила** (аналоги орфографии и синтаксиса) их перемещения на этой доске.

Однако применение этой модели для решения практических задач, например, в области медицины, **невозможно без** существенной **коррекции** ряда ее принципиальных положений, которые в конечном итоге требуют обоснования, в том числе и теоретического, получения при этом как **достоверных исходных данных**, так и **достоверного** ИИ-решения на их основе. Прежде всего, к таким, требующим коррекции, положениям относятся *«**противоборство** двух человек в соответствии с **формальными правилами**, которым **следует каждый** из них»*. В области медицины это положение формулируется как **противоборство врача с болезнью, в условиях отсутствия** общего фиксированного набора **формальных правил**, которым следует

каждый из них. **История болезни** — неформальный аналог шахматной партии, представляет собой **неформальное** описание **процесса** и **результатов** противоборства конкретного врача с болезнью конкретного пациента.

Признаки стагнации в образовании и науке как следствие применения в этих сферах массовых ИИ семейства GPT

Начиная с 2023 года редакция журнала «Успехи кибернетики» все чаще стала получать статьи, полностью или частично сгенерированные массовыми ИИ семейства GPT, то есть содержащие полностью или частично результаты исследований, **не принадлежащие авторам статей**. Так, например, только с марта по август 2023 года поступило 6 таких статей, полностью сгенерированных ИИ, авторы которых — работники частных ИТ-компаний: ООО «Диджитал групп», VCV Inc., ООО «Ростелеком Информационные Технологии», «Xpate», Grid Dinamics, Your Next Agency. Все эти статьи были, конечно, редакцией журнала отклонены. Однако в дальнейшем использовать массовые системы ИИ для подготовки научных публикаций стали не только работники ИТ-компаний, но и **аспиранты,** и магистранты учреждений науки и образования, то есть потенциальные будущие **научные работники страны**. Так, по данным ответственного редактора журнала «Успехи кибернетики», **почти все статьи**, присланные в редакцию журнала аспирантами в 2026 году, сгенерированы ИИ, то есть, по сути дела, **являются изложением результатов, исследований и выводов**, не принадлежащих авторам, то есть не являющихся **результатами исследований и выводами этих аспирантов**. Более того, в этих статьях сгенерирован не только основной текст, но и список литературы, то есть все библиографические описания в них — это **описания несуществующих источников**. В целом, все это дает основания полагать, что у аспирантов, приславших эти статьи, **отсутствуют необходимые умения, знания** и мотивация для проведения научных исследований, анализа их результатов, формирования на этой основе научных гипотез и других основ научно-исследовательской работы. То есть на лицо все признаки стагнации в этом важном для будущего страны аспекте образовательной деятельности, являющейся прямым следствием применения в этой сфере массовых ИИ семейства GPT.

Опрос студентов и школьников 9-11 классов г. Сургута, а также их родителей показывает, что аналогичные признаки стагнации наблюдаются в школьном и вузовском образовании. Система школьного образования, сместившая фокус с понимания на формализованный контроль (ВПР, ОГЭ, ЕГЭ), сталкивается с новым вызовом: ученики делегируют ИИ выполнение домашних заданий, тем самым создавая у учителя иллюзию усвоения материала. По признанию самих учеников (более 80%), вместо самостоятельного выполнения они все чаще обращаются к искусственному интеллекту (ChatGPT, GigaChat, Яндекс.Алиса и др.). В итоге реальное обучение подменяется иллюзией: учитель увеличивает объемы заданий учеников, ИИ выполняет эти задания вместо учеников, при этом их знания, умения и навыки не увеличиваются. Однако учитель этого не видит, поскольку содержательная обратная связь с учеником заменена на формальный контроль, и поэтому он видит только «красивый» результат, не зная, что за ним не стоит мыслительный процесс ученика. Чем больше заданий, тем выше соблазн использовать ИИ; чем чаще ученики используют ИИ, тем больший объем заданий кажется учителю посильным для учеников.

Аналогичная ситуация и в вузах: студенты используют генеративный искусственный интеллект для быстрого выполнения тестов и других контрольно-измерительных материалов. Нередка ситуация, когда тест на 20 вопросов студентами закрывается с положительной оценкой за время, которое существенно меньше времени просто прочтения заданий. Аналогичная ситуация, скорее всего, наблюдается не только в ХМАО.

О применениях технологий ИИ в военной сфере

В основе ИИ военного применения в общем случае лежит модель игрового противоборства двух сторон, в условиях неполной информации каждой стороны о другой, которая обеспечивает возможность как по количеству, так и по глубине построения множества возможных продолжений игровых партий. При этом **критерии близости варианта к выигрышу** из этого множества формируется человеком на основе **достоверных данных** о **реальных либо модельных** примерах противоборства двух сторон. **Уровень достоверности** таких ИИ определяется уровнем

достоверности критерия близости данных о театре военных действий и правил их ведения противной стороной, то есть в конечном счете **уровнем достоверности модели противной стороны.** Этот показатель является одним из ключевых для оценки эффективности противоборства каждой из сторон. В том числе и оценки эффективности ИИ-решений, разработанных в интересах армии США [26–39], таких как Swarm Forge — инкубатор новых способов войны с использованием ИИ, Agent Network — сеть агентов для автоматизации построения цепочки атак, Ender's Foundry — ИИ-симулятор, который должен опережать в принятии решений как командиров, так и ИИ противника. Digital Twin of the World — цифровой двойник реальности, виртуальная копия планеты, обновляемая в реальном масштабе времени информацией со спутников и БПЛА. ИИ на основе этой виртуальной модели выбирает из миллионов вариантов наиболее слабые места у противника и их атакует.

Сообщается также об интеграции военных версий Grok (xAI) и Gemini (Google) в закрытую сеть GenAI.mil [25]. В этой связи можно предположить, что поскольку архитектуры военных и гражданских версий Grok и Gemini подобны, то отличаться эти версии должны исходными данными и критериями близости, которые формируются на основе этих данных. Причем основное отличие должно состоять в обязательном обосновании достоверности данных, и устойчивости критерия близости для военных систем, и тем самым достоверности военного ИИ-решения.

Заключение

Технологии искусственного интеллекта — это технологии **компьютерного моделирования интеллектуальной деятельности человека** при решении конкретных **практических задач** в промышленности, обороне, энергетике, экономике, здравоохранении, социальной сфере, науке, образовании. **Обоснование** необходимости **разработки и применения** технологий ИИ для решения этих задач, определяется **сравнительной оценкой** экономической эффективности их решения на основе существующих технологий и технологий ИИ. Для технологий ИИ в случае необходимости их разработки должны быть обеспечены **научные обоснования** их существования, адекватности решаемой задаче, реализуемости, понимаемости и устойчивости используемых методов и алгоритмов.

Решение практических задач на основе технологии ИИ — это либо **поиск наиболее близкого их решения** к одному из множества решений, **найденных ранее человеком**, в компьютерной базе данных большого объема, либо построение **множества возможных вариантов продолжения игровой партии** и выбор наиболее близкого к выигрышу варианта по критерию, формируемому также человеком на основе данных о партиях, сыгранных человеком. **Достоверность такого ИИ-решения** этих практических задач обусловлена решением проблемы **создания и наполнения отечественных компьютерных баз данных** множеством возможных решений, **найденных ранее человеком**, и **формирования критерия близости** к этим решениям в **результате интеллектуальной деятельности** отечественных специалистов в данной практической области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Senate Bipartisan Bill Proposes US Access to Advanced AI Chips. *ExecutiveGov*. Режим доступа: https://www.executivegov.com/articles/senate-bill-us-ai-chip-access (дата обращения: 23.06.2026).
2. The GAIN AI Act Made Its Way into the Senate's Final National Defense Authorization Act Text. *Nextgov*. 2025. Режим доступа: https://www.nextgov.com/artificial-intelligence/2025/10/ai-export-control-bill-passes-senate-ndaa-amendment/408762/ (дата обращения: 23.06.2026).
3. What We Know About Energy Use at US Data Centers. *Business Journal Daily*. Режим доступа: https://businessjournaldaily.com/what-we-know-about-energy-use-at-us-data-centers/ (дата обращения: 23.06.2026).
4. Americans Concerned about Rising Electricity Costs Due to AI. *Forklog*. Режим доступа: https://forklog.com/en/americans-concerned-about-rising-electricity-costs-due-to-ai/ (дата обращения: 23.06.2026).

5. Small Modular Reactors (SMRs) as the Energy Backbone of AI Infrastructure: A High-Conviction Investment Theme for 2026–2030. *AInvest*. Режим доступа: https://www.ainvest.com/news/small-modular-reactors-smrs-energy-backbone-ai-infrastructure-high-conviction-investment-theme-2026-2030-2512/ (дата обращения: 23.06.2026).
6. Will We Run out of Data? Limits of LLM Scaling Based on Human-Generated Data. *Epoch AI*. Режим доступа: https://epoch.ai/blog/will-we-run-out-of-data-limits-of-llm-scaling-based-on-human-generated-data (дата обращения: 23.06.2026).
7. Elon Musk Says All Human Data Has Been Exhausted for AI Training. *Proactive Investors*. Режим доступа: https://www.proactiveinvestors.com/companies/news/1064074/elon-musk-says-all-human-data-has-been-exhausted-for-ai-training-1064074.html (дата обращения: 23.06.2026).
8. Open-AI co-founder Ilya Sutskever: Peak Data is Here and the End of Pre-Training is Nigh. *Machine.news*. Режим доступа: https://www.machine.news/ilya-sutskever-peak-data-ai-openai/ (дата обращения: 23.06.2026).
9. AI Exchanges: The Role of Data. *Goldman Sachs*. Режим доступа: https://www.goldmansachs.com/insights/goldman-sachs-exchanges/ai-exchanges-the-role-of-data (дата обращения: 23.06.2026).
10. Sama Says the Age of Giant AI Models is Already Over. *LessWrong*. Режим доступа: https://www.lesswrong.com/posts/ndzqjR8z8X99TEa4E/sama-says-the-age-of-giant-ai-models-is-already-over (дата обращения: 23.06.2026).
11. Ilya Sutskever Announces End of AI Scaling Era, Signaling Industry Pivot to Research. *Edgen Tech*. Режим доступа: https://www.edgen.tech/news/stock/ilya-sutskever-announces-end-of-ai-scaling-era-signaling-industry-pivot-to-research (дата обращения: 23.06.2026).
12. Google DeepMind CEO Demis Hassabis Makes His Stand Clear on AI Scaling. *The Times of India*. Режим доступа: https://timesofindia.indiatimes.com/technology/tech-news/google-deepmind-ceo-demis-hassabis-makes-his-stand-clear-on-ai-scaling/articleshow/125828951.cms (дата обращения: 23.06.2026).
13. DRAM Shortage 2026: 70% Price Surge, No Relief Until 2028. *ByteIota*. Режим доступа: https://byteiota.com/dram-shortage-2026-70-price-surge-no-relief-until-2028/ (дата обращения: 23.06.2026).
14. В 2026 году рынок памяти переживает настоящий бум, который многие называют суперциклом, и в центре всего — искусственный интеллект. *GadgetBot*. Режим доступа: https://gadgetbot.ru/news/829-v-2026-godu-rynok-pamjati-perezhivaet-nastojaschij-bum-kotoryj-mnogie-nazyvajut-superciklom-i-v-centre-vsego-iskusstvennyj-intellekt.html (дата обращения: 23.06.2026).
15. ЦОД будут потреблять 70% памяти в 2026 году: дефицит ударит по авто и электронике. *ITC.ua*. Режим доступа: https://itc.ua/news/tsod-budut-potreblyat-70-pamyaty-v-2026-godu-defytsyt-udaryt-po-avto-y-elektronyke/ (дата обращения: 23.06.2026).
16. Цены на DDR5 в Европе вышли из-под контроля: за полгода память подорожала почти в 4,5 раза. *iXBT.com*. 2026. Режим доступа: https://www.ixbt.com/news/2026/01/18/ddr5-4-5.html (дата обращения: 23.06.2026).
17. Memory Shortages to Last till at Least Q4 2027, Higher Prices Expected throughout 2026-2027, 256 GB DDR4 Kits Retail for over $3000, Entry-Level DDR5 32 GB Kits over $300. *Wccftech*. Режим доступа: https://wccftech.com/memory-ddr5-ddr4-shortages-last-till-q4-2027-higher-prices-throughout-2026/ (дата обращения: 23.06.2026).
18. В 2026 году ожидается дефицит оперативной памяти из-за спроса на ИИ — цены на DDR5 уже выросли в 2-3 раза. *Comss.ru*. Режим доступа: https://www.comss.ru/page.php?id=18665 (дата обращения: 23.06.2026).
19. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. *Методы решения некорректных задач*. Москва: Наука; 1986. 200 с.
20. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Математические задачи, связанные с искусственным интеллектом и искусственными нейронными сетями. *Успехи кибернетики*. 2021;2(4):6–14. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-4-1.
21. Данфорд Н., Шварц Дж. Т. *Линейные операторы. Общая теория. Т. 1* / пер. с англ. Москва:

Изд-во иностранной литературы; 1962.
22. Гавриленко Т. В., Галкин В. А. Интуитивные логические системы и их приложения в технологиях искусственного интеллекта. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):8–16. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-01.
23. US Army Launches AI, Machine Learning Career Path for Officers. *Military AI*. Режим доступа: https://militaryai.ai/us-army-ai-career-path-2/ (дата обращения: 23.06.2026).
24. Pentagon Expands Grok AI into Classified Systems Despite Rising Scrutiny Outside US. *Interesting Engineering*. Режим доступа: https://interestingengineering.com/ai-robotics/pentagon-grok-ai-classified-networks (дата обращения: 23.06.2026).
25. Pentagon is Embracing Musk's Grok AI Chatbot as it Draws Global Outcry. *NPR*. 2026. Режим доступа: https://www.npr.org/2026/01/13/nx-s1-5675781/pentagon-musks-grok-ai-chatbot-global-outcry (дата обращения: 23.06.2026).
26. Remarks by Secretary of War Pete Hegseth at SpaceX. *U.S. Department of War*. Режим доступа: https://www.war.gov/News/Transcripts/Transcript/Article/4377190/remarks-by-secretary-of-war-pete-hegseth-at-spacex/ (дата обращения: 23.06.2026).
27. War Department Launches AI Acceleration Strategy to Secure American Military AI Dominance. *U.S. Department of War*. Режим доступа: https://www.war.gov/News/Releases/Release/Article/4376420/war-department-launches-ai-acceleration-strategy-to-secure-american-military-ai/ (дата обращения: 23.06.2026).
28. Pentagon Rolls out Major Reforms of R&D, AI. *Breaking Defense*. 2026. Режим доступа: https://breakingdefense.com/2026/01/pentagon-rolls-out-major-reforms-of-rd-ai/ (дата обращения: 23.06.2026).
29. Overhauling the Innovation Ecosystem. *Defense Acquisition*. Режим доступа: https://defenseacquisition.substack.com/p/innovation-ecosystem (дата обращения: 23.06.2026).
30. Auterion Demonstrates One-Operator Drone Swarm Strike in U.S. Live-Fire Test. *Inside Unmanned Systems*. Режим доступа: https://insideunmannedsystems.com/auterion-demonstrates-one-operator-drone-swarm-strike-in-u-s-live-fire-test/ (дата обращения: 23.06.2026).
31. War Department Unveils Bold AI Strategy to Cement U.S. Military Dominance. *St. Louis Guardian*. Режим доступа: https://slguardian.org/war-department-unveils-bold-ai-strategy-to-cement-u-s-military-dominance/ (дата обращения: 23.06.2026).
32. JADC2, Project Maven и роль ИИ в ситуационной осведомленности. *Breaking Defense*. 2024–2025. Режим доступа: https://www.breakingdefense.com (дата обращения: 23.06.2026).
33. NGA to Build 'Digital Twin' of the Earth for AI and Warfighters. *Defense One*. 2025. Режим доступа: https://www.defenseone.com (дата обращения: 23.06.2026).
34. How the US Military is Using Digital Twins to Test Its AI. *C4ISRNET*. 2024. Режим доступа: https://www.c4isrnet.com (дата обращения: 23.06.2026).
35. The Pentagon's Plan for an AI-Powered Logistics Future. *Task & Purpose*. 2025. Режим доступа: https://www.taskandpurpose.com (дата обращения: 23.06.2026).
36. Программы по моделированию реальности и автономным системам (BlackSTAKE). *DARPA*. Режим доступа: https://www.darpa.mil (дата обращения: 23.06.2026).
37. Coming AI-Driven Economy Will Sell Your Decisions before You Take Them, Researchers Warn. *University of Cambridge*. Режим доступа: https://www.cam.ac.uk/research/news/coming-ai-driven-economy-will-sell-your-decisions-before-you-take-them-researchers-warn (дата обращения: 23.06.2026).
38. 'Personality Test' Shows How AI Chatbots Mimic Human Traits — and How They Can Be Manipulated. *University of Cambridge*. Режим доступа: https://www.cam.ac.uk/external-affiliations/google-deepmind (дата обращения: 23.06.2026).
39. Paul Nakasone Joins OpenAI Board. *GovConWire*. Режим доступа: https://www.govconwire.com/articles/paul-nakasone-joins-openai-board (дата обращения: 23.06.2026).
40. Нейросети сломали интернет: проект по изучению языка закрыт. *Arbat Media*. Режим доступа: https://arbatmedia.kz/mir/neiroseti-slomali-internet-proekt-po-izuceniyu-yazyka-zakryt-6586 (дата обращения: 23.06.2026).
41. AI Translation Trends 2026. *TextUnited*. Режим доступа: https://www.textunited.com/en/blog

/ai-translation-trends-2026 (дата обращения: 23.06.2026).
42. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Квантовая механика*. М., 1972.
43. Фейнман Р. *КЭД — странная теория света и вещества*. М., 1985.
44. Галкин В. А. О выборе классов корректности. *Успехи кибернетики*. 2025;6(1):12–15.

ОБРАЗОВАНИЕ. РОЛЬ ГОСУДАРСТВА, ОБЩЕСТВА, ЛИЧНОСТИ

А. Л. Семенов[1,2,3,а], **Т. А. Рудченко**[3,б]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

[2] *Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

[3] *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*

[а] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1785-2387, alexei.semenov@math.msu.ru*

[б] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4595-1072,* ✍ *rudchenko1@yandex.ru*

Аннотация: статья посвящена анализу образовательных идей, представленных в монографии Е. П. Велихова, В. Б. Бетелина и А. Г. Кушниренко, а также роли Владимира Борисовича Бетелина в развитии отечественной информатики, вычислительной техники и системы подготовки научно-технических кадров. На основе материалов монографии, исторических источников и личных воспоминаний авторов рассматривается эволюция российского школьного и инженерного образования в контексте задач научно-технологического развития страны. В статье также изучается исторический опыт советских образовательных реформ и их роль в формировании массовой системы подготовки инженерных, научных и педагогических кадров. Особое внимание уделяется введению школьного курса информатики в 1980-е годы и его значению для развития отечественного образования.

Рассматривается взаимосвязь государственной политики, научного сообщества и образовательных институтов в формировании кадрового потенциала для развития кибернетики, вычислительной техники и высокотехнологичной промышленности. Анализируется становление системы математических кружков, специализированных физико-математических школ, олимпиадного движения и школьной информатики как важнейших элементов подготовки будущих инженеров, программистов и исследователей. В этом контексте затрагиваются идеи В. Б. Бетелина, связанные с ролью образования в научно-технологическом развитии страны и подготовкой кадров для сферы вычислительной техники, информатики и высокотехнологичной промышленности.

Ключевые слова: кибернетика, информатика, вычислительная техника, школьная информатика, инженерное образование, математическое образование, образовательная политика, научно-технологическое развитие, академик В. Б. Бетелин, технологический суверенитет, физико-математические школы, подготовка научно-технических кадров.

Для цитирования: Семенов А. Л., Рудченко Т. А. Образование. Роль государства, общества, личности. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):31–40.

Поступила в редакцию: 21.05.2026. В окончательном варианте: 21.06.2026.

EDUCATION: THE CONTRIBUTION OF THE GOVERNMENT, SOCIETY, AND THE INDIVIDUAL

A. L. Semenov[1,2,3,a], **T. A. Rudchenko**[3,b]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[2] *Herzen University, Saint Petersburg, Russian Federation*

[3] *Computer Science and Control Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[a] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1785-2387, alexei.semenov@math.msu.ru*

[b] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4595-1072,* ✍ *rudchenko1@yandex.ru*

Abstract: we analyzed the educational ideas presented in the monograph by E. P. Velikhov, V. B. Betelin, and A. G. Kushnirenko and examined Prof. Vladimir Betelin's contribution to the development of Russian computer science, computer engineering, and the system for training scientific and engineering personnel. Drawing on the monograph, historical sources, and our personal recollections, we studied the evolution of school and engineering education in Russia in the context of

the country's scientific and technological development. We also examined the historical experience of Soviet educational reforms and their role in shaping a mass system for training engineers, scientists, and teachers. Particular attention was paid to the introduction of computer science into the school curriculum in the 1980s and its significance for the development of computer science education in Russia. We examined the relationship between government policy, the scientific community, and educational institutions in developing the human resources required for advances in cybernetics, computer engineering, and high-technology industries. We analyzed the emergence and development of mathematical clubs, specialized physics-and-mathematics schools, academic competitions, and school computer science as key components of the system for preparing future engineers, programmers, and researchers. We also considered V. B. Betelin's views on the role of education in the country's scientific and technological development and in training specialists for computer engineering, computer science, and high-technology industries.

Keywords: cybernetics, computer science, computer engineering, computer science in schools, engineering education, mathematical education, educational policy, scientific and technological development, Prof. Vladimir Betelin, technological sovereignty, physics and mathematics schools, scientific and technical workforce education.

Cite this article: Semenov A. L., Rudchenko T. A. Education: The Contribution of the Government, Society, and the Individual. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):31–40.

Original article submitted: 21.05.2026. *Revision submitted: 21.06.2026.*

Посвящается Владимиру Борисовичу Бетелину

В 2009 году вышла не очень объемная, но очень важная книга «Промышленность, инновации, образование и наука в России» [1] (далее — Монография). Основная мысль Монографии состоит в необходимости принятия государством ответственности за плановое, программное финансирование соответствующих областей жизни общества. Это относится не только к образованию, но и, в первую очередь, к научным исследованиям и высокотехнологичным отраслям производства; сегодня это стало еще более актуальным. В настоящей работе мы анализируем малую часть содержащихся в Монографии положений — именно относящихся к образованию, в первую очередь, общему (школьному). Мы сопоставляем их с другими источниками, автобиографическими материалами авторов.

Нам посчастливилось работать вместе с авторами Монографии, вместе участвовать в процессе цифровой трансформации (компьютеризации, информатизации) отечественного общего образования. Именно школьным образованием мы занимались в течение ряда десятилетий и можем дополнить картину, представленную в Монографии.

Образовательная проблематика, хотя и рассматривается в Монографии как ключевая во всем комплексе проблем, но ей посвящено там не так уж много страниц. Из этих страниц самые важные, естественно, — об инженерном образовании; к инженерному образованию мы вернемся в последней части статьи.

Далее мы анализируем, уточняем и комментируем ряд положений Монографии.

Отмена отметок в образовательной политике государства. Отмена отмены — единая индустриальная школа

Монография указывает в качестве вопиющего дефекта политики в области образования 1920-х гг. отмену отметок и экзаменов. Кончено, отмена, связываемая с именем министра просвещения Анатолия Васильевича Луначарского, не была просто бездумным педагогическим экспериментом. Важная экспериментальная работа в области педагогики и психологии в те годы велась, но это — другой вопрос. Отмена отметок тогда была вызвана представлениями власти о приоритетности воспитания, формирования нового человека перед учебными результатами. Другой причиной было то, что отметка была очевидным инструментом влияния учителя на ребенка. Учительство в своей массе справедливо рассматривалось властью как находящееся в оппозиции к ней, как и все люди непролетарского происхождения. Все это происходило в ситуации гражданской войны и разрухи в стране, когда политические приоритеты диктовали действия в экономике

и образовании. Отменивший отметки Луначарский в 1920 году жаловался товарищам по партии, что на один карандаш приходится 60 учащихся, а одна чернильница — на 100 учащихся. По данным Северо-Кавказского краевого отдела народного образования, в 1928 году 37% учащихся школ первой ступени жаловались на постоянные избиения со стороны родителей. В школе при московском заводе «Серп и молот» 100% учащихся жаловались на побои, 65% из них говорили, что их били «чем попало» [2].

Что же происходило в начавшийся после этого восстановительный период?

С 1927 по 1933 г. число учащихся общеобразовательных школ возрастает с 1 600 тыс. до 21 400 тыс. Такой принципиальный скачок был результатом не только объявленной, но и реализованной политики власти. Сталин, выступая на XVI Съезде ВКП(б) в июне 1930 г., сказал: *«Что касается культурного положения рабочих и крестьян, то и в этой области имеем некоторые достижения, которые, однако, ни в коем случае не могут нас удовлетворить ввиду их незначительности. < ... > Все это дало возможность довести процент грамотности по СССР до 62.6 % против 33 % в довоенное время. Главное теперь — перейти на общеобязательное первоначальное обучение. Я говорю «главное», так как такой переход означал бы решающий шаг в деле культурной революции. До сего времени мы вынуждены были экономить на всем, даже на школах, для того, чтобы спасти, восстановить тяжелую промышленность. За последнее время, однако, мы уже восстановили тяжелую промышленность и двигаем ее дальше. Следовательно, настало время, когда мы должны взяться за полное осуществление всеобщего обязательного первоначального образования. Я думаю, что съезд поступит правильно, если он примет на этот счет определенное и совершенно категорическое решение».*

За Съездом последовал ряд директивных решений: постановлением ЦИК и СНК СССР 1930 г. «О всеобщем обязательном начальном обучении» было введено всеобщее обязательное начальное обучение детей в возрасте 8–10 лет, а в городах, фабрично-заводских районах и рабочих поселках — всеобщее обязательное 7-летнее обучение. Постановлениями ЦК ВКП(б) 1931 г. «О начальной и средней школе» и 1932 г. «Об учебных программах и режиме в начальной и средней школе» определялось, что «основной формой организации учебной работы в начальной и средней школе должен являться урок с данной группой учащихся, со строго определенным расписанием занятий и твердым составом учащихся». Постановление ЦК ВКП(б) 1933 г. «Об учебниках для начальной и средней школы» устанавливало единые («стабильные») учебники. Постановление СНК СССР и ЦК ВКП(б) 1934 г. «О структуре начальной и средней школы в СССР» устанавливало три типа общеобразовательных школ: начальная (1–4 классы), неполная средняя (1–7 классы) и средняя (1–10 классы) [3].

Наконец, наиболее полная и всесторонняя система регламентации школы была установлена 3 сентября 1935 года, когда вышло совместное постановление СНК СССР и ЦК ВКП(б) «Об организации учебной работы и внутреннем распорядке в начальной, неполной средней и средней школе». Там, в частности, говорилось о введении пятибалльной системы оценивания 1) очень плохо; 2) плохо; 3) посредственно; 4) хорошо и 5) отлично, которая фактически реализовывалась как четырехбалльная, что и было закреплено в 1944 г. [4].

Таким образом, именно властью, государством была выстроена унифицированная система школьного образования. И это было единственной возможностью достичь того роста количества учащихся в стране, с упоминания которого мы начали.

Какова роль указанных реформ общего образования в построении системы инженерного образования, наиболее важной в перспективе Монографии? Видимо, инженерное образование в СССР, пережившее исторические катаклизмы внутри страны и упомянутый в Монографии отъезд 3000 специалистов за рубеж, восстанавливалось, прежде всего, за счет людей с дореволюционным образованием, дореволюционных традиций образования, а также определенного взаимодействия с лучшими зарубежными вузами. Реформы же среднего образования, как и политические установки власти на индустриализацию, обеспечили для втузов поток абитуриентов, среди которых были и природные таланты, и ребята, уже как-то связанные с технологией в промышленных городах, и выпускники замечательных учителей (большинство из квалифицированных учителей получило образование еще до революции). При этом министерство просвещения (Наркомпрос) постоянно фиксировало массовое несоответствие работы школы многим вполне разумным про-

возглашаемым принципам. Сами математики видели, что реальные результаты школы в обучении математике бесконечно далеки от желаемого.

В 1938–1940 гг. кабинетом математики НИИ школ Наркомпроса руководил А. Я. Хинчин. В работе [5], написанной, по мнению Б. В. Гнеденко, в 1938–1939 гг. [6], но опубликованной только в 1961 г., Хинчин отмечает: *«Как-то мне пришлось спросить несколько опытных учителей пятых классов о том, какой примерно процент учащихся действительно научается решать арифметические задачи, не являющиеся простыми вычислительными примерами, т. е. такие, где способ решения, как бы прост он ни был, должен быть найден самим учащимся. Из всех опрошенных мною учителей только один утверждал, что этому искусству удается научить до 15% учащихся; все другие говорили, что лишь отдельные учащиеся овладевают этим искусством, а некоторые даже заявляли, что «этому вообще научить невозможно». Конечно, решив целый ряд совершенно однотипных задач, ученик без труда решит задачу в точности того же типа (этим объясняется отсутствие сплошных провалов на экзаменах и контрольных работах); но добиться, чтобы ученик самостоятельно нашел решение задачи нового, хотя бы и очень простого типа, — это, по единодушному мнению учителей, есть дело, удающееся только в самых исключительных случаях.*

Описывая всю эту тяжелую ситуацию, я думаю, что не очень сгустил краски. Если в отдельных случаях дети все же научаются решать задачи, интуитивно отличают правильное рассуждение от ложного, находят в этих упражнениях ума здоровое удовольствие и в конечном счете действительно развивают свою сообразительность, то такие исключения способны только подтвердить печальное общее правило».

Еще один математик, Игорь Владимирович Арнольд, отец Владимира Игоревича Арнольда, член-корреспондент Академии педагогических наук, автор известных учебников, в том числе по арифметике, пишет (опубликовано в 1946 г.) [7]: «*Учеников — в том или ином порядке — знакомят с соответствующими «типами» задач, причем обучение решению задач сплошь и рядом сводится к «натаскиванию», к пассивному запоминанию учениками небольшого количества стандартных примеров решения и узнаванию по тем или иным признакам, какой из них надо применить в том или ином случае. Количество задач, которые ученики решают действительно самостоятельно, с тем напряжением мысли, которое и должно являться источником полезности процесса решения задачи, ничтожно. В итоге — полная беспомощность и неспособность ориентироваться в самых простых арифметических ситуациях, при решении чисто практических задач».*

Одновременно математики были недовольны качеством предлагаемых массовых учебников. Приведем выдержки из резолюции декабрьской сессии 1936 г. Группы математики Академии наук СССР, которая была специально посвящена вопросам преподавания математики в начальной, средней и высшей школах [8]: *«Озабоченная общим состоянием математического образования в стране группа < . . . > вынесла следующее постановление:*

А. По начальной и средней школе:

1. При наличии общего подъема работы начальной и средней школы (в последние годы) постановка преподавания математики остается еще совершенно неудовлетворительной < . . . >

2. Причинами такого положения вещей являются: < . . . >

а) полная непригодность некоторых стабильных учебников и многочисленные недостатки остальных;

б) неудовлетворительное руководство со стороны той группы методических и организационных работников, которой Наркомпросом доверено математическое образование в начальной и средней школе страны. < . . . >

3. < . . . > вопиющее положение вещей со стабильным учебником геометрии. Учебник Гангуса и Гурвица совершенно неграмотен и в математическом, и в логическом отношении, и даже в отношении языка. Он не способен научить учащихся логически мыслить < . . . > Затем безграмотный учебник Попова представляет собой в лучшем случае пустое место. < . . . >

Большое значение имеет полная непригодность задачников по арифметике Поповой и Березанской. Они по существу являются не задачниками, а «примерниками», но даже и подбор примеров в них явно недостаточен для создания навыков в счете.

< . . . >

5. Группа математики Академии наук СССР надеется, что Наркомпрос сделает все необходимые организационные выводы из сказанного выше и виновные в грубых ошибках в области руководства начальной и средней школы будут заменены людьми, способными справиться с огромными задачами, стоящими перед советской школой. < . . . >

Группа выражает уверенность в том, что соединенными усилиями < . . . > *удастся в течение ближайшего времени значительно повысить тонус преподавания математики в массовой школе в соответствии с грандиозным ростом социалистической культуры в нашей стране».*

Откуда же брались будущие выдающиеся инженеры и математики и будущие учителя, способные их подготовить? Конечно, какое-то их количество приходило из школ, где сами учителя пытались достичь чего-то большего, выйти за пределы выученных алгоритмов индустриальной школы.

Общественное расширение единой государственной школы

Другую возможность выхода за эти пределы тогда же, когда были приняты указанные директивные постановления, реализовали математики университетов и НИИ. За пределами унифицированной школы они построили систему математических кружков и олимпиад, в первую очередь — на базе университетов. Поддержка власти сказалась в том, что кружки могли идти в системе дополнительного образования детей — домах (и дворцах) пионеров и школьников, в школе — вне основной программы.

На рубеже 1950-х гг. власть, в лице, прежде всего, Н. С. Хрущева, озаботилась проблемами средней школы. При этом основной проблемой считалась оторванность школы от непосредственного производства, а не от нужд системы инженерного образования. Выпускники школ должны были обладать непосредственными техническими навыками: токаря, машинистки и да — «оператора ЭВМ». Для этого к сроку обучения в школе был добавлен 1 год: школа из десятилетки стала одиннадцатилеткой. Этим нововведением воспользовались математики, в том числе те, у кого дети учились в школе. Они указали руководителям образования, что подготовка программистов, ну, скажем, «операторов ЭВМ», требует математических знаний. (Соответственно, подготовка лаборанта санэпиднадзора требует знаний в области химии и биологии, но мы пишем про то, что знаем непосредственно.) Первым, кто совместил эти два представления и два направления образовательной программы, был Семен Исаакович Шварцбурд в московской школе № 444 (изначально — № 425). В первом выпуске этой программы был будущий математик и программист А. Г. Кушниренко — см. его воспоминания [9].

Чуть позднее, начиная с 1962 г., ведущие математики страны, поддержанные физиками и другими учеными, предложили еще одну образовательную модель, где интересы высокой науки уже не прикрывались «производственным обучением». Усилиями М. А. Лаврентьева была создана ФМШ при Новосибирском госуниверситете, усилиями А. Н. Колмогорова — ФМШ при МГУ и еще две ФМШ — при Ленинградском и Киевском университетах. Вышли соответствующие правительственные документы.

Если вернуться в Москву, то мы видим, что здесь, следом за школой № 444, видные математики реализовали описанную модель в школах № 7 и № 2, затем еще в паре десятков школ Москвы, где исходные лидеры, конечно, уже не участвовали, но созданная модель и разработанные материалы использовались. В седьмой школе это была инициатива А. С. Кронрода, одного из последних учеников знаменитой школы Н. Н. Лузина. Для реализации плана Кронрод привлек своего аспиранта — Н. Н. Константинова и таких же, как он, математиков и программистов — Г. М. Адельсон-Вельского и др. Важную роль здесь играл и упомянутый фактор образования для собственных детей. Константинов создал целую систему образования, совершенно новую для основной (не дополнительной!) образовательной программы (даже неважно, что математического). В этой системе учащиеся доходили до результата своим умом — доказывали теоремы, создавали программы. Учителя — профессиональные математики, аспиранты, студенты — только помогали школьникам в этом. Диалектическим образом практическая реализация системы Константинова, как правило, в конкретных школах, по существу, *отказывалась от отметок* — при необходимости они выставлялись в журнал чисто формально.

Отражение процессов развития образования в личной судьбе

Важнейшим позитивным для всего населения страны событием было введение в 1985 г. курса информатики во всех школах. Решение об этом оказалось чуть ли не первым принятым новым молодым руководителем — М. С. Горбачевым, через пару недель после его избрания Генеральным секретарем ЦК КПСС. В Монографии сказано о решении на эту тему Политбюро, но основным документом было постановление ЦК КПСС и Совмина СССР [10].

Подготовлено это событие было предшествующей историей развития математического образования в стране. Инициатором всего процесса стал математик и программист А. П. Ершов, избранный академиком в декабре 1984 г. Существенной была поддержка вице-президента АН СССР Е. П. Велихова, близкого к Горбачеву. Авторами первого учебника, пошедшего во все школы страны, были: А. П. Ершов, А. Г. Кушниренко, Г. В. Лебедев, А. Л. Семенов, А. Шень.

Появление нового курса информатики было бы невозможно, если бы не группа программистов из МГУ, которой руководил будущий академик, а тогда — кандидат наук Владимир Борисович Бетелин.

Вера В. Б. Бетелина в будущее отечественного образования и роль информационных технологий в нем вела и к тому, что Владимир Борисович и в дальнейшем поддерживал свою группу. В частности, в Институте системных исследований он создал лабораторию (отдел) учебной информатики. Этот отдел существенно расширил исходный проект информатики в школе: в частности, сегодня учебный комплекс по информатике, разработанный сотрудниками отдела, является важнейшим элементом дошкольного образования, реализуемым в тысячах детских садов России.

Описанные выше процессы замечательным образом отразились на судьбе двух более молодых соавторов Монографии.

Владимир Борисович довольно скептически оценивает свое школьное математическое образование. Вот что он говорит про учебу в 6–7 классе: *«про преподавание моей учительницы математики в 6–7 классе у меня сохранялось такое мнение — «тоска зеленая».* Лишь в старшей, математической школе (№ 320 г. Москвы) ситуация несколько улучшилась: здесь *««притягательной частью» стали уже программирование и электронно-вычислительные машины».* Владимиру Борисовичу повезло, т. к. появление «этой части» началось далеко не во всех школах, а именно в тех, о которых мы говорили выше, и как раз на рубеже 1960-х гг. Но реально важнейшим элементом математического образования для него стал семинар А. С. Кронрода, с участием Г. М. Адельсон-Вельского и других. Именно эти математики «запустили» настоящее математическое образование в Московской школе № 7, которую первый автор статьи закончил в 1967 г., и сразу же начал там преподавать. В параллельном классе с тем, где он учился, настоящую математику преподавал А. Г. Кушниренко — соавтор Монографии и ближайший коллега В. Б. Бетелина в течение последних 50 лет.

В Монографии упоминаются различные элементы «работы с одаренными школьниками» и указано на то, что они в советское время «курировалась Министерством просвещения». При этом необходимо признать, что это курирование, к счастью, мало влияло на реальные процессы: ФМШ, созданные при четырех университетах, финансировались из бюджетов университетов, и это постоянно вызывало проблемы при финансовых проверках; работа студентов в ЗМШ, которые проверяли детские работы, не оплачивалась, а только засчитывалась как общественная (сегодня это точно не удастся воспроизвести); дополнительное финансирование на дополнительных учителей-студентов в матшколах также не выделялось. Эпизодическое вмешательство власти, как правило, было вредоносным: при проверках обнаруживались и карались финансовые, кадровые (отсутствие нужного диплома) и идеологические нарушения.

Популярность русского инженерного образования

В статье В. Б. Бетелина [11] есть такое утверждение: «Авторитет российской системы подготовки инженеров в этот период был столь высок, что президент Бостонского (ныне Массачусетского) университета распространил систему подготовки инженеров Императорского высшего технического училища (ныне Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана) вначале на возглавляемый им университет, а затем и на другие высшие учебные заведения Америки». Это же сказано и в Монографии.

Нам показалось интересным найти первоисточник этого замечательного свидетельства. Скорее всего, речь идет о президенте Массачусетского технологического института Джоне Дэниеле Ранкле (John Daniel Runkle, 1822–1902). Ранкл познакомился с системой практической подготовки, разработанной в Императорском Московском техническом училище (ИМТУ), благодаря международным выставкам 1870-х годов.

По-видимому, речь идет о «русском методе обучения ремеслам», или «методе ИМТУ», разработанном русским инженером-механиком, изобретателем и педагогом Дмитрием Константиновичем Советкиным (1838–1912) [12]. В 1881–1885 гг. Д. К. Советкин был инспектором учебных мастерских ИМТУ. Совместно с группой преподавателей ИМТУ он создал первую научную систему начального профессионального трудового обучения в России, которая легла в основу «метода ИМТУ». Новая система практической подготовки инженеров и механиков была удостоена высокой оценки специалистов и получила международное признание на всероссийских и всемирных выставках в 1860–1900 гг.

В частности, на Всемирной выставке в Филадельфии в 1876 году «русский метод обучения ремеслам» был представлен на экспозиции Императорского Московского технического училища, директором которого тогда был Виктор Карлович Делла-Вос. Скорее всего, именно там Джон Дэниел Ранкл познакомился с разработками Д. К. Советкина и увидел в них перспективную модель инженерного образования. В опубликованном им в 1876 году докладе «The Russian System of Shop-Work Instruction for Engineers and Machinists» [13] Ранкл представил эту систему как принципиально новый подход к инженерному образованию. Его поразило не просто наличие хороших мастерских в ИМТУ. Он считал, что русским удалось решить педагогическую проблему, которую до этого никто не мог решить: как систематически обучать инженерной практике, а не просто отправлять студентов «набивать руку» на производстве.

Ранкл отмечал: «Впервые был разработан метод, благодаря которому владение инструментами можно было преподавать систематически, сохраняя при этом все преимущества, которые обычно связывали с системой ученичества». Именно сочетание этих двух вещей — систематичности обучения и практической направленности — он считал главным достоинством «русской системы». Как пишет Ранкл, «старая система оставляла все на волю случая»: ученик мог проработать несколько лет и так и не освоить многие операции просто потому, что ему не довелось с ними столкнуться. В методе ИМТУ же каждая операция была заранее включена в программу обучения. Ранкл подробно объяснял, что ему понравился принцип разделения учебной и производственной функций мастерской: обучение ведется не ради выпуска продукции, а ради приобретения навыков. Фактически студент изготавливал не товар, а учебные образцы, подобранные так, чтобы освоить определенный прием работы. Ранкл подчеркивал, что именно это отличало московскую систему от традиционного ученичества. Еще одно его наблюдение: каждый учащийся проходил через один и тот же набор упражнений и приобретал одинаковый минимум практических навыков. Это означало стандартизацию подготовки. В американской системе того времени качество практического обучения сильно зависело от конкретного мастера и предприятия. Русская система, по мнению Ранкла, впервые позволила сделать подготовку инженеров предсказуемой и воспроизводимой.

Таким образом, Ранкл увидел в «русской системе» не просто удачный опыт ИМТУ, а решение сразу нескольких проблем инженерного образования XIX века:

- переход от случайного ученичества к систематическому обучению;
- отделение учебных мастерских от производственного процесса;
- последовательное освоение операций — от простого к сложному;
- единый стандарт практической подготовки для всех студентов;
- соединение инженерной теории с реальным опытом работы с материалами и инструментами.

В заключении доклада Ранкл фактически рекомендует эту систему своим коллегам.

В результате этот подход получил известность в США как «русский метод обучения ремеслам» (Russian system of tool instruction). Ранкл стал его активно продвигать в США, организуя его демонстрацию и популяризацию среди американских педагогов и инженеров [14]. Вместе с тем исследователи не утверждают, что эта система была непосредственно внедрена «во всех американских университетах»; речь идет о заметном влиянии на развитие инженерного образования

и ручного обучения в ряде технических учебных заведений. С 1885 г. элементы «русского метода» применялись в следующих учебных заведениях: Королевская школа механических искусств в Комотау, Богемия (Австро-Венгрия); Государственный колледж в Ороно, штат Мэн (США); Факультет механических искусств Университета Пердью (США); Пенсильванский и Вашингтонский университеты (США). Также в США, в Чикаго, Толедо, Балтиморе, Филадельфии и Омахе, были организованы школы по типу Массачусетских [12]. Показательно, что и Тимошенко в своем благожелательном по отношению к русскому инженерному образованию и его истории в XIX в. обзоре «Инженерное образование в России» упоминает ИВТУ, но ничего не говорит о популярности «русского метода» в США в XIX и XX веках [15].

История «русского метода» представляет интерес как свидетельство того, что российская инженерно-педагогическая мысль конца XIX века предложила одну из первых в мире технологий массовой подготовки инженеров, основанную на четко организованном учебном процессе.

Государство и перспективы российской школы

Рецепт «Вернем все в комбинацию 1910 и 1938 гг.» вряд ли стоит реализовывать буквально.

Культ знаний сегодня?

В Монографии вводится понятие «культ знаний», описывающее отношение власти и общества к науке и образованию в советское время, и предлагается в ближайшей перспективе не только вернуть это отношение, но и ввести термин, в советское время распространения не имевший.

«Культ знания» зафиксирован как национальный приоритет Республики Казахстан в статье Президента Республики Н. Назарбаева «Взгляд в будущее: модернизация общественного сознания» [16]. Видимо, надо учесть, как использование этого термина в русскоязычном интернете будет взаимодействовать с казахстанским сектором интернета и изменениями в отношении к Назарбаеву там.

С другой стороны, сегодня в сознании разных категорий населения укореняется во многом справедливое представление о том, что все «знания» уже есть в библиотеках, в интернете, который эти библиотеки охватывает, и в творческом ИИ, который питается всем этим. Поэтому сегодня, возможно, стоит говорить не о «культе знаний» а об «уважении к знающему»? На основе такого уважения можно будет выстраивать уважение к школе и вузу, престиж учителя. Но, конечно, в полном объеме на это потребуются десятилетия.

Проблемы школьной системы в целом

Государство экономически выразило свое уважительное отношение к учителю в майском (2012 г.) указе Президента РФ о зарплате учителя не ниже средней зарплаты по региону. (Можно еще раз вспомнить слова Ленина об улучшении экономического положения учителя.) При этом важен и конкретный рост зарплаты учителя, и повышение престижа профессии учителя в обществе, из которого вытекает разрушение механизма двойного негативного отбора — при поступлении в педагогический вуз и выборе места работы после такого вуза.

Трактовка данного указа органами управления образованием и школами состоит в том, что учитывается средняя зарплата учителя как физического лица. Поэтому наряду с ростом финансирования школ идут процессы: сокращения количества учителей и рост педагогической нагрузки на учителя — вместо обусловленных законодательством 18 часов, нагрузка может превосходить 40 часов; а также процессы жесткого сокращения «не учителей» — психологов, логопедов, библиотекарей, совместителей из вузов, которые ведут небольшую, хотя и важную для школы нагрузку. Естественно, это ведет и к снижению качества педагогического труда, и к снижению уважения к этому труду со стороны всех участников образовательного процесса.

Естественно было бы для государства пытаться исправить дело, переходя к показателю зарплаты на одну ставку учителя. Однако во многих регионах такой переход приведет к немедленному нарушению майского указа. Выход может состоять в постепенном введении регрессивной шкалы оплаты за сверхнормативные часы. Тогда учителю будет невыгодно брать дополнительные часы (а директору не будет смысла их учителю навязывать), школы начнут постепенно отходить

от такой практики, а органы управления образованием постепенно начнут снижать давление на школы и добиваться роста финансирования.

Проблемы нестандартных школ и развития системы

Жесткое государственное управление и унификация школьного образования — введение единого государственного учебника, укрупнение школ и пр. — позволяет двигаться в направлении повсеместного достижения минимума, определяемого вчерашними потребностями и положением дел.

Остается вопрос о том, как государству поддержать школы, делающие что-то важное для будущего, или хотя бы как этим школам не мешать. Еще один вопрос: как нести в школы элементы нового содержания образования и методов учения. Этот вопрос оказывается за рамками внимания Монографии, как и за рамками многих обсуждений образовательной проблематики в среде профессиональных математиков (а также бизнесменов, политиков и пр.).

Многие решения здесь также были найдены еще в советское время. Например, в то время экспертизу будущих учебников проводило корпоративное сообщество, оформляемое в виде совета при Министерстве просвещения. Совет в существенной части состоял из авторов существующих учебников и тем не менее квалифицированно поддерживал новое. Матшколы послужили моделью для школ с углубленным изучением отдельных предметов (прежде всего, иностранных языков).

Начиная с середины 1980-х гг. в российском образовании расширялся спектр реализуемых моделей, учебной литературы. Сейчас основная линия Министерства просвещения — сужение и регламентация. Решение, которое было единственно возможным в 1930-е гг., сегодня выглядит далеко не очевидным.

Заключение

Авторы Монографии сосредоточились на роли государства в истории России как научно-технологической сверхдержавы. При этом они сами и их деятельность наглядно демонстрируют важность профессионального сообщества и конкретных его представителей в развитии страны.

Видимо, именно сочетание этих факторов как необходимое условие будущего научно-технологического развития страны и есть тот урок, который можно извлечь из Монографии, написанной выдающимися учеными России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Велихов Е. П., Бетелин В. Б., Кушниренко А. Г. *Промышленность, инновации, образование и наука в России* / Российская академия наук, Научно-исследовательский институт системных исследований. М.: Наука; 2009. 140 с. ISBN 978-5-02-037088-3.
2. Простаков С. Как была устроена советская школа двадцатых годов. Ликвидация безграмотности и невиданные эксперименты в сфере образования. *Мел.* Режим доступа: https://mel.fm/zhizn/istorii/9348127-school_twenties.
3. *Коммунистическая партия Советского Союза в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК (1898–1986).* Ин-т марксизма-ленинизма при ЦК КПСС. 9-е изд., испр. и доп. М.: Политиздат; 1983–1990. Режим доступа: https://archive.org/details/KPSS_v_rezoliutciiakh_i_resheniiakh_syezdov_konferentciy_i_plenumov_TCK_1898_1986/.
4. Лебедева М. В. Реформа советской школы 1930–34 годов в зеркале становления отечественной психологии. *Психологическая наука и образование.* 2012;17(3):88–104. Режим доступа: https://psyjournals.ru/journals/pse/archive/2012_n3/54333.
5. Хинчин А. Я. О так называемых «задачах на соображение» в курсе арифметики. *Математическое просвещение.* 1961;2(6):29–36. Режим доступа: https://www.mathedu.ru/text/mp_1961_v6/p30/.
6. Гнеденко Б. В. Александр Яковлевич Хинчин. *Математическое просвещение.* 1961;2(6):3–6. Режим доступа: https://www.mathedu.ru/text/mp_1961_v6/p2/.
7. Арнольд И. В. Принципы отбора и составления арифметических задач. *Известия АПН РСФСР.* 1946;6:8–28. Режим доступа: https://math.ru/lib/files/iva46.htm.
8. Резолюция Группы математики Академии наук СССР по вопросам преподавания математики. *Высшая школа.* 1937;2:78–81.

9. Кушниренко А. Г. Создание С. И. Шварцбурдом московской математической школы 425. *Математическое просвещение. Третья серия.* 2022;30:52–63. Режим доступа: https://www.mathedu.ru/text/mp_2023_v30/p52/.
10. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 28 марта 1985 года № 271 «О мерах по обеспечению компьютерной грамотности учащихся средних учебных заведений и широкого внедрения электронно-вычислительной техники в учебный процесс». *Вопросы образования.* 2005;3:341–346.
11. Бетелин В. Б. Мы инженеры. *Российская академия наук.* Режим доступа: https://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=f68ce510-1fcf-4364-ae88-e0b16feaf44a.
12. Советкин, Дмитрий Константинович. *Википедия.* Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Советкин,_Дмитрий_Константинович.
13. Runkle J. D. *The Russian System of Shop-Work Instruction for Engineers and Machinists* Boston: Press of A. A. Kingman; 1876. Режим доступа: https://dome.mit.edu/handle/1721.3/189654.
14. Pannabecker J. R. For a History of Technology Education: Contexts, Systems, and Narratives. *Journal of Technology Education.* 1995;7(1):43–56.
15. Тимошенко С. П. *Инженерное образование в России* / пер. с англ. В. И. Иванова-Дятлова, под ред. Н. Н. Шапошникова. Люберцы: ПИК. ВИНИТИ; 1997.
16. Назарбаев Н. Взгляд в будущее: модернизация общественного сознания. *Официальный сайт Президента Республики Казахстан.* Режим доступа: https://www.akorda.kz/ru/events/akorda_news/press_conferences/statya-glavy-gosudarstva-vzglyad-v-budushchee-modernizaciya-obshchestvennogo-soznaniya.

КОНЦЕПЦИЯ ПЛАТФОРМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПРИКЛАДНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Р. Д. Гимранов[1,а], **В. А. Галкин**[2,3,б], **Т. В. Гавриленко**[2,3,в], **Д. А. Моргун**[2,г], **М. Т. Гавриленко**[2,3,д], **М. Е. Амелин**[2,3,е], **С. А. Батуро**[2,3,жс], **А. И. Грюнталь**[4,з]

[1] *ПАО «Сургутнефтегаз», г. Сургут, Российская Федерация*

[2] *Сургутский филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация*

[3] *Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*

[4] *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация*

[а] *gimranov_rd@mail.ru,* [б] *val-gal@yandex.ru,* [в] *taras_gavrilenko@office.niisi.tech,*

[г] ✍ *morgun_da@office.niisi.tech,* [д] *gavrilenko.michail.t@office.niisi.tech,*

[е] *amelin_me@office.niisi.tech,* [жс] *baturo_sa@office.niisi.tech,* [з] *grntl@niisi.ras.ru*

Аннотация: в статье представлена концепция low-code/no-code платформы автоматизации построения прикладных систем управления технологическими процессами нефтегазовой отрасли на основе онтологического моделирования. Проведен сравнительный анализ методологий (Methontology, On-To-Knowledge, подход Грубера, BORO) и языков описания онтологий (RDF, RDFS, OWL, KIF, CycL, Gellish) с обоснованием выбора OWL и инструментальной среды Protégé. Описана пятиуровневая иерархическая архитектура платформы, охватывающая физические устройства, контроллеры, обработку данных, визуализацию и бизнес-логику. Рассмотрен обобщенный алгоритм функционирования платформы: последовательная трансформация онтологических моделей через BPMN- и DFD-диаграммы к метаописанию проекта и итоговому программному коду. Сформулированы базовые требования к концепции, включая поддержку отечественных низкопроизводительных вычислительных систем.

Ключевые слова: онтология, OWL, Protégé, low-code платформа, АСУ ТП, BPMN, DFD, нефтегазовая отрасль, иерархическая архитектура, управление метаданными, технологический суверенитет.

Благодарности: работа выполнена в рамках НИОКР «Разработка прототипа программной платформы генерации прикладных систем управления» № 1814 от 28.12.2024.

Для цитирования: Гимранов Р. Д., Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Моргун Д. А., Гавриленко М. Т., Амелин М. Е., Батуро С. А., Грюнталь А. И. Концепция платформы генерации прикладных систем управления. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):41–51.

Поступила в редакцию: 03.06.2026. В окончательном варианте: 21.06.2026.

THE CONCEPT OF A PLATFORM FOR APPLICATION-CENTRIC CONTROL SYSTEM SYNTHESIS

R. D. Gimranov[1,a], **V. A. Galkin**[2,3,b], **T. V. Gavrilenko**[2,3,c], **D. A. Morgun**[2,d], **M. T. Gavrilenko**[2,3,e], **M. E. Amelin**[2,3,f], **S. A. Baturo**[2,3,g], **A. I. Gryuntal**[4,h]

[1] *"Surgutneftegas" Public Joint Stock Company, Surgut, Russian Federation*

[2] *Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Surgut, Russian Federation*

[3] *Surgut State University, Surgut, Russian Federation*

[4] *Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation*

[a] *gimranov_rd@mail.ru,* [b] *val-gal@yandex.ru,* [c] *taras_gavrilenko@office.niisi.tech,*

[d] ✍ *morgun_da@office.niisi.tech,* [e] *gavrilenko.michail.t@office.niisi.tech,*

[f] *amelin_me@office.niisi.tech,* [g] *baturo_sa@office.niisi.tech,* [h] *grntl@niisi.ras.ru*

Abstract: we proposed the concept of a low-code/no-code platform for automating the construction of process control systems in the oil and gas industry based on ontological modeling. We carried

out a comparative analysis of ontology engineering methodologies (Methodology, On-To-Knowledge, Gruber's ontology design principles, BORO) and ontology description languages (RDF, RDFS, OWL, KIF, CycL, Gellish) to justify the selection of OWL and the Protégé environment as the implementation tool. We described a five-level hierarchical architecture of the platform, which covers physical devices, controllers, data processing, visualization, and business logic. We proposed a generalized algorithm for platform operation, which ensures the sequential transformation of ontological models through BPMN and DFD diagrams into a project meta-description and final program code. We formulated the basic requirements of the concept, including support for domestically produced low-performance computing systems.

Keywords: ontology, OWL, Protégé, low-code platform, process control system, BPMN, DFD, oil and gas industry, hierarchical architecture, metadata management, technological sovereignty.

Acknowledgements: this study is a part of the "Development of a Prototype Platform for Application-Centric Control System Synthesis" R&D project No. 1814 dated 28.12.2024.

Cite this article: Gimranov R. D., Galkin V. A., Gavrilenko T. V., Morgun D. A., Gavrilenko M. T., Amelin M. E., Baturo S. A., Gryuntal A. I. The Concept of a Platform for Application-Centric Control System Synthesis. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):41–51.

Original article submitted: 03.06.2026. *Revision submitted: 21.06.2026.*

Введение

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) нефтегазовой отрасли сталкиваются с нарастающим противоречием: с одной стороны, возрастает сложность технологических объектов и разнородность задействованного оборудования; с другой — критически важны скорость создания новых приложений, их адаптация к меняющимся производственным условиям и соответствие требованиям технологического суверенитета. Традиционные подходы к разработке ПО не справляются с этим вызовом: создание каждого нового прикладного решения требует значительных ресурсов, а поддержка унаследованных систем становится все более затратной.

Ответом на данный вызов служит концепция low-code/no-code платформы, ядром которой является онтологическое моделирование предметной области. Онтология — формализованная модель знаний об объектах системы, их свойствах и взаимосвязях — позволяет создать единое смысловое пространство, разделяемое как людьми (операторами, архитекторами решений), так и программными агентами. На основе онтологии строятся модели бизнес-процессов (BPMN) и потоков данных (DFD), которые в свою очередь служат источником для автоматической генерации исполняемого кода.

Анализ существующих подходов к определению онтологии и выбор методологии

В контексте АСУ ТП онтология решает принципиальную задачу: обеспечивает не просто передачу данных между компонентами системы, но передачу их смысла и контекста. Датчики, исполнительные механизмы, контроллеры, бизнес-объекты предприятия — все это должно быть описано в едином концептуальном пространстве с явными отношениями между элементами. Именно наличие такого пространства отличает «умную» платформу, способную генерировать корректный программный код, от совокупности несвязанных компонентов.

Уровни онтологий и пирамида абстракций

Онтологии принято разграничивать по степени общности. Верхнеуровневые онтологии (SUMO, DOLCE) задают фундаментальные категории — объект, процесс, свойство, пространство, время — без привязки к какой-либо предметной области; они служат «каркасом», к которому «крепятся» более специализированные концепции. Доменные (отраслевые) онтологии фиксируют специфику конкретной отрасли: в нефтегазовом секторе это типы оборудования (ТРК, уровнемеры, контроллеры), технологические параметры (давление, расход, температура), стандарты безопасности. Прикладные онтологии — наиболее конкретный уровень: они описывают конкретное предприятие, его объекты и экземпляры оборудования. Рисунок 1 иллюстрирует эту трехуровневую пирамиду.



Рис. 1. *Пирамида уровней онтологий в контексте АСУ ТП нефтегазовой отрасли*

Важным строительным блоком любой онтологии является таксономия — иерархическое (is-a) описание классов и подклассов. В АСУ ТП таксономия структурирует оборудование, персонал, процессы и типы данных, обеспечивая единую «шкалу» наименований при интеграции разнородных подсистем. Например, в рамках разработанной онтологии для АЗС выстраивается ветвь: оборудование → технологическое оборудование → ТРК; оборудование → торгово-кассовое оборудование → банковские терминалы. Такая структура обеспечивает наследование свойств и упрощает автоматическую обработку модели.

Сравнительный анализ методологий

Для создания онтологии необходима методология — упорядоченный процесс сбора знаний, формирования таксономии и спецификации отношений. Проведенный анализ охватил четыре ведущие методологии и подход с применением UML.

Таблица 1

Сравнение методологий построения онтологий в контексте АСУ ТП

Методология	**Подход**	**Область применения**	**Ограничения**
Methontology	Формальная, поэтапная	Промышленные системы	Высокая трудоемкость
On-To-Knowledge	Онтологии из источников знаний	Корпоративные порталы	Зависимость от экспертов
Подход Грубера	Минималистичная, декларативная	ИИ-системы, Web	Ограниченная детализация
BORO	Объектно-ориентированная	Бизнес-процессы	Узкая предметная область
UML-онтологии	Нотация UML + семантика	Инженерные системы	Нет аксиоматики OWL

Methontology предлагает наиболее формализованный и полный процесс: концептуализация, формализация, интеграция и оценка онтологии выполняются на отдельных этапах. Именно эта формальность делает методологию предпочтительной для промышленных систем, где требуется воспроизводимость и прослеживаемость решений. On-To-Knowledge ориентирована на извлечение знаний из неструктурированных источников и корпоративных документов, что ограничивает ее применимость в инженерном контексте с четкими техническими спецификациями. Подход Грубера принципиально минималистичен: онтология должна быть наименьшей достаточной формализацией, что удобно для ИИ-систем, но недостаточно для полного описания АСУ ТП. BORO ориентирована на бизнес-процессы и объекты организации, однако не охватывает физический уровень технологического оборудования. Подход на основе UML привлекателен знакомостью нотации для инженеров, однако UML лишен встроенной аксиоматики, что затрудняет логический вывод и машинную обработку модели.

По совокупности критериев — полнота процесса, поддержка логического вывода, применимость к инженерным системам и наличие зрелой инструментальной поддержки — для разрабатываемой платформы принята методология Methontology.

Выбор языка описания онтологий

Параллельно с выбором методологии необходимо определить язык формального описания онтологии. Проведенный обзор охватил шесть актуальных языков.

Таблица 2

Сравнение языков описания онтологий

Язык	**Организация**	**Модель**	**Применение**	**Ограничения**
RDF	W3C	Граф-модель	Широкое, веб-данные	Слабая аксиоматика
RDFS	W3C	Классы и свойства	Схемы данных	Без логики
OWL	W3C	DL-логика	АСУ ТП, ИИ, инженерия	Высокая сложность
KIF	IEEE	Предикатная логика	ИИ, обмен знаниями	Устаревший
CycL	Cycorp	Формальная логика	Общие знания	Закрытый стандарт
Gellish	Gellish.net	ER-модель	Инженерные справочники	Узкая область

RDF задает базовую граф-модель «субъект–предикат–объект» и является фундаментом для остальных стандартов W3C. RDFS добавляет иерархию классов и свойств, но не поддерживает логический вывод. OWL (Web Ontology Language) строится на Description Logic: позволяет задавать аксиомы, эквивалентность классов, ограничения мощности и транзитивность отношений — все это критически важно для автоматической обработки онтологии. KIF, несмотря на выразительность предикатной логики первого порядка, является устаревшим стандартом без широкой поддержки. CycL отличается мощью общей базы знаний, но закрытый характер делает его непригодным для промышленных проектов с требованием технологической независимости. Gellish удобен для инженерных справочников, но слишком узкоспециализирован.

Выбор сделан в пользу OWL (Web Ontology Language) как языка, обеспечивающего наибольшую выразительность при наличии открытого стандарта W3C, широкой инструментальной поддержки и возможности машинного вывода над моделью. Для работы с OWL выбрана среда Protégé (Stanford University) — зрелый OpenSource-инструмент с поддержкой рассуждателей (Hermit, Pellet), экспорта в форматы RDF/XML и Turtle, а также визуального редактора онтологических моделей. Все рассмотренные инструменты относятся к категории OpenSource и могут применяться на вычислительных системах различных архитектур, включая отечественные.

Иерархическая архитектура платформы

Платформа построена на основе пятиуровневой иерархической модели (рис. 2), отражающей реальную структуру промышленного предприятия — от физических датчиков и исполнительных механизмов до корпоративных бизнес-процессов. Каждый уровень обладает собственной функциональной ответственностью, четко определенными интерфейсами взаимодействия с соседними уровнями и соответствующим набором требований к безопасности.



Рис. 2. *Пятиуровневая иерархическая архитектура платформы АСУ ТП*

В основании структуры находится уровень физических устройств и оборудования: датчики температуры, давления и расхода; исполнительные механизмы; полевые шины (Modbus, PROFINET, EtherNet/IP). Непосредственно над ним располагается уровень контроллеров и первичной автоматизации: ПЛК, РСУ, системы сбора данных реального времени, реализующие алгоритмы управления и обеспечивающие детерминированное время отклика. На третьем уровне располагаются SCADA-системы и HMI, предоставляющие операторам адаптивный интерфейс мониторинга и управления. Четвертый уровень — обработка и интеграция данных — агрегирует разрозненные потоки, обеспечивает нормализацию, фильтрацию и маршрутизацию данных через шину интеграции, поддерживающую OPC UA, MQTT и AMQP. Верхний, пятый уровень связывает технологические данные с ERP-системами, аналитическими сервисами и бизнес-логикой предприятия.

Такая структура переносится на онтологическую модель, то есть каждому уровню соответствует своя ветвь таксономии, а взаимодействия между уровнями описываются объектными свойствами OWL. Благодаря этому обеспечивается согласованность программной архитектуры с физической структурой АСУ ТП.

Организация потоков данных в иерархической модели предполагает поддержку как вертикальных, так и горизонтальных потоков. Механизмы расширения иерархической структуры реализуются через документированный API, который позволяет добавлять пользовательские коннекторы к оборудованию и специализированные отраслевые модули без изменения ядра платформы. Жизненный цикл компонентов управляется через версионирование и автоматизированное развертывание с тестированием в изолированной среде.

Концепция платформы: базовые требования

Платформа представляет собой программный комплекс для формирования структуры взаимодействия оборудования и объектов предприятия на различных уровнях иерархии. Концепция строится на четырех базовых принципах, определяющих ее архитектурное ядро.

Таблица 3

Четыре базовых принципа концепции платформы

Иерархическая структура	**Low-code/ no-code**	**Управление метаданными**	**Система безопасности**
5 уровней: от физических устройств до бизнес-логики	Графические редакторы онтологий, BPMN, DFD без программирования	Менеджер тегов, словари параметров, каталог элементов, репозиторий сигналов	Многоуровневая защита по ГОСТ Р МЭК 62443, ролевая модель, MFA

Иерархическая структура задает вертикальную организацию платформы. Low-code/no-code концепция реализуется через графические редакторы: редактор онтологических моделей (Protégé), конструктор BPMN-диаграмм, редактор DFD-диаграмм. Принципиально, что все эти инструменты не требуют от архитектора решений навыков программирования — он работает с визуальными нотациями, а платформа автоматически обеспечивает их формализацию и согласованность. Система управления метаданными — менеджер тегов, словари параметров, каталог технологических элементов, репозиторий типов сигналов — обеспечивает единообразие представления данных и исключает терминологическую неоднозначность при интеграции разнородного оборудования. Система безопасности реализована по иерархическому принципу: физическая защита, защищенная загрузка контроллеров, обнаружение вторжений, MFA и ролевая модель доступа на уровне визуализации, управление цифровыми правами на уровне бизнес-логики.

Таблица 4

Требования к платформе

Группа требований	**Ключевые положения**	**Назначение**
Архитектурные	Микросервисы, модульность, масштабируемость, расширяемость через API	Независимое обновление компонентов
Технологические	Low-code/no-code редакторы, OPC UA, Modbus, REST API, MQTT, AMQP	Работа без программирования
Безопасности	Многоуровневая защита, ГОСТ Р МЭК 62443, ролевая модель, MFA	Защита критической инфраструктуры
Производительности	Реального времени, отказоустойчивость, работа офлайн, кластеризация	Непрерывность АСУ ТП
Интерфейса	Адаптивный UI, персонализация, соответствие UX промышленных систем	Удобство оператора
Жизненного цикла	Версионирование, аудит, автодеплой, тестирование в изолированной среде	Управляемое изменение

Особое значение имеет требование функционирования на отечественных низкопроизводительных вычислительных системах. Операции построения онтологий и интерпретации диаграмм не предполагают интенсивных вычислений в реальном времени, что делает платформу совместимой с процессорами среднего уровня производительности отечественного производства. Это соответствует принципам импортозамещения и технологического суверенитета в критически важной инфраструктуре топливно-энергетического комплекса.

Обобщенный алгоритм функционирования платформы

Диаграмма SADT

Для формализованного описания платформы разработана SADT-диаграмма в нотации IDEF0 (рис. 3). На вход подаются объекты и процессы предметной области, а также техническое задание. Основным участником является архитектор решений, от квалификации которого напрямую зависит качество конечного результата. В перспективе его роль частично может взять на себя агент большой языковой модели. Управляющими воздействиями служат номенклатуры построения онтологий, BPMN и DFD, требования к безопасности, нормативные документы и прецеденты. На выходе формируются: онтологическая модель, BPMN-диаграмма, DFD-диаграмма, структура программного обеспечения, структура взаимодействия объектов и готовое решение, включающее программный код и настройки среды.

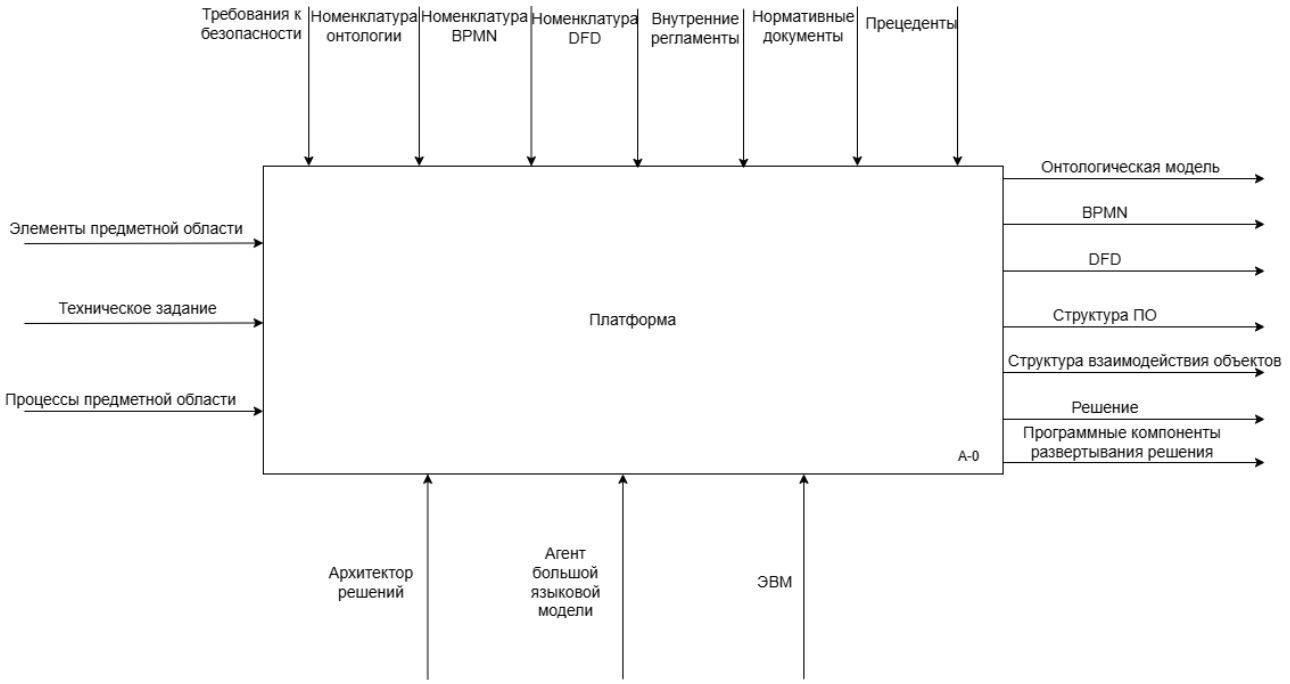


Рис. 3. *Диаграмма SADT*

Детализированная SADT-диаграмма (рис. 4) раскрывает 11 последовательных этапов функционирования платформы. На этапах 1–2 архитектор строит обобщенную и детализированную онтологические модели согласно номенклатуре онтологий. Этап 3 — проверка их согласованности интерпретатором; при выявлении противоречий выполняется возврат к этапу 1. На этапах 4–5 создается и верифицируется BPMN-диаграмма. Этап 6 — построение DFD-диаграммы. На этапах 7–10 интерпретатор объединяет все модели в машиночитаемое описание, на основе которого последовательно формируются: проект структуры ПО, структура взаимодействия объектов и готовое решение. Этап 11 — реализация решения в виде программных компонентов. Все модели и решения сохраняются в соответствующих базах данных с возможностью повторного использования.

Диаграмма DFD

Диаграмма DFD (рис. 5) отображает потоки данных между компонентами платформы. Верхний поток описывает трансформацию моделей: от обобщенной онтологической модели (формализованной в OWL) через детализированную онтологическую модель к BPMN-диаграмме и итоговой DFD. На каждом переходе выполняется раунд корректировки метаданных для обеспечения согласованности. Нижний поток ориентирован на практическую реализацию: интерпретатор преобразует совокупность диаграмм и моделей в машиночитаемое описание, на основе которого формируются проект структуры ПО, структура взаимодействия объектов и готовое решение, загружаемое в целевую инфраструктуру.

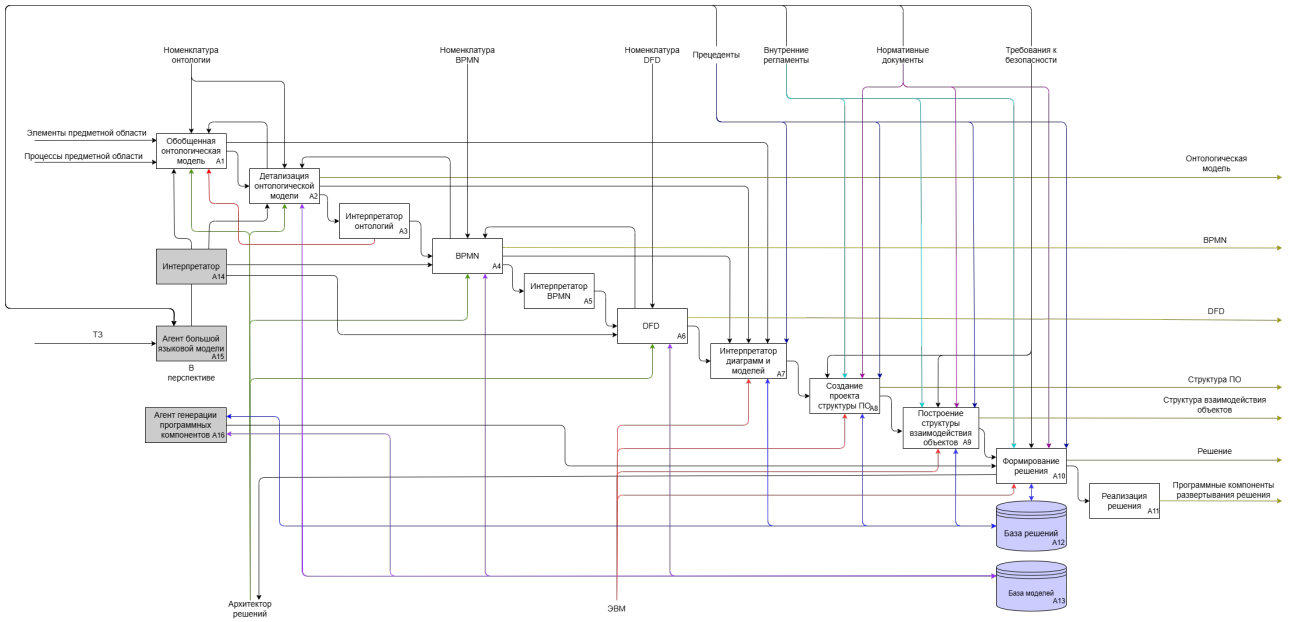


Рис. 4. *Детализированная диаграмма SADT*

Централизованными хранилищами служат база моделей и база решений. Номенклатура стандартов (онтологии, BPMN, DFD) выступает нормативной базой для всех процессов. В перспективе роль архитектора решений будет дополнена агентом большой языковой модели и агентом генерации программных компонентов, что обеспечит более высокий уровень автоматизации.

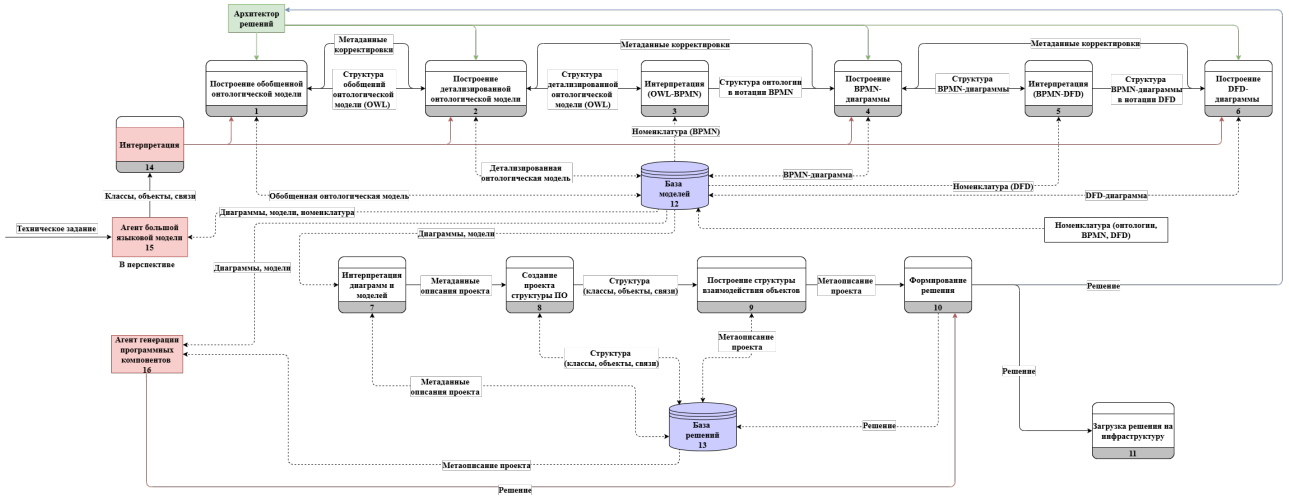


Рис. 5. *Диаграмма DFD*

Обобщенный алгоритм платформы

Обобщенный алгоритм функционирования платформы представлен в виде блок-схемы (рис. 6) и включает следующие шаги:

- построение обобщенной онтологической модели на основе объектов и процессов предметной области;
- построение детализированной онтологической модели на основе обобщенной;
- проверка согласованности моделей интерпретатором, при наличии противоречий — возврат к шагу 1;
- трансляция онтологических моделей в BPMN-диаграмму с последующей корректировкой и повторной проверкой согласованности;
- построение DFD-диаграммы с аналогичной проверкой согласованности всех диаграмм;

- формирование машиночитаемого описания объектов и процессов интерпретатором диаграмм и моделей;
- создание проекта структуры программного обеспечения на основе полученного описания;
- построение структуры взаимодействия объектов;
- формирование готового решения и его реализация на предприятии.

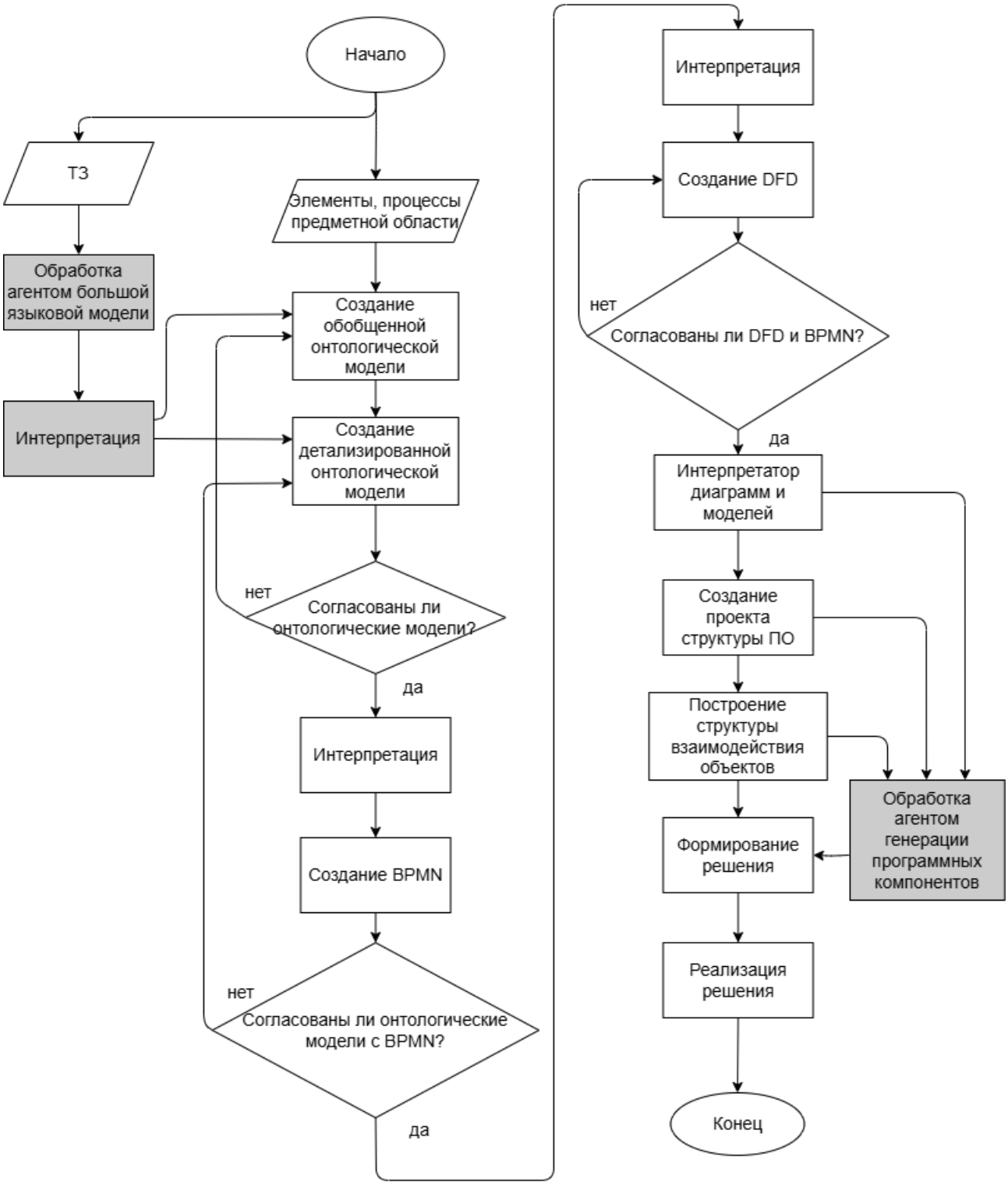


Рис. 6. *Обобщенный алгоритм платформы*

Роль архитектора решений

Ключевой ролью в функционировании платформы является архитектор решений. Работа

платформы условно делится на два глобальных этапа: создание проектных схем (онтологические модели, BPMN, DFD) и формирование решения (структура ПО, структура взаимодействия объектов, готовое решение, реализация). Первый этап — определяющий, поскольку качество итогового решения напрямую зависит от полноты и корректности разработанных моделей и диаграмм.

В задачи архитектора входят:

- глубокий анализ предметной области и выделение ключевых объектов и процессов;
- построение обобщенной и детализированной онтологических моделей;
- создание BPMN-диаграммы без нарушения согласованности с онтологиями;
- построение DFD-диаграммы с соблюдением согласованности с BPMN.

Таким образом, архитектор решений обеспечивает корректное отражение сущностей и их связей, процессов предметной области и потоков данных.

Разработанные SADT-диаграммы (общая и детализированная), DFD-диаграмма и блок-схема обобщенного алгоритма описывают полный цикл функционирования платформы. Центральной фигурой процесса является архитектор решений. Архитектура платформы структурно предусматривает возможность внедрения агентов на базе больших языковых моделей для частичной автоматизации этапов моделирования и кодогенерации. Реализуемые алгоритмы рассчитаны на применение в вычислительных системах различных архитектур, включая отечественные и низкопроизводительные.

Заключение

В статье представлена концепция low-code/no-code платформы автоматизации разработки прикладных систем управления для нефтегазовой отрасли, в основе которой лежит онтологическое моделирование. Проведенный сравнительный анализ методологий обосновал выбор Methontology как наиболее формального и применимого в инженерном контексте подхода. Из всех рассмотренных языков описания онтологий выбор сделан в пользу OWL с инструментальной средой Protégé, что обеспечивает стандартизацию, машинную обработку и выразительность модели при использовании открытого ПО.

Пятиуровневая иерархическая архитектура платформы обеспечивает систематическое покрытие всех уровней АСУ ТП — от физических устройств до бизнес-логики. Четыре базовых принципа концепции (иерархическая структура, low-code/no-code, управление метаданными, многоуровневая безопасность) формируют целостную архитектурную парадигму. Обобщенный алгоритм реализует сквозную цепочку трансформации: онтологические модели → BPMN → DFD → метаописание → исполняемый код, с механизмом итеративного согласования на каждом переходе.

Важным практическим результатом является подтверждение совместимости платформы с отечественными низкопроизводительными вычислительными системами, что определяет ее потенциал как импортозамещающего решения для критически важной инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barrasa J., Webber J. *Building Knowledge Graphs*. Sebastopol: O'Reilly Media; 2023. 421 с.
2. Неизвестный С. И. О применении таксономии в области информационных технологий. *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2016;2(1):89–111.
3. Fernández-López M., Gómez-Pérez A., Juristo N. Methontology: From Ontological Art towards Ontological Engineering. *Proceedings of the AAAI-97 Spring Symposium Series*. Stanford; 1997:33–40.
4. Sure Y., Staab S., Studer R. On-to-Knowledge Methodology. *Handbook on Ontologies* / Staab S., Studer R. (eds.). Berlin; Heidelberg: Springer; 2004:117–132.
5. Верхотурова Ю. С. Онтология как модель представления знаний. *Вестник БГУ. Сер.: Философия*. 2012;15:32–37.
6. *Protégé: официальный сайт*. Режим доступа: https://protege.stanford.edu.
7. *Web Ontology Language (OWL)*. Режим доступа: https://www.w3.org/OWL.
8. *Business Process Model and Notation (BPMN): спецификация OMG*. Режим доступа: https://www.omg.org/spec/BPMN.

9. Новиков Ф. А., Иванов Д. Ю. *Моделирование на UML: теория, практика, видеокурс*. СПб.: Профессиональная литература; 2010. 640 с.
10. Марка Д. А., МакГоуэн К. *Методология структурного анализа и проектирования*. М.: МетаТехнология; 1993. 240 с.
11. Li Q., Chen Y. L. Data Flow Diagram. *Modeling and Analysis of Enterprise and Information Systems*. Berlin; Heidelberg: Springer; 2009:85–97. DOI: 10.1007/978-3-540-89556-5_4.
12. Rokis K., Kirikova M. Challenges of Low-Code/No-Code Software Development: A Literature Review. *Perspectives in Business Informatics Research. BIR 2022. Lecture Notes in Business Information Processing* / Nazaruka Ē., Sandkuhl K., Seigerroth U. (eds.). Cham: Springer; 2022;462:3–17. DOI: 10.1007/978-3-031-16947-2_1.
13. Филимонова А. А., Боос Г. О. Современные АСУ ТП. *Инновации в науке*. 2014;38:39–42.
14. *ГОСТ Р МЭК 62443-4-2-2019. Безопасность систем промышленной автоматизации и управления. Часть 4-2. Технические требования безопасности для компонентов IACS*. М.: Стандартинформ; 2020. 116 с.

ВОЗМОЖНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ НА НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ НЕПРОНИЦАЕМОГО ЭКРАНА ПО ДАННЫМ ГИДРОПРОСЛУШИВАНИЯ ДВУХ СКВАЖИН, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВОЗЛЕ РАЗЛОМА. ЧАСТЬ 1. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

В. А. Юдин[1,а], **Ю. М. Штейнберг**[1,б], **Н. П. Ефимова**[1,в], **И. В. Афанаскин**[2,г]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация*

[2] *Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск, Российская Федерация*

[а] *ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7205-9050,* ✍ *yudinval@yandex.ru*

[б] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3159-0408, yurash22@gmail.com*

[в] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2808-2437, efinatka@gmail.com*

[г] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0617-221X, ivanafanaskin@gmail.com*

Аннотация: исследуется принципиальная возможность выявления на нефтяном месторождении разлома, являющегося непроницаемым экраном (границей), по данным гидропрослушивания двух скважин, расположенных по одну сторону от разлома. Актуальность работы обусловлена значительным влиянием разломов на эффективность разработки нефтяных залежей. Коллективом авторов в семи статьях в 2023–2025 гг. была показана неэффективность применения для этой цели односкважинных гидродинамических исследований за счет влияния погрешностей оценки используемых параметров пласта, определяемых негидродинамическими методами. Предлагаемый подход позволяет сократить число таких параметров. Выполнено численное моделирование гидропрослушивания в однородном, условно бесконечном пласте и в пласте с непроницаемой границей. Предложен алгоритм выявления такой границы, проведена оценка влияния погрешностей исходных параметров, получаемых негидродинамическими методами, на достоверность ее выявления. Показано, что, в отличие от односкважинных исследований, рассматриваемый подход позволяет уверенно выделять непроницаемый экран (границу), даже при наличии погрешностей в определении исходных параметров. Для надежного заключения о его реализуемости предполагается дальнейшее тщательное и детальное исследование данного метода.

Ключевые слова: разлом, гидропрослушивание, непроницаемая граница.

Для цитирования: Юдин В. А., Штейнберг Ю. М., Ефимова Н. П., Афанаскин И. В. Возможность выделения на нефтяном месторождении непроницаемого экрана по данным гидропрослушивания двух скважин, расположенных возле разлома. Часть 1. Оценка возможности применения методики. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):52–58.

Поступила в редакцию: 08.05.2026. *В окончательном варианте: 11.06.2026.*

IMPERMEABLE BARRIER DETECTION IN AN OIL FIELD USING INTERFERENCE TESTING DATA FROM TWO WELLS NEAR A FAULT. PART 1. VERIFICATION OF THE PROPOSED METHODOLOGY

V. A. Yudin[1,a], **Yu. M. Shteinberg**[1,b], **N. P. Efimova**[1,c], **I. V. Afanaskin**[2,d]

[1] *Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation*

[2] *Almetyevsk State Technological University Petroleum Higher School, Almetyevsk, Russian Federation*

[a] *ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7205-9050,* ✍ *yudinval@yandex.ru*

[b] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3159-0408, yurash22@gmail.com*

[c] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2808-2437, efinatka@gmail.com*

[d] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0617-221X, ivanafanaskin@gmail.com*

Abstract: we studied the possibility of detecting an impermeable barrier in an oil field using two-well interference test data. The wells are located on one side of the barrier. In reservoir engineering, an impermeable barrier denotes a hydraulic no-flow boundary that restricts fluid communication in the reservoir. The relevance of this study stems from the fact that the presence of faults significantly affects oil field development efficiency. We studied why one-well test data are insufficient for impermeable boundary detection, as shown in a series of seven studies published by the authors in 2023–2025. This limitation arises from errors in the estimation of formation parameters determined by non-hydrodynamic methods. We showed that the number of such parameters can be reduced using the proposed approach. We performed two-dimensional numerical hydrodynamic simulations of well interference tests for a homogeneous infinite reservoir and for the same reservoir containing an impermeable boundary. We proposed an algorithm for impermeable boundary detection based on interference response analysis. We evaluated the influence of errors in non-hydrodynamic formation parameter measurements on the validity of boundary detection. We showed that the proposed approach enables reliable detection of an impermeable barrier, even in the presence of parameter estimation errors, in contrast to the one-well case. Further comprehensive investigation is planned to assess the practical applicability of the method.

Keywords: fault, interference well test, impermeable barrier.

Cite this article: Yudin V. A., Shteinberg Yu. M., Efimova N. P., Afanaskin I. V. Impermeable Barrier Detection in an Oil Field Using Interference Testing Data from Two Wells Near a Fault. Part 1. Verification of the Proposed Methodology. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):52–58.

Original article submitted: 08.05.2026. *Revision submitted: 11.06.2026.*

Введение

При освоении нефтяных залежей установлено, что на их площади существуют квазивертикальные нарушения — разломы [1–3]. Их горизонтальная протяженность составляет от нескольких сотен до тысяч метров в зонах как высокой, так и низкой тектонической активности.

Разломы заметно влияют на динамику нефтеотдачи [2, 4]: в зависимости от проницаемости разлома (от нуля до нескольких (мкм)^2 [1–6]) за двадцать лет разработки текущий коэффициент нефтеотдачи (КИН) может различаться на 5–8 процентных пунктов [2]. Заметно различается и оптимальная конфигурация сетки скважин [3, 7]. Обнаружение разломов и оценка их фильтрационных характеристик — важные задачи, решение которых влияет на эффективность и технико-экономические показатели разработки месторождения [2, 3].

Прямую оценку проницаемости разломов обеспечивают три метода: анализ промысловых показателей разработки; трассерные исследования; гидродинамические исследования скважин (ГДИС).

Первые два подхода фиксируют отклонения показателей разработки от ожидаемых для однородной среды [2, 4, 5], но лишь после прорыва закачиваемого агента к добывающим скважинам — спустя несколько лет от начала эксплуатации. К тому моменту основная часть проектной сетки скважин обычно уже пробурена (особенно — в низкопроницаемых коллекторах) и возможность корректировки системы разработки весьма ограничена.

Методы ГДИС широко применяются для оценки фильтрационно-емкостных свойств пласта, но на расстояниях нескольких десятков метров [8–10]. Вместе с тем возможности ГДИС для исследования удаленных зон (и обнаружения разломов) реализуются крайне редко. Особенно перспективен этот подход при исследовании скважин на стадии опытно-промышленных работ (ОПР) [7]: на этом этапе отсутствует интерференция работающих скважин, искажающая результаты ГДИС. *Использование для решения данного класса задач кривой стабилизации давления (КСД) в одиночной скважине, запускаемой в работу в период ОПР, рассматривалось в ряде публикаций* [7]. Для определения проницаемости разлома экспериментальную кривую зависимости давления от времени $P_э(t)$ сравнивали с модельной $P_м(t)$, рассчитанной по исходным параметрам пласта, определенным иными методами: пористости породы m, ее проницаемости k, эффективной толщины пласта $h_{эф}$, вязкости нефти μ, сжимаемости насыщенной флюидом породы c_t, дебита скважины q. Показано [7], что вариации $P_м(t)$, обусловленные погрешностями этих параметров,

превышают расхождение кривых при различных фильтрационных структурах. Таким образом, односкважинные ГДИС для обнаружения разломов малоперспективны.

Более перспективно применение гидропрослушивания — двухскважинного варианта ГДИС, когда возмущающая и реагирующая скважины расположены по одну сторону от разлома. При такой схеме сокращается число входных параметров расчета и повышается достоверность выделения разлома. Гидропрослушивание при изучении разломов обычно проводят, когда возмущающая и реагирующие скважины находятся по разные стороны разлома, что часто приводит к неоднозначным результатам [2, 11]. На этапе ОПР скважины чаще всего оказываются по одну сторону разлома, что и рассматривается в настоящей работе.

К разломам приурочена «зона динамического влияния разлома» (ЗДВ) со сложной фильтрационной структурой [6]. Ее параметры значительно отличаются от свойств ненарушенной части пласта [3, 6]. Моделирование ГДИС вблизи разломов с учетом структуры ЗДВ — задача крайне сложная. На первом, *качественном*, этапе исследований выбран упрощенный вариант: а) ЗДВ разлома отсутствует, б) разлом моделируется границей нулевой проницаемости («непроницаемый экран»).

Для этой модели существуют аналитические решения [10], однако при наличии ЗДВ решение можно получить только численно. Для последующего сравнения результатов в данной статье применен численный метод решения

Методика расчета

В основу расчета положена классическая модель однофазной фильтрации слабосжимаемой жидкости в упругом бесконечном пласте, без учета гравитационных и капиллярных сил. На удаленных внешних границах расчетной области задаются условия непротекания. Расстояние от группы скважин до внешних границ принято много бóльшим расстояния между скважинами, а время исследования — меньшим времени прохождения возмущения поля давления от группы исследуемых скважин до внешних границ и обратно. Геометрия модели (см. рис. 1): треугольник — возмущающая скважина, кружок — реагирующая, l — расстояние между скважинами, L – расстояние от скважин до линии разлома.

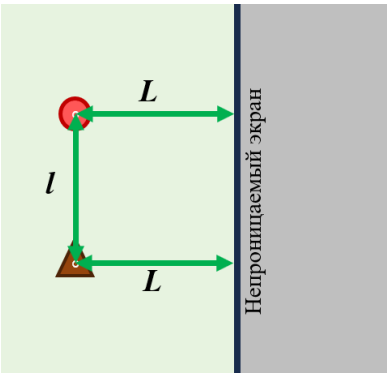


Рис. 1. *Геометрия модели*

Продуктивный пласт без разломов рассматривается как однородная изотропная пористая среда с проницаемостью k. Практическая применимость методики определяется сочетанием расстояний l и L. Цель — проверить, позволяют ли данные гидропрослушивания при некотором сочетании этих расстояний выявить наличие непроницаемой границы («непроницаемого экрана»); при положительном результате возможны дальнейшее исследование методики. По итогам предварительных расчетов выбраны $l = 50$ м и $L = 450$ м. Остальные принятые параметры приведены в таблице.

Предполагали, что: исследование ГДИС проводится в изначально невозмущенном пласте; реагирующая скважина не работает и является только наблюдательной; возмущение при ГДИС — запуск в работу возмущающей скважины с постоянным дебитом. Время регистрации давления — 2500 часов. Кривая давления для пласта с непроницаемой границей считалась «экспериментальной», теоретическая кривая для однородного пласта — «проверяемой». Пример рассчитанных

Таблица

Исходные (истинные) параметры однородного пласта

Параметр	Значение
Толщина пласта, м	10
Проницаемость, мкм^2	$50{\cdot}10^{-3}$
Пористость, д. ед.	0,15
Вязкость нефти, мПа·с	1,3
Сжимаемость насыщенной флюидом породы, 1/МПа	$1.5864 \cdot 10^{-3}$
Начальное пластовое давление, МПа	20,1
Дебит добывающей скважины, м^3/сут	70

кривых *для истинного набора параметров* показан на рис. 2. Δ_{max} — максимальное среднеквадратичное расхождение сравниваемых кривых, *обусловленное только различием фильтрационных моделей.* Кривая *при наличии непроницаемой границы, рассчитанная для истинных параметров пласта,* обозначена как $\widetilde{P_э}(t)$, *расчетная кривая для однородного пласта с истинными параметрами* — как $\widehat{P_и}(t)$.

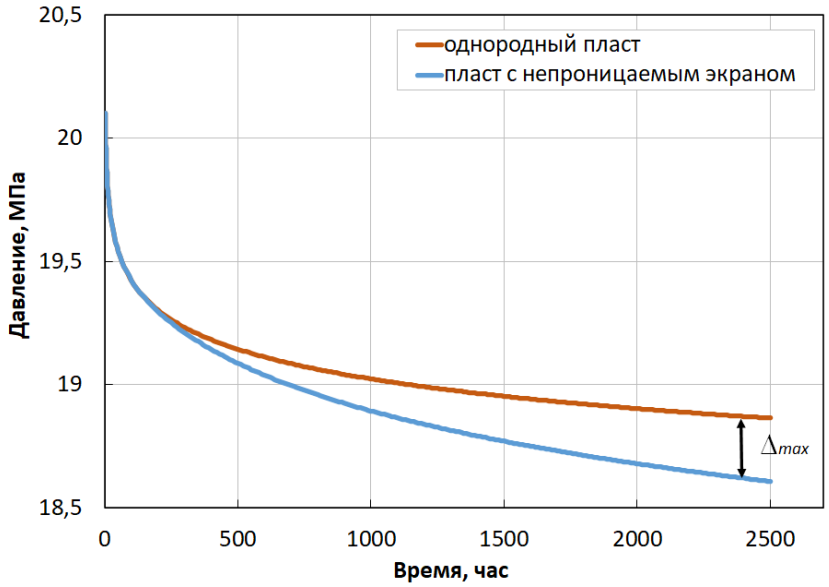


Рис. 2. *Пример кривых давления для двух рассмотренных моделей пласта, рассчитанных для истинного набора параметров задачи*

Обработка кривых гидропрослушивания проводилась с применением стандартных алгоритмов интерпретации, реализованных в специализированном программном комплексе и апробированных на обширном массиве промысловых данных.

Идея методики

имеется только кривая $\widetilde{P_э}(t)$ для пласта с непроницаемой границей, то трудность состоит в том, что для сопоставления с $\widetilde{P_э}(t)$ нет кривой, соответствующей однородному пласту. В односкважинном подходе для ее расчета использовали набор из *шести* входных параметров, определяемых негидродинамическими методами [7].

Исследуемый подход базируется на двух положениях [8–10]:

А. При интерпретации $\widetilde{P_э}(t)$ *используется только четыре входных параметра* [8–10]: $h_{эф}$, μ, c_t, q, в отличие от односкважинного варианта [7]. По методу минимизации квадратичного функционала [12] определяют два эффективных параметра: $k_{эф}$ и $m_{эф}$, *при которых расчетная кривая* зависимости давления от времени *наилучшим образом аппроксимирует кривую* $\widetilde{P_э}(t)$.

Б. При указанной геометрии (рис. 1) и выбранных l, L — на кривой $\widetilde{P_э}(t)$ существует участок (рис. 3), на котором влияние имеющегося разлома еще не сказывается [8–10]. *Этот участок соответствует однородному бесконечному пласту и в полулогарифмических координатах прямолинеен* [10].

Общая схема методики:

1. На кривой $\widetilde{P_э}(t)$ в полулогарифмических координатах находили точки начала $\hat{t}_{нач}$ и окончания $\hat{t}_{кон}$ участка $\delta(\hat{t}_{нач}, \hat{t}_{кон})$, соответствующего однородному бесконечному пласту без разлома. Время $\hat{t}_{нач}$ определяли из условия [8]: æ $\hat{t}_{нач}/L^2 > 10$, где æ – пьезопроводность. *При истинных параметрах задачи* $\hat{t}_{нач} \approx 35$ *часов. Фактически, как показали специально проведенные оценки, выбор времени* $\hat{t}_{нач}$ *мало влияет на последующую проверку гипотезы о фильтрационной структуре исследуемого участка.* Время $\hat{t}_{кон}$ находится по допустимой величине ΔP отклонения кривой $\widetilde{P_э}(t)$ от прямолинейной зависимости (в конце участка δ) [9]: $P = \frac{q}{4\pi}\frac{\mu}{kh_{эф}}\ln\frac{2{,}25\ \cdot æ\ \cdot\hat{t}_{кон}}{4L^2}$.

В зависимости от величины ΔP значение $\hat{t}_{кон}$ может существенно измениться. При принятом $\Delta P = 0{,}0024\%$ от $P_{пласт}$ (в пять раз меньше инструментальной погрешности манометров [7]) $\hat{t}_{кон} \approx 80$ ч. Выделенный участок δ показан на рис. 3.

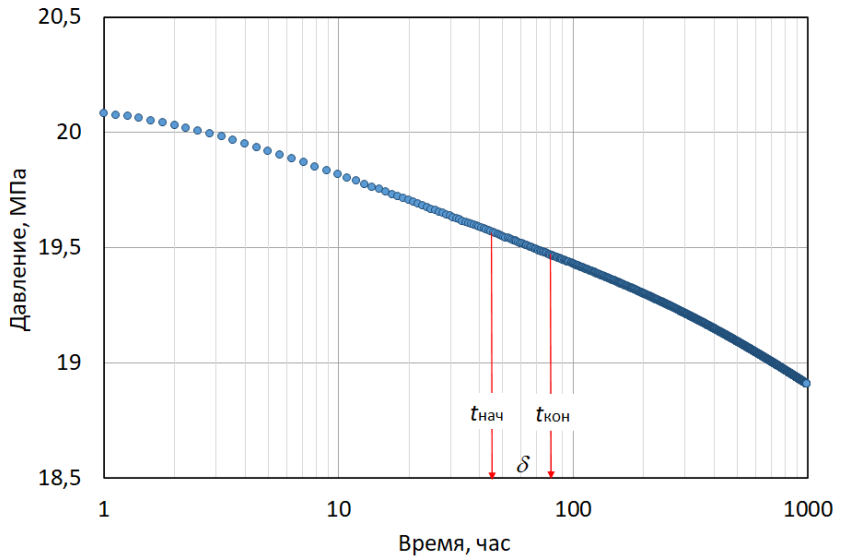


Рис. 3. *Участок δ, соответствующий однородному пласту на «экспериментальной» кривой $\widetilde{P_э}(t)$*

2. Интерпретировали участок δ, используя истинные значения $h_{эф}$, μ, c_t, q. Получили новые $k_{эф}$ и $m_{эф}$, в общем случае не совпадающие с истинными параметрами k и m.

3. По всем шести параметрам и расстояниям l, L *рассчитывали полную реконструированную кривую гидропрослушивания* $\widehat{P_р}(t)$ *для однородного пласта с параметрами* $k_{эф}$ и $m_{эф}$. Для проверки гипотезы об однородности среды ее сравнивали с $\widetilde{P_э}(t)$ [12].

Преимущества схемы: а) используются лишь 4 исходных параметра, определяемых негидродинамическими методами; б) кривая $\widehat{P_р}(t)$ получена из кривой $\widetilde{P_э}(t)$, поэтому вид зависимости дебита от времени на участке δ и на остальной части кривой $\widetilde{P_э}(t)$ не имеет значения, *если только эта зависимость для всей кривой одинакова.*

4. Применение описанного подхода приемлемо, если кривая $\widehat{P_р}(t)$ близка к $\widehat{P_и}(t)$. Возможное отклонение вызвано неточным выбором $\hat{t}_{нач}$ и отличием $k_{эф}$ и $m_{эф}$ от истинных величин k и m. Среднеквадратичное отклонение кривых $\widehat{P_р}(t)$ и $\widehat{P_и}(t)$ *составило 0,0118% от* $P_{пласт}$, *что сопоставимо с погрешностью измерения давления* [7] *и считалось пренебрежимо малым,* замена на рис. 2 $\widehat{P_и}(t)$ на $\widehat{P_р}(t)$ мало что меняет. Но остается влияние погрешности измерения 4 параметров, используемых при расчете $\widehat{P_р}(t)$. Оценку этого влияния получили следующим образом:

а) по распределениям $h_{эф}$, μ, c_t, q из цикла работ [9] и их средним значениям (табл.) с помощью генератора случайных чисел формировали n ($n = 1,\ldots,100$) наборов значений

$\left\{h_{\text{эф}}^{(n)}, \mu^{(n)}, c_t^{(n)}, q^{(n)}\right\}$;

б) для каждого n по участку δ кривой $\widetilde{P_{\text{э}}}(t)$ находили $k_{\text{эф}}$ и $m_{\text{эф}}$ и вычисляли реконструированную кривую $\hat{P}_{\text{р}}^{(n)}(t)$;

в) для каждого n вычисляли среднеквадратичное отклонение Δ_n между $\widetilde{P_{\text{э}}}(t)$ и реконструированной кривой $\hat{P}_{\text{р}}^{(n)}(t)$, получая совокупность $\{\Delta_n\}$;

г) строили интегральное распределение $F(\Delta_n)$ совокупности $\{\Delta_n\}$ и его 95%-й квантиль – $\Delta_{\text{крит}}$ [12] (рис. 4);

д) сравнивали $\Delta_{\text{крит}}$ с Δ_{max} (рис. 4); если $\Delta_{\text{крит}} < \Delta_{max}$, то мы *не можем принять гипотезу об однородности изучаемого участка* [12], *скорее всего, на участке есть непроницаемый экран*; если же $\Delta_{\text{крит}} > \Delta_{max}$, *то мы не можем отвергнуть возможность однородности изучаемого участка* [12], *т. е. однозначного вывода о наличии непроницаемого экрана сделать нельзя.*

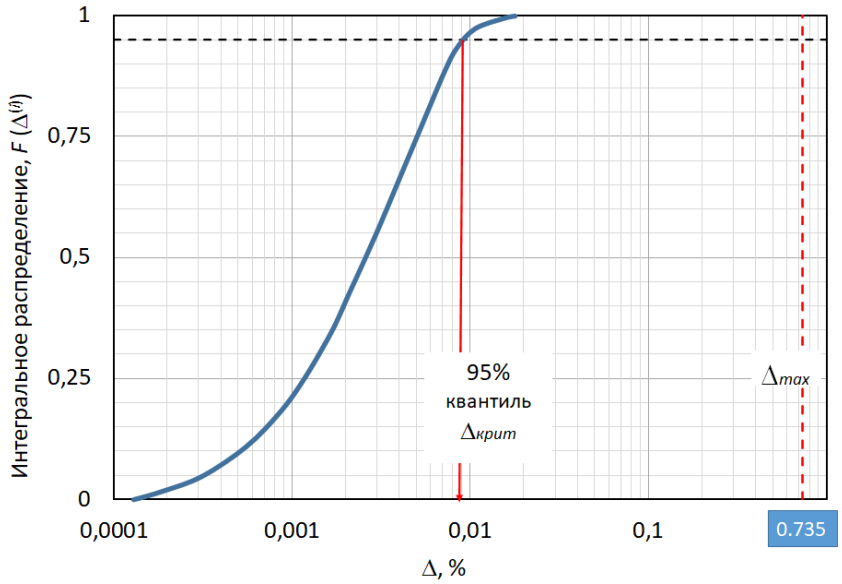


Рис. 4. *Оценка влияния погрешностей в измерении параметров задачи, определяемых негидродинамическими методами, на возможность выделения непроницаемого экрана в однородном бесконечном пласте*

Обсуждение результатов

Как видно из рис. 4, в рассматриваемом случае реализуется именно первый случай, указанный в пункте д): $\Delta_{\text{крит}} < \Delta_{max}$, и, *следовательно, мы не можем принять гипотезу об однородности изучаемого участка, т.е., скорее всего, на участке есть непроницаемый экран.* Для данного случая, несмотря на наличие случайных флуктуаций кривой $\widetilde{P_{\text{р}}}(t)$, *с надежностью 95%* гипотеза об однородности пласта *не может быть принята. Это значительно отличается от негативной оценки возможности выделения непроницаемого экрана в односкважинном случае [7], что делает перспективным дальнейшее изучение методики.*

Заключение

Проведенное оценочное исследование показывает, что для выделения разломов рассмотренная методика применения гидропрослушивания намного предпочтительнее односкважинного варианта ГДИС [7] и заслуживает основательного исследования. *Надежное заключение о практической пригодности данного подхода (а также о целесообразности применения трехскважинного варианта ГДИС) [11]) может быть сделано только после детальных работ, основанных на многовариантном моделировании данных ГДИС, с оценкой влияния всех параметров задачи и погрешностей их определения, что предполагается провести в дальнейшем.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Лесной А. Н. *Исследование влияния дизъюнктивных нарушений в юрских отложениях на строение залежей нефтяных месторождений Когалымского нефтегазоносного района:* дис. ... канд. геол.-минер. наук. М.; 2015. 178 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/16078.
2. Вольпин С. Г., Афанаскин И. В., Юдин В. А. и др. *Возможность определения фильтрационных параметров дизъюнктивных нарушений на нефтяных месторождениях по данным гидродинамических исследований пластов и скважин.* М.; 2018. 262 с.
3. Бочкарев В. А. *Моделирование нефтегазоносных объектов.* М.: ОАО «ВНИИОЭНГ»; 2010. 246 с.
4. Космачева М. С., Индрупский И. М. *Особенности разработки месторождений, осложненных тектоническими нарушениями.* Экспозиция Нефть Газ. 2017;7:52–57.
5. Владимиров И. В., Бакиров И. И., Лощева З. А. и др. К вопросу о размещении добывающих и нагнетательных скважин в нефтяных залежах с протяженными зонами разуплотнения коллектора. *Нефтепромысловое дело.* 2017;7:5–9.
6. Лобацкая Р. М. *Структурная зональность разломов.* М.: Недра; 1987. 128 с.
7. Юдин В. А., Афанаскин И. В., Ефимова Н. П. и др. Выявление разломов на нефтяных месторождениях по данным гидродинамических исследований скважин при наличии погрешностей гидродинамического моделирования. Часть 6. Суммарное влияние случайных погрешностей исходных параметров при моделировании. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений.* 2025;9:60–66.
8. Эрлагер Р. *Гидродинамические методы исследования скважин.* М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2006. 512 с. ISBN 5-93972-521-X.
9. Кульпин Л. Г., Мясников Ю. А. *Гидродинамические методы исследования нефтегазоводоносных пластов.* М.: Недра; 1974. 200 с.
10. Кременецкий М. И., Ипатов А. И. *Применение промыслово-геофизического контроля для оптимизации разработки месторождений нефти и газа. Т. 1. Основы гидродинамико-геофизического контроля разработки и мониторинга добычи.* М.-Ижевск: Издательство «ИКИ»; 2020. 676 с. ISBN 978-5-4344-0886-8.
11. Лесной А. Н., Пьянкова Е. М. Исследование скважин гидропрослушиванием при решении задач разработки нефтяных и газовых месторождений. *Нефтяное хозяйство.* 2010;1:67–69.
12. Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ.* В 2 кн. М.: Финансы и статистика, 1986–1987. Кн. 1. 1986. 365 с.; Кн. 2. 1987. 349 с.

МЕТОДЫ ВВОДА ДАННЫХ В МИКРОЯДЕРНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ «БАГЕТ»

А. М. Гиацинтов[а], А. Н. Еременчук[б], К. А. Мамросенко[в], К. В. Пугин[г]
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация
[а] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1304-4016, giatsintov@niisi.ras.ru*
[б] *alexer@niisi.ras.ru*
[в] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9889-0560, mamrosenko_k@niisi.ras.ru*
[г] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0053-6230, rilian@@niisi.ras.ru*

Аннотация: в статье рассматривается разработка подсистемы ввода для отечественной микроядерной операционной системы реального времени (ОСРВ) «Багет». Ключевой проблемой при адаптации графических сред, таких как X Window System, для ОСРВ является недетерминированный характер стандартных решений, основанных на стеке udev/libinput. В работе предложен алгоритм «горячего подключения» (hotplug) устройств ввода, не зависящий от подсистемы udev, интегрированный в отдельный поток ввода X сервера и обеспечивающий предсказуемое время отклика. Алгоритм основан на периодическом сканировании файловой системы /dev и корректном взаимодействии с Application Programming Interface (API) X сервера через механизм обратных вызовов и синхронизации. Также представлена подсистема ввода для пользовательских приложений, обеспечивающая абстракцию над низкоуровневыми представлениями устройств, применяемая для приложений, не задействующих X сервер. В рамках работы реализовано приложение калибровки сенсорных экранов, использующее пятиточечную схему и метод наименьших квадратов для вычисления параметров аффинного преобразования, с последующей автоматической генерацией конфигурации для X сервера. Проведенные испытания подтверждают работоспособность, детерминированность и практическую применимость всех компонентов, включая интеграцию с фреймворком графического интерфейса пользователя (GUI) Nuklear. Работа демонстрирует возможность успешной адаптации сложных программных комплексов для использования в специализированных детерминированных системах.

Ключевые слова: ОСРВ, X сервер, графическая система, подсистема ввода, тачскрин.

Благодарности: публикация выполнена в рамках НИР НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов».

Для цитирования: Гиацинтов А. М., Еременчук А. Н., Мамросенко К. А., Пугин К. В. Методы ввода данных в микроядерных операционных системах на примере операционной системы реального времени «Багет». *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):59–65.

Поступила в редакцию: 08.04.2026. В окончательном варианте: 12.06.2026.

DATA INPUT METHODS IN MICROKERNEL OPERATING SYSTEMS: A CASE STUDY OF THE BAGET REAL-TIME OPERATING SYSTEM

A. M. Giatsintov[a], A. N. Eremenchuk[b], K. A. Mamrosenko[c], K. V. Pugin[d]
Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation
[a] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1304-4016, giatsintov@niisi.ras.ru*
[b] *alexer@niisi.ras.ru*
[c] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9889-0560, mamrosenko_k@niisi.ras.ru*
[d] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0053-6230, rilian@@niisi.ras.ru*

Abstract: we developed an input subsystem for the Baget microkernel real-time operating system (RTOS). We studied the adaptation of graphical environments, including the X Window System,

to real-time systems and identified the non-deterministic behavior of conventional solutions based on the udev/libinput stack as a major challenge. To address this issue, we developed a hot-plug mechanism for input devices that operates independently of udev, is integrated into a dedicated X server input thread, and provides predictable response times. The proposed mechanism relies on periodic scanning of the /dev file system and interaction with the X server application programming interface (API) through callbacks and synchronization mechanisms. We also developed an input subsystem for user applications that abstracts low-level device interfaces and can be used independently of the X server. In addition, we implemented a touchscreen calibration application based on a five-point calibration procedure and the least-squares method to determine the parameters of an affine transformation. The application automatically generates the corresponding X server configuration. We evaluated all developed components through a series of tests. The results confirm their operability, deterministic behavior, and practical applicability, including integration with the Nuklear graphical user interface framework. The study demonstrates the feasibility of adapting complex software systems for use in specialized deterministic environments.

Keywords: real-time operating system, X server, graphics system, input system, touchscreen.

Acknowledgements: this study is a part of the NRC “Kurchatov Institute” – SRISA research project No. FNEF-2024-0003.

Cite this article: Giatsintov A. M., Eremenchuk A. N. , Mamrosenko K. A., Pugin K. V. Data Input Methods in Microkernel Operating Systems: A Case Study of the Baget Real-Time Operating System. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):59–65.

Original article submitted: 08.04.2026. *Revision submitted: 12.06.2026.*

Введение

Современные операционные системы требуют надежных и эффективных методов ввода данных, особенно в контексте специализированных систем, таких как операционная система реального времени (ОСРВ). Графическая система и подсистемы ввода являются ключевыми компонентами, обеспечивающими взаимодействие пользователя с приложениями. Многие известные научные работы сосредоточены на подсистеме вывода на экран и отображения графики на ОСРВ [1, 2], тогда как при необходимости интерактивной работы систем на базе ОСРВ требуется также и подсистема ввода, которая в ОС ОН, таких как Linux, решена через udev, libinput, systemd и другие механизмы, малоприменимые в условиях аппаратных ограничений и необходимости обработки подключения произвольных устройств ввода (так называемый механизм «hotplug»). Работы, посвященные портированию X Server на встраиваемые системы [3], часто обходят проблему динамического подключения устройств или предлагают решения, неприменимые в средах с жесткими временными ограничениями.

Настоящая работа восполняет этот пробел, представляя комплексное решение для организации подсистемы ввода в ОСРВ «Багет». В статье авторы пытаются ответить на вопрос обеспечения «отзывчивого» и детерминированного ввода данных при использовании графической подсистемы в ОСРВ, включая динамическое подключение устройств и точную работу сенсорных экранов в условиях отсутствия стандартных для ОС ОН механизмов.

По мнению авторов, научная новизна работы заключается в разработанном алгоритме «горячего подключения устройств» (hotplug) для X Server, не зависящем от стандартных подсистем Linux и обеспечивающем предсказуемое время отклика.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- создано программное обеспечение для калибровки тачскрина, использующее метод наименьших квадратов для компенсации систематических погрешностей, что важно для точности ввода в человеко-машинных интерфейсах;
- создан прототип подсистемы ввода для отечественной ОСРВ «Багет», обеспечивающий обработку управляющих воздействий для интерактивных приложений, использующих графическую систему данной ОС (в том числе и аппаратное ускорение на GPU).

Анализ источников

Современные операционные системы реального времени, особенно построенные на микроядерной архитектуре, сталкиваются с уникальной проблемой: необходимостью совмещать интер-

активность с жесткими требованиями к детерминизму и предсказуемому времени отклика [4, 5]. Разработка подсистемы ввода в таких условиях требует разработки специализированных подходов, если компромисс по снижению параметров вроде latency недопустим.

Архитектура X Window System, несмотря на известные особенности, остается практичным выбором для ОСРВ благодаря относительно низкой зависимости от подсистем ядра и удобству портирования. В отличие от Wayland, который в своей эталонной реализации libwayland требует нестандартного для POSIX системного вызова epoll() и интеграции в подсистему Direct Rendering Management, требующую полного портирования из Linux [6, 7] — X сервер использует отдельные драйверы взаимодействия с операционной системой (DDX), что особенно ценно при портировании на ОС, архитектура и функциональность которых может значительно отличаться от Linux, например, микроядерные ОСРВ.

Wayland по умолчанию опирается на event-driven модель с неявной синхронизацией через vsync и commit-буферы, что вносит джиттер задержки ввода [8] и даже в случае применения протокола linux-explicit-synchronization-unstable-v1 требует от системы поддержки многих интерфейсов, имеющихся только в Linux, что, по сравнению с X11, ограничивает его применимость в микроядерных ОСРВ. Но портирование X Server тоже не является бесшовным — важной задачей становится подсистема ввода. В дистрибутивах Linux и других схожих ОС ОН она реализована через многоуровневый стек: ядро (evdev), демон udev и библиотека libinput, которая обеспечивает универсальную обработку событий от всех устройств ввода [9–11]. Такая архитектура подсистемы ввода является принципиально недетерминированной из-за своего событийного подхода, что делает ее неприменимой на микроядерных ОСРВ. В ОС, где «все, кроме управления памятью, планирования и IPC, вынесено в пользовательское пространство» [12], таких как NuttX, используются собственные, сильно упрощенные подсистемы ввода, ориентированные на статическую конфигурацию, что подчеркивает пробел в решениях, обеспечивающих динамичность и детерминизм. В средах без динамического заполнения базы устройств, аналогичной udev, hotplug должен быть реализован на уровне драйвера, но конкретные решения для ОСРВ не предлагаются [11, 13]. RTOS на базе Linux (например, Enea Linux) предлагают утилиты для статической настройки устройств для отхода от использования udev, но динамический, детерминированный hotplug остается малоисследованной областью. В работе предлагается алгоритм периодического детерминированного сканирования, интегрированный в архитектуру InputThread, что обеспечивает предсказуемость поведения системы и тем самым способствует созданию hotplug-подсистем для ОСРВ.

Определение доступных устройств ввода

Одним из базовых требований к современным системам общего назначения является поддержка технологии hotplug, позволяющей прозрачно подключать и отключать периферийные устройства без перезагрузки системы или перезапуска оконной системы.

Однако в среде ОСРВ «Багет» использование подобных механизмов зачастую неприемлемо. Их работа носит недетерминированный, асинхронный и событийно-управляемый характер, что может вносить непредсказуемые задержки, нарушающие временные ограничения реального времени. Таким образом, требуется создание реализации hotplug для X Server, которая, с одной стороны, соответствует стандартной архитектуре и логике работы X.org, а с другой — отвечает жестким требованиям ОСРВ на детерминированное выполнение.

Стандартная точка интеграции кода hotplug в X Server тесно связана с его внутренним механизмом многопоточной обработки ввода. Следовательно, успешная реализация требует не только создания нового детерминированного алгоритма опроса, но и его корректного внедрения в существующую архитектуру потоков X Server.

Решение данной проблемы было найдено в переходе на многопоточную архитектуру с использованием выделенного потока ввода. Данная функциональность активируется флагом *--enable-input-thread* при сборке сервера. В этом режиме создается отдельный поток, который берет на себя роль обработчика ввода: он непрерывно в цикле опрашивает файловые дескрипторы всех устройств, читает поступающие события и помещает их в очередь для последующей обработки главным потоком. Это позволяет совместить преимущества обоих подходов: низкую задержку (поскольку поток ввода практически всегда готов к чтению) и отсутствие ограничений сигнальной

безопасности (чтение происходит в контексте обычного потока, а не обработчика сигнала).

Для ОСРВ «Багет» задача реализации hotplug сводится к созданию механизма, способного:

1. Обнаруживать факт подключения или отключения устройства ввода.
2. Идентифицировать тип устройства (мышь, клавиатура).
3. Уведомлять X Server об изменении конфигурации устройств.
4. Обеспечивать детерминированное время отклика.
5. Интегрироваться в существующую архитектуру потоков X Server.

Предложенное решение основано на создании подсистемы мониторинга (device monitor), которая осуществляет периодическое сканирование файловой системы */dev* для обнаружения изменений. Алгоритм использует следующие ключевые структуры данных:

```
/* Статус устройства в системе мониторинга */
enum devmon_device_status{
        DEVMON_DEVICE_STATUS_UNKNOWN = 0,// Статус не определен
        DEVMON_DEVICE_STATUS_OFF = 1,// Устройство отсутствует
        DEVMON_DEVICE_STATUS_ON = 2,// Устройство присутствует
};
struct devmon_data {
        InputInfoPtr *pInfo; // Указатель на информацию об устройстве (X Server)
        DeviceIntPtr dev; // Указатель на логическое устройство (X Server)
        char* device_path; // Путь к устройству в файловой системе
};
```

Процесс работы подсистемы можно разделить на три этапа.

Этап 1. Инициализация.

1. Вызывается функция *devmon_initialize()* для инициализации библиотеки мониторинга с заданными параметрами (максимальное количество callback-функций и т.д.).

2. На основе конфигурационных файлов X Server определяются количество и типы устройств (мыши, клавиатуры), для которых требуется мониторинг.

3. Выделяются массивы для хранения идентификаторов мониторов (*mouse_monitors[]*, *kbd_monitors[]*) и массивы ассоциированных с ними данных (*mouse_data[]*, *kbd_data[]*).

Этап 2. Регистрация и запуск мониторинга.

Для каждого устройства вызывается функция *devmon_monitor_device()*, которая:

- принимает путь к устройству в */dev*, указатель на функцию обратного вызова и указатель на пользовательские данные (структуру *devmon_data*);
- возвращает уникальный идентификатор монитора ($\geq$1) при успешной регистрации или -1 в случае ошибки. Запускается отдельный поток мониторинга, который выполняет периодическое сканирование.

Этап 3. Цикл сканирования и обработки.

В бесконечном цикле с детерминированным интервалом (например, 1 секунда) поток мониторинга выполняет:

1. Открытие и чтение содержимого директории */dev*.

2. Для каждого зарегистрированного устройства проводится проверка его наличия: проверяется каждое устройство в директории; если имя устройства в директории совпадает с требуемым, то устройство считается включенным.

3. Если состояние устройства изменилось, вызывается зарегистрированная callback-функция с соответствующим статусом (*DEVMON_DEVICE_STATUS_ON* или *DEVMON_DEVICE_STATUS_OFF*).

Для интеграции с X сервером применяется функция обратного вызова *device_callback()*.

При получении статуса *DEVMON_DEVICE_STATUS_ON* callback-функция:

- записывает в журнал обнаружение нового устройства;
- вызывает *NewInputDeviceRequest()* для регистрации нового устройства в X Server, что приводит к его инициализации и добавлению в список активных устройств.

При получении статуса *DEVMON_DEVICE_STATUS_OFF* callback-функция:

• записывает в журнал удаление устройства;

• вызывает *DeleteInputDeviceRequest()* для корректного удаления устройства из внутренних структур X Server и освобождения ресурсов.

Важно отметить, что все вызовы API X Server (NewInputDeviceRequest, DeleteInputDeviceRequest) должны выполняться в главном потоке сервера. Поскольку наш мониторинг работает в отдельном потоке, необходима корректная синхронизация, например, с помощью механизма отложенных действий или очереди сообщений, чтобы избежать состояний гонки.

Алгоритм включает комплексную обработку ошибок на всех этапах: проверка возвращаемых значений системных вызовов, валидация указателей, корректная обработка критических сбоев. При завершении работы X Server или отключении модуля вызываются функции *devmon_ release_ monitoring()* для каждого монитора и *devmon_ release()* для финального освобождения всех ресурсов библиотеки мониторинга.

Поддержка тачскрина и калибратор

Еще одной задачей была поддержка тачскрина в X сервере на ОСРВ «Багет». Теоретически точка прикосновения P', регистрируемая контроллером сенсора с координатами (X', Y'), должна точно соответствовать точке P с координатами (X, Y) на дисплее. На практике между ними существует систематическая ошибка, обусловленная тремя основными факторами:

1. Масштабные коэффициенты $(\boldsymbol{k_X}, \boldsymbol{k_Y})$. Возникают из-за различия в разрешении дисплея и сенсорного контроллера. Например, для дисплея 1024 × 768 и 12-битного АЦП контроллера (4096 отсчетов) коэффициенты составят $k_X = 1024/4096 = 0.25$ и $k_Y = 768/4096 = 0.1875$.
2. Смещение $(\boldsymbol{\Delta X}, \boldsymbol{\Delta Y})$. Вызвано относительным сдвигом центров координатных систем дисплея и сенсора.
3. Поворот $(\boldsymbol{\Delta\theta})$. Обусловлен угловым смещением осей сенсора и дисплея.

Для перехода от «сырых» координат сенсора (X', Y') к скорректированным координатам дисплея (X, Y) применяется аффинное преобразование, позволяющее учесть все перечисленные погрешности единой системой линейных уравнений [14]:

$$X = \alpha_X \times X' + \beta_X \times Y' + \Delta X$$

$$Y = \alpha_Y \times X' + \beta_Y \times Y' + \Delta Y,$$

где коэффициенты $\alpha_X, \beta_X, \alpha_Y, \beta_Y, \Delta X, \Delta Y$ являются функциями от масштабных коэффициентов, угла поворота и смещения $(k_X, k_Y, \Delta\theta, \Delta X, \Delta Y)$. Именно вычисление этих шести коэффициентов является целью процедуры калибровки.

Для нахождения шести неизвестных коэффициентов требуется система уравнений, составленная на основе измерений в нескольких контрольных точках.

Трехточечная калибровка. Минимально необходимое количество точек — три, не лежащие на одной прямой. Решение сводится к вычислению обратной матрицы. Данный метод эффективен в системах с низким уровнем шума.

Многоточечная калибровка ($n > 3$). Для повышения устойчивости алгоритма к шумам измерения применяют калибровку по большему числу точек, что приводит к переопределенной системе уравнений. Оптимальное решение, минимизирующее среднеквадратичную ошибку, находится с помощью метода наименьших квадратов через псевдообратную матрицу Мура–Пенроуза [15]. Этот подход статистически усредняет погрешности измерений, повышая точность и надежность результата.

В рамках работы создано приложение калибровки, архитектура которого построена по модульному принципу и включает три компонента: модуль управления процессом калибровки, вычислительный модуль и графический интерфейс пользователя.

Практическая реализация алгоритма включает следующие шаги:

1. На дисплей выводятся n калибровочных меток с известными координатами.
2. Пользователь последовательно касается каждой метки.
3. Для каждого касания фиксируются усредненные «сырые» координаты.

4. После сбора данных вызывается вычислительная процедура: при $n = 3$ вычисляется точное решение системы линейных уравнений. При $n > 3$ применяется метод наименьших квадратов для нахождения оптимальных коэффициентов.

5. Коэффициенты сохраняются в энергонезависимой памяти для последующей коррекции координат каждого касания в реальном времени.

В реализованном приложении используется $n = 5$ (т.н. пятиточечная система), что обеспечивает более высокую точность по сравнению с меньшими значениями n.

Для решения системы уравнений применяется библиотека матричных вычислений, реализованная в вычислительном модуле: расчет производится через псевдообратную матрицу. После успешного завершения калибровки приложение генерирует конфигурационный фрагмент для файла **xorg.conf** с рассчитанными $(\alpha_X, \beta_X, \alpha_Y, \beta_Y, \Delta X, \Delta Y)$, обеспечивая тем самым постоянную коррекцию ввода на системном уровне. Контроль качества калибровки происходит при помощи подсистемы проверки пользовательского ввода, включающей определение двойных и ошибочных касаний с последующим автоматическим сбросом процедуры.

Результаты и обсуждение

Для проверки работоспособности подсистемы ввода, используемой вместе с графической системой, была произведена интеграция с библиотекой GLFW, используемой для создания 3D-приложений на ОСРВ «Багет». Также было создано тестовое приложение, использующее библиотеку GLFW и GUI-фреймворк Nuklear, позволяющее вводить текст, отслеживающее и отображающее нажатие клавиш клавиатуры, а также определяющее перемещение и нажатие клавиш мыши. Данное приложение позволило отладить работу подсистемы ввода: на данный момент работает обработка мыши и нажатия клавиш клавиатуры, а также все стандартные методы ввода текста, кроме обработки зажатых клавиш.

Предложенный механизм hotplug для устройств ввода в X Server обходит зависимость от стандартного стека udev/libinput за счет реализации алгоритма периодического сканирования файловой системы.

Ключевыми особенностями решения являются:

1. Детерминированность: алгоритм с предсказуемым временем выполнения, что критично для ОСРВ.

2. Интеграция с потоком ввода: реализация корректно встроена в многопоточную архитектуру X Server, требующую сборки с флагом *--enable-input-thread*.

3. Надежность: включает комплексную обработку ошибок и корректное управление ресурсами.

4. Детерминированный hotplug: поддерживает динамическое добавление и удаление устройств, число которых не влияет на предсказуемость времени выполнения алгоритма.

Проведенные тесты подтвердили заявленные особенности: устройства типа «мышь» и «клавиатура» корректно добавляются в систему и удаляются из нее в течение заданного интервала опроса (1 секунда). Вносимые алгоритмом задержки являются полностью предсказуемыми и не оказывают негативного влияния на детерминированность выполнения задач реального времени в ОСРВ «Багет». Следовательно, данная реализация демонстрирует возможность адаптации X Server для работы в средах со строгими требованиями к детерминизму и с требованиями к возможности пользовательского ввода с графического интерфейса.

Заключение

Комплекс решений, представленный в данной статье, может быть применен за рамками ОСРВ «Багет», в других детерминированных средах, особенно в ОСРВ с микроядром, имеющих структурные и архитектурные сходства с ОСРВ «Багет». Статья показывает экспериментальную возможность адаптации сложных программных комплексов для работы в детерминированных средах, не основанных на базе Linux и имеющих аппаратные и программные ограничения. Этот подход может быть применен не только для X Server, но и для другого графического ПО на платформах реального времени, например, бортовых индикаторах на транспорте, промышленных контроллерах, медицинском оборудовании, носимых устройствах.

Также в работе представлен прототип программного обеспечения калибровки сенсорных экранов. Он полнофункционально применим, используется широко известная аффинная модель и метод наименьших квадратов для компенсации погрешностей, также имеет механизмы валидации ввода. Прототип прошел апробацию на реальных системах на базе ОСРВ «Багет».

Дальнейшее развитие архитектуры системы может быть направлено как на доработку текущей функциональности и снижение задержек в подсистеме ввода, так и на расширение функциональности в части поддержки устройств, а также безопасности и разделения доступа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Feske N., Hartig H. DOpE — A Window Server for Real-Time and Embedded Systems. *Proceedings of the 24th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS 2003, Cancun, Mexico)*. 2003:74–77. DOI: 10.1109/REAL.2003.1253255.
2. Giatsintov A. M., Mamrosenko K. A., Bazhenov P. A. Architecture of Graphics System with 3D Acceleration Support for Embedded Operating Systems. *Tsinghua Science and Technology*. 2024;29(3):863–873. DOI: 10.26599/TST.2023.9010045.
3. Zhadchenko A. V., Mamrosenko K. A., Giatsintov A. M. Porting X Windows System to Operating System Compliant with Portable Operating System Interface. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020;11(7):17–22.
4. Von Arnim C., Gessner G., Jarwitz M., Lechler A., Riedel O. Updating the Linux TAPRIO Scheduler in Deterministic Time. *Proceedings of the 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA, Stuttgart, Germany)*. 2022:1–7. DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921594.
5. Yang C.-F., Shinjo Y. Obtaining Hard Real-Time Performance and Rich Linux Features in a Compounded Real-Time Operating System by a Partitioning Hypervisor. *Proceedings of the 16th ACM SIGPLAN/SIGOPS International Conference on Virtual Execution Environments (VEE 2020, Lausanne, Switzerland)*. 2020:59–72. DOI: 10.1145/3381052.3381329.
6. Manrique D. *X Window System Architecture Overview*. Режим доступа: https://tldp.org/HOWTO/pdf/XWindow-Overview-HOWTO.pdf.
7. *Wayland Architecture*. Режим доступа: https://wayland.freedesktop.org/architecture.html.
8. Dørum M. Wayland Input Latency. *GitLab Blog*. 2025. Режим доступа: https://gitlab.com/mort96/blog/-/blob/published/content/00000-home/00016-wayland-input-latency.md.
9. Input Subsystem Architecture. *The Linux Kernel Documentation*. Режим доступа: https://docs.kernel.org/input/input.html.
10. Udev. *ALT Linux Wiki*. Режим доступа: https://www.altlinux.org/Udev.
11. What Is libinput? *libinput Documentation*. Режим доступа: https://wayland.freedesktop.org/libinput/doc/latest/what-is-libinput.html.
12. ЭРЕМЕКС. *Разработка встроенных операционных систем реального времени*. Режим доступа: https://www.eremex.ru/upload/iblock/eb6/rtos_dev_book.pdf.
13. *Enea Linux Open Source Report*. Режим доступа: https://linux.enea.com/4.0/documentation/html/book-enea-linux-open-source/index.html.
14. Fang W., Chang T. *Calibration in Touch-Screen Systems*. Режим доступа: https://www.ti.com/lit/an/slyy137/slyy137.pdf.
15. Lewis F. L. *Optimal Estimation: With an Introduction to Stochastic Control Theory*. New York: John Wiley & Sons; 1986. 376 p.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ НЕОДНОРОДНОГО ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА–ПУАЗЕЙЛЯ С ТРЕНИЕМ РЭЛЕЯ

К. В. Губарева[1,а], **Е. Ю. Просвиряков**[2,3,б]

[1] *Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация*

[2] *Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

[3] *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

[а] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9845-8372,* ✍ *r.kristina2017@mail.ru*

[б] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2349-7801, evgen_pros@mail.ru*

Аннотация: для уравнений Навье–Стокса с линейным трением Рэлея построено новое точное решение. Оно описывает трехмерное стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале и обобщает классические течения Куэтта и Пуазейля. Продольная компонента скорости линейно зависит от одной поперечной координаты, а коэффициенты этой зависимости экспоненциально изменяются вдоль другой. На примере воды проведен численный анализ при различных значениях коэффициента трения Рэлея. Исследовано влияние параметра трения на толщину пристеночного слоя и на соотношение вязкой и рэлеевской диссипации энергии. Установлено, что при малых значениях коэффициента трения течение близко к классическим аналогам. При больших значениях формируются тонкие пограничные слои, а диссипация за счет трения Рэлея становится доминирующей. Полученное решение расширяет семейство точных решений гидродинамики и может применяться при моделировании течений в пористых средах, фильтрационных процессов, а также в задачах геофизической гидродинамики.

Ключевые слова: течение Куэтта–Пуазейля, трение Рэлея, точное решение, уравнения Навье–Стокса, пограничный слой, диссипация энергии, неоднородное течение, аналитическая гидродинамика.

Для цитирования: Губарева К. В., Просвиряков Е. Ю. Точное решение уравнений неоднородного течения Куэтта–Пуазейля с трением Рэлея. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):66–73.

Поступила в редакцию: 23.03.2026. *В окончательном варианте: 11.05.2026.*

EXACT SOLUTION OF THE EQUATIONS FOR INHOMOGENEOUS COUETTE–POISEUILLE SHEAR FLOW WITH RAYLEIGH FRICTION

K. V. Gubareva[1,a], **E. Yu. Prosviryakov**[2,3,b]

[1] *Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*

[2] *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation*

[3] *Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation*

[a] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9845-8372,* ✍ *r.kristina2017@mail.ru*

[b] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2349-7801, evgen_pros@mail.ru*

Abstract: we obtained a new exact solution of the modified Navier–Stokes equations with linear Rayleigh friction. The solution describes a three-dimensional steady flow of a viscous incompressible fluid in a plane channel and generalizes the classical Couette and Poiseuille flows. The longitudinal velocity component varies linearly with one transverse coordinate, while the corresponding coefficients vary exponentially with the second transverse coordinate. Using water as an example, we performed a numerical analysis for different values of the Rayleigh friction coefficient. We investigated the effect of the friction parameter on the thickness of the near-wall layer and on the ratio between viscous dissipation and energy dissipation caused by Rayleigh friction. The results show that at low values of the friction coefficient, the flow remains close to the classical solutions. At high values of the friction coefficient, thin boundary layers form, and Rayleigh friction becomes the dominant dissipation mechanism. The proposed solution extends the family of exact solutions in fluid dynamics and can be used to model flows in porous media, filtration processes, and geophysical fluid dynamics problems.

Keywords: Couette–Poiseuille shear flow, Rayleigh friction, exact solution, Navier–Stokes equations, boundary layer, energy dissipation, inhomogeneous flow, theoretical hydrodynamics.

Cite this article: Gubareva K. V., Prosviryakov E. Yu. Exact Solution of the Equations for Inhomogeneous Couette–Poiseuille Shear Flow with Rayleigh Friction. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):66–73.

Original article submitted: 23.03.2026. *Revision submitted: 11.05.2026.*

Введение

Точные решения уравнений гидродинамики важны и для теории, и для проверки численных методов [1, 2]. Это, например, течение Пуазейля в трубах или течение Куэтта между пластинами. Эти решения на протяжении десятилетий служат базой для изучения вязких течений [3, 4]. На их основе проверяют экспериментальные установки и вычислительные алгоритмы [5].

В реальных условиях к уравнениям Навье–Стокса нередко добавляются дополнительные диссипативные члены. Один из них — объемное трение, пропорциональное скорости. Эту модель предложил Рэлей [6]. В геофизической гидродинамике ее применяют для учета турбулентного сопротивления [7], а в задачах фильтрации и течений в пористых средах — для описания сопротивления [8, 9]. Позже модель распространили и на другие задачи, где важно распределенное трение [10, 11]. Линейное трение Рэлея сохраняет линейность уравнений, однако существенно видоизменяет структуру решений [12].

Класс точных решений, объединяющих эффекты Пуазейля (градиент давления), Куэтта (движение стенок) и объемного трения, остается малоизученным [13–16]. На первый взгляд, задача кажется простой, но это не так. Особый интерес представляют решения, в которых продольная скорость линейно зависит от одной поперечной координаты, а коэффициенты этой линейной формы изменяются вдоль другой поперечной координаты [17, 18]. Такая структура характерна для слоистых течений и течений с поперечным сдвигом. Для классических уравнений Навье–Стокса подобные решения известны. Однако их обобщение на случай трения Рэлея практически не рассматривалось. Между тем трехмерные эффекты могут быть существенны, например, в каналах с неоднородными граничными условиями по ширине или при наличии вынужденной поперечной циркуляции [19–21].

В прикладных задачах — фильтрация, пористые среды, крупномасштабная динамика атмосферы и океана — трение Рэлея часто доминирует над вязкостью. Аналитические модели, учитывающие объемное трение, остаются, в основном, одномерными. Точные трехмерные решения в таких постановках практически отсутствуют.

Отсутствие таких решений ограничивает возможности верификации численных моделей, предназначенных для расчета течений с распределенным сопротивлением. Кроме того, без аналитических примеров трудно оценить, как перераспределяется диссипация между вязкостью и трением Рэлея при изменении параметров. Поэтому построение и исследование точного решения в данной постановке представляет не только теоретический, но и прикладной интерес. Фундаментальные вопросы существования и единственности решений уравнений Навье–Стокса обсуждаются в [22–26].

Цель — получение нового точного решения уравнений Навье–Стокса с линейным трением Рэлея, описывающего неоднородное течение Куэтта–Пуазейля в плоском канале. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: вывод аналитического решения; исследование условий разрешимости и ограничений; анализ влияния параметра трения Рэлея на структуру течения; проведение численного эксперимента для изучения разных режимов; исследование пограничного слоя и диссипации энергии.

Постановка задачи и аналитическое решение

Рассмотрим стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале. Течение описывается модифицированными уравнениями Навье–Стокса с линейным членом трения Рэлея [7, 27]:

$$V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\nu\nabla^2 V_x-\lambda V_x, \tag{1}$$

$$V_x\frac{\partial V_y}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\nu\nabla^2 V_y-\lambda V_y, \tag{2}$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}=0,\quad \frac{\partial P}{\partial z}=0, \tag{3}$$

где ν — кинематическая вязкость, $\lambda>0$ — коэффициент трения Рэлея, ρ — плотность жидкости.

Решение будем искать в классе, который обобщает гибридное течение Куэтта–Пуазейля. Предположим, что продольная скорость линейно зависит от поперечной координаты y, а коэффициенты этого разложения могут изменяться в направлении z, перпендикулярном плоскости течения [17, 18]:

$$V_x(x,y,z)=U(z)+a(z)y,\quad V_y(x,y,z)=V(z),\quad V_z\equiv 0. \tag{4}$$

Давление примем линейной функцией горизонтальных координат:

$$P(x,y)=P_0+P_1x+P_2y, \tag{5}$$

где P_1, P_2 — постоянные градиенты давления.

Подставим эти выражения в уравнения (1) — (3). Условие несжимаемости выполняется тождественно. После разделения слагаемых, зависящих от y, получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$V(z)a(z)=-\frac{P_1}{\rho}+\nu U''(z)-\lambda U(z), \tag{6}$$

$$0=\nu a''(z)-\lambda a(z), \tag{7}$$

$$0=-\frac{P_2}{\rho}+\nu V''(z)-\lambda V(z). \tag{8}$$

Введем параметр $k=\sqrt{\lambda/\nu}$. Решения уравнений (7) и (8) запишем через экспоненты [20, 28]:

$$a(z)=Ae^{kz}+Be^{-kz}, \tag{9}$$

$$V(z)=Ce^{kz}+De^{-kz}-\frac{P_2}{\lambda\rho}. \tag{10}$$

Подставим (9) и (10) в уравнение (6). Получим уравнение для $U(z)$:

$$\nu U''-\lambda U=-\frac{P_1}{\rho}-\left(ACe^{2kz}+(AD+BC)+BDe^{-2kz}\right). \tag{11}$$

Найдем его общее решение:

$$U(z)=Ee^{kz}+Fe^{-kz}-\frac{AC}{3\lambda}e^{2kz}-\frac{BD}{3\lambda}e^{-2kz}+\frac{P_1/\rho+AD+BC}{\lambda}. \tag{12}$$

Точное решение системы (1) — (3) представим в виде:

$$a(z)=Ae^{kz}+Be^{-kz},\quad V(z)=Ce^{kz}+De^{-kz}-\frac{P_2}{\lambda\rho},$$

$$U(z)=Ee^{kz}+Fe^{-kz}-\frac{AC}{3\lambda}e^{2kz}-\frac{BD}{3\lambda}e^{-2kz}+\frac{P_1/\rho+AD+BC}{\lambda}, \tag{13}$$

$$V_x(x,y,z)=U(z)+a(z)y,\quad V_y(x,y,z)=V(z),$$

$$P(x) = P_0 + P_1 x,$$

где $A, B, C, D, E, F, P_0, P_1$ — произвольные постоянные, которые определяются из граничных условий.

Рассмотрим канал с нижней стенкой при $z = 0$ и верхней при $z = H$. Зададим условия прилипания:

$$V_x(x, y, 0) = U_0 + a_0 y, \quad V_y(x, y, 0) = V_0, \quad V_x(x, y, H) = U_H + a_H y, \quad V_y(x, y, H) = V_H, \tag{14}$$

где $U_0, a_0, V_0, U_H, a_H, V_H$ — заданные константы.

Подставим решение (13) в условия (14). Получим систему для постоянных:

$$A + B = a_0, \quad Ae^{kH} + Be^{-kH} = a_H, \quad C + D = V_0 + \frac{P_2}{\lambda\rho}, \quad Ce^{kH} + De^{-kH} = V_H,$$

$$E + F - \frac{AC + BD}{3\lambda} + \frac{P_1/\rho + AD + BC}{\lambda} = U_0, \tag{15}$$

$$Ee^{kH} + Fe^{-kH} - \frac{AC}{3\lambda}e^{2kH} - \frac{BD}{3\lambda}e^{-2kH} + \frac{P_1/\rho + AD + BC}{\lambda} = U_H.$$

Систему решаем последовательно: сначала определим A и B, затем C и D, E и F. Градиент давления P_1 может быть задан или определен из дополнительных условий (например, расхода жидкости).

Введем характерные масштабы: H — для длины, U_0 — для скорости, $\rho\nu U_0/H$ — для давления. Определим безразмерные переменные:

$$\tilde{z} = \frac{z}{H}, \quad \tilde{U} = \frac{U}{U_0}, \quad \tilde{a} = \frac{aH}{U_0}, \quad \tilde{V} = \frac{V}{U_0}, \quad \tilde{P}_1 = \frac{P_1 H^2}{\rho\nu U_0}.$$

Введем безразмерный параметр — число Рэлея (отношение силы трения к вязким силам):

$$\Lambda = \frac{\lambda H^2}{\nu} = (kH)^2. \tag{16}$$

В безразмерном виде решение (13) запишется как:

$$\tilde{a}(\tilde{z}) = \tilde{A}e^{\sqrt{\Lambda}\tilde{z}} + \tilde{B}e^{-\sqrt{\Lambda}\tilde{z}},$$

$$\tilde{V}(\tilde{z}) = \tilde{C}e^{\sqrt{\Lambda}\tilde{z}} + \tilde{D}e^{-\sqrt{\Lambda}\tilde{z}} - \frac{\tilde{P}_2}{\Lambda}, \tag{17}$$

$$\tilde{U}(\tilde{z}) = \tilde{E}e^{\sqrt{\Lambda}\tilde{z}} + \tilde{F}e^{-\sqrt{\Lambda}\tilde{z}} - \frac{\tilde{A}\tilde{C}}{3\Lambda}e^{2\sqrt{\Lambda}\tilde{z}} - \frac{\tilde{B}\tilde{D}}{3\Lambda}e^{-2\sqrt{\Lambda}\tilde{z}} + \frac{\tilde{P}_1 + \tilde{A}\tilde{D} + \tilde{B}\tilde{C}}{\Lambda}.$$

Выражения (17) задают семейство решений, параметризованное константами $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}, \tilde{E}, \tilde{F}, \tilde{P}_1, \tilde{P}_2$. Конкретные значения определяются граничными условиями и выбором градиентов давления.

Численный эксперимент

Расчет проведен для воды в плоском канале высотой $H = 1$ см. Параметры модели: кинематическая вязкость $\nu = 10^{-6}$ м^2/с, плотность $\rho = 1000$ кг/м^3. Граничные условия: на нижней стенке ($z = 0$) $U_0 = 0$ м/с, $a_0 = 5$ с$^{-1}$, $V_0 = 0.01$ м/с; на верхней стенке ($z = H$) $U_H = 0.05$ м/с, $a_H = 0$ с$^{-1}$, $V_H = 0$ м/с. Продольный градиент давления $P_1 = -0.5$ Па/м, поперечный $P_2 = 0$. Рассмотрены четыре значения коэффициента трения Рэлея: $\lambda = 0.1; 1; 10; 50$ с$^{-1}$, что соответствует безразмерному параметру Λ в диапазоне от 10 до 5000. Для устойчивости вычислений при

$|x| > 50$ использована асимптотика $\sinh x \approx \operatorname{sign}(x) e^{|x|/2}$, $\cosh x \approx e^{|x|/2}$. Расчеты выполнены в среде MATLAB 2023b [29].

На рис. 1 приведены профили скоростей. С ростом λ осевая скорость $U(z)$ концентрируется в тонком слое у верхней стенки, где задано ненулевое граничное условие $U_H = 0.05$ м/с. Градиент сдвига $a(z)$ при малом трении ($\lambda = 0.1$ с$^{-1}$) практически линейно убывает по высоте канала, а при больших λ экспоненциально затухает, локализуясь вблизи нижней стенки ($z = 0$). Поперечная скорость $V(z)$ также быстро спадает от нижней стенки, формируя пристеночный слой. Полная продольная скорость $V_x(z)$ при $y = 1$ мм отличается от осевой скорости $U(z)$ на величину $a(z)y$, что особенно заметно вблизи нижней стенки, где градиент сдвига максимален; это подтверждает трехмерный характер течения даже при отсутствии явной зависимости от координаты x.

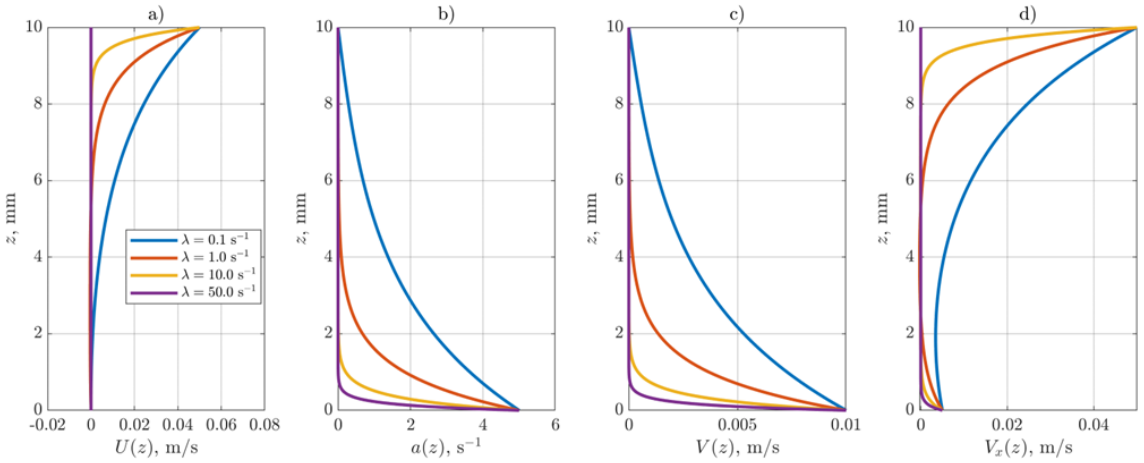


Рис. 1. *Профили скоростей: a) $U(z)$; b) градиент сдвига $a(z)$; c) $V(z)$; d) полная продольная скорость $V_x(z)$ при $y = 1$ мм*

Рис. 2 показывает структуру поля $V_x(y, z)$. В обоих случаях ($\lambda = 1$ и 10 с$^{-1}$) поверхность скорости имеет выраженную кривизну. С ростом λ область высоких градиентов сжимается к стенкам канала. Сечения поля при $\lambda = 10$ с$^{-1}$ (рис. 2c) показывают сильную зависимость от y: при $y = -2$ мм скорость отрицательна вблизи нижней стенки и положительна у верхней; при $y = 0$ профиль совпадает с $U(z)$; при $y = +2$ мм скорость положительна во всем канале и достигает максимальных значений у верхней стенки.

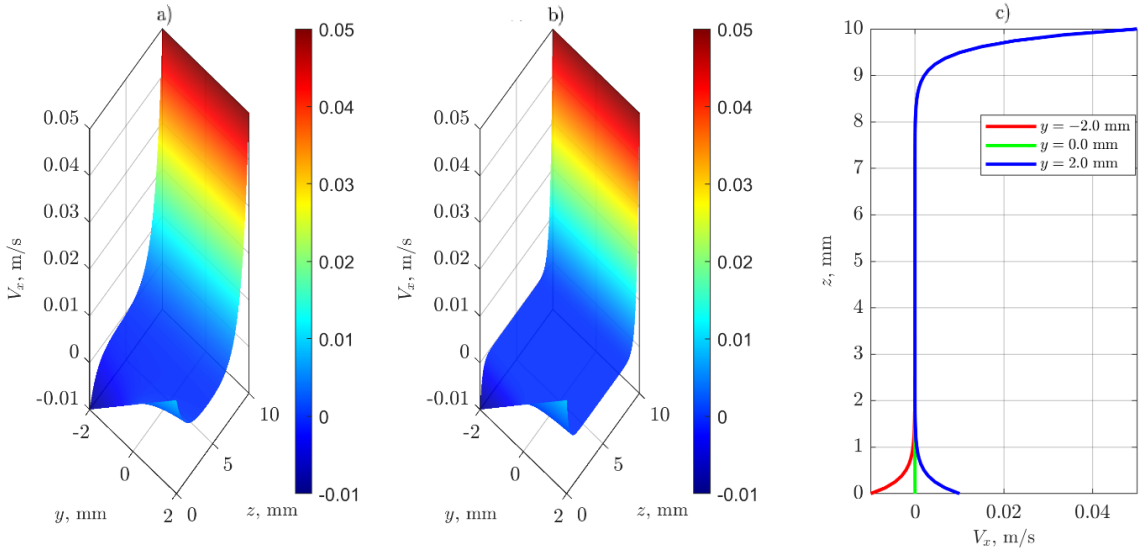


Рис. 2. *Структура поля продольной скорости $V_x(y, z)$: a) $\lambda = 1$ с$^{-1}$; b) $\lambda = 10$ с$^{-1}$; c) сечения при различных значениях y*

На рис. 3 представлены профили диссипации энергии. Вязкая диссипация ε_ν с ростом λ

концентрируется в узком слое у верхней стенки ($z = H$), где градиенты осевой скорости максимальны. Диссипация Рэлея ε_λ становится значимой уже при $\lambda \geq 1$ с$^{-1}$; ее пики наблюдаются у обеих стенок: у верхней — за счет осевой скорости, у нижней — за счет поперечной. Суммарная диссипация при $\lambda = 50$ с$^{-1}$ существенно превышает значения для слабого трения, причем основной вклад вносит рэлеевский механизм.

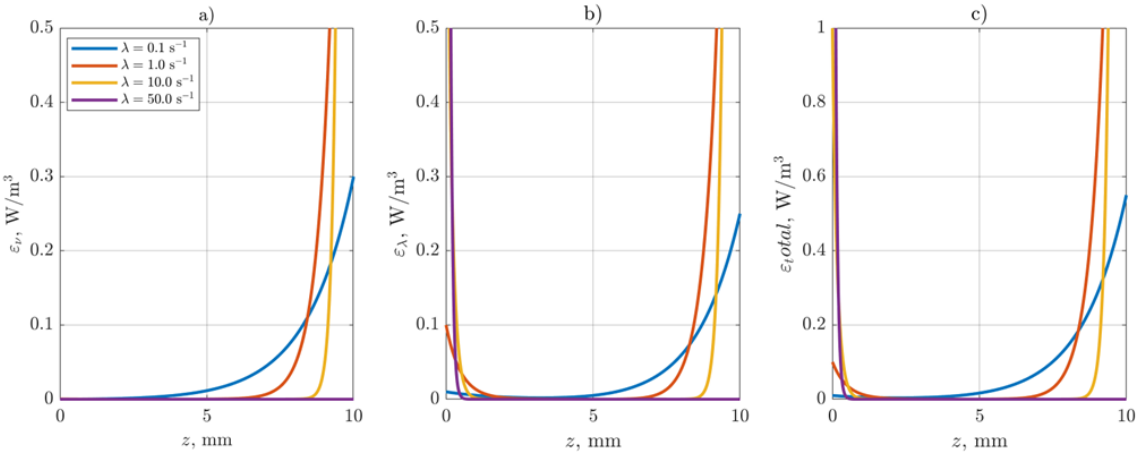


Рис. 3. *Профили диссипации энергии по высоте канала: a) вязкая диссипация ε_ν; b) диссипация Рэлея ε_λ; c) суммарная диссипация $\varepsilon_{общ}$*

На рис. 4 показаны толщина пограничного слоя и доля диссипации Рэлея. Толщину δ определяем как расстояние от нижней стенки, на котором градиент сдвига $a(z)$ падает до 37% от пристеночного значения. С ростом λ толщина уменьшается. Расчетные значения δ близки к теории: при $\lambda = 0.1$ с$^{-1}$ $\delta = 3.13$ мм (теория 3.16 мм), при $\lambda = 50$ с$^{-1}$ $\delta = 0.145$ мм (теория 0.141 мм). При $\lambda > 10$ с$^{-1}$ толщина становится менее 1 мм ($\delta/H < 0{,}1$) — это переход к тонким пристеночным слоям. Доля диссипации Рэлея монотонно растет: 43,4% при $\lambda = 0.1$ с$^{-1}$, 50,0% при $\lambda = 1$ с$^{-1}$, 50,9% при $\lambda = 10$ с$^{-1}$ и 100% при $\lambda = 50$ с$^{-1}$. Значит, при сильном трении Рэлея этот механизм доминирует. Если учитывать только вязкую диссипацию, потери энергии будут сильно занижены.

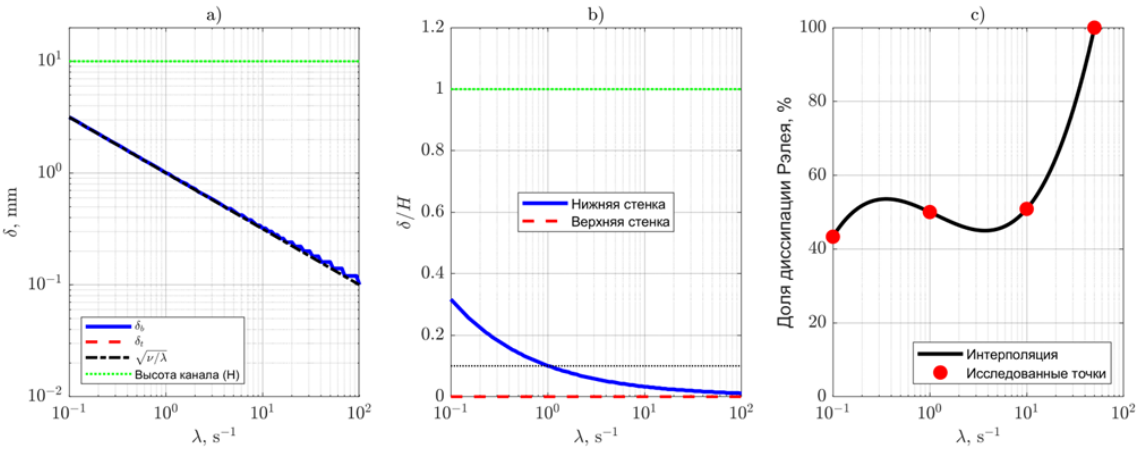


Рис. 4. *Зависимость характеристик пограничного слоя и диссипации от параметра трения Рэлея: a) толщина пограничного слоя δ; b) относительная толщина δ/H; c) доля диссипации Рэлея в общей диссипации*

Обсуждение результатов

Примечательная особенность решения: трение Рэлея, хотя и входит в уравнения линейно, приводит к появлению нелинейных по константам интегрирования членов в решении. Это значит, что продольное сдвиговое течение и поперечная циркуляция не независимы. В классических решениях Куэтта–Пуазейля без трения такой эффект отсутствует.

Введенный безразмерный параметр Λ определяет режим течения [12]. При $\Lambda \ll 1$ течение практически не отличается от классического. При $\Lambda \gg 1$ формируется структура, напоминающая экмановский пограничный слой: возмущения от стенок затухают экспоненциально и в центральной части канала скорость стремится к нулю [30]. Характерная толщина слоя (полученная в численном эксперименте) совпадает с оценками из теории пограничного слоя.

Условие $P_2 = 0$ (отсутствие поперечного градиента давления) необходимо для ограниченности решения в полубесконечной области, но в канале конечной высоты это ограничение не является жестким: при подходящем выборе граничных условий решение остается физичным и при $P_2 \neq 0$. Тем не менее для большинства практических приложений (прямые каналы, фильтрационные течения) поперечный градиент давления естественно считать нулевым.

Важнее всего для практики результат о диссипации. Как показано в численном эксперименте (рис. 4c), доля диссипации Рэлея монотонно возрастает с ростом λ и при больших значениях параметра трения становится определяющей. В пористых средах и при моделировании турбулентного сопротивления пренебрежение этим механизмом может приводить к грубым ошибкам в энергетическом балансе.

Заключение

В работе получено новое точное решение уравнений Навье–Стокса с линейным трением Рэлея для стационарного течения в плоском канале. Решение обобщает классические течения Куэтта и Пуазейля на случай трехмерного неоднородного течения, где продольная скорость линейна по одной поперечной координате с экспоненциально меняющимися коэффициентами.

Показано, что безразмерный параметр Λ является критерием подобия. При малых Λ течение близко к классическому, при больших Λ формируются тонкие пограничные слои у стенок.

Численный эксперимент для воды подтвердил эти закономерности. Установлено, что переход от режима полного заполнения канала к режиму пристеночных слоев происходит при $\lambda \approx 1$–10 с$^{-1}$ ($\Lambda \approx 10^2$–10^3). Толщина пограничного слоя при этом уменьшается обратно пропорционально корню из коэффициента трения, что согласуется с теорией.

Выявлено, что с ростом λ доля диссипации за счет трения Рэлея монотонно увеличивается и при больших значениях параметра становится преобладающей. Это важно для моделирования течений в пористых средах, фильтрации, атмосферных и океанических процессов.

Решение может использоваться для верификации численных методов и как модельная задача для анализа трехмерных течений с распределенным сопротивлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Drazin P. G., Riley N. *The Navier–Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions.* Cambridge University Press; 2006.
2. Wang C. Y. Exact Solutions of the Steady-State Navier–Stokes Equations. *Annual Review of Fluid Mechanics.* 1991;23:159–177.
3. Галкин В. А., Смородинов А. Д., Моргун Д. А. Решение уравнения Навье–Стокса для сталкивающихся потоков. *Успехи кибернетики.* 2023;4(2):8–15. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-2-01.
4. Галкин В. А., Дубовик А. О. Моделирование слоистого течения в неограниченном цилиндре с радиусом, изменяющимся во времени. *Успехи кибернетики.* 2022;3(4):14–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-02.
5. Ershkov S. V., Prosviryakov E. Y., Burmasheva N. V., Christianto V. Towards Understanding the Algorithms for Solving the Navier–Stokes Equations. *Fluid Dynamics Research.* 2021;53(4):044501. DOI: 10.1088/1873-7005/ac10f0.
6. Rayleigh L. On the Dynamics of Revolving Fluids. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A.* 1916;93(648):148–154.
7. Pedlosky J. *Geophysical Fluid Dynamics.* 2nd ed. Springer; 1987.
8. Gubareva K. V., Prosviryakov E. Yu., Eremin A. V. Inhomogeneous Couette–Poiseuille Flow of a Viscous Incompressible Fluid in an Infinite Horizontal Layer with Permeable Boundaries. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures.* 2025;5:6–28. DOI: 10.17804/2410-9908.2025.5.006-028.

9. Gubareva K. V., Prosviryakov E. Yu., Eremin A. V. An Exact Solution with Inhomogeneous Boundary Conditions for a Steady Non-Uniform Couette Flow between Permeable Plates. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2025;5:66–86. DOI: 10.17804/2410-9908.2025.5.066-086.
10. Ekman V. W. On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean-Currents. *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*. 1905;2(11):1–53.
11. Dolzhansky F. V., Krymov V. A., Manin D. Y. Stability and Vortex Structures of Quasi-Two-Dimensional Shear Flows. *Physics-Uspekhi*. 1990;33(7):495–520.
12. Burmasheva N., Ershkov S., Prosviryakov E., Leshchenko D. Exact Solutions of Navier–Stokes Equations for Quasi-Two-Dimensional Flows with Rayleigh Friction. *Fluids*. 2023;8(4):123. DOI: 10.3390/fluids8040123.
13. Berker R. Intégration des équations du mouvement d'un fluide visqueux incompressible. *Strömungsmechanik II. Fluid Dynamics II. Series: Handbuch der Physik. Encyclopedia of Physics*. Springer. 1963;3/8/2:1–384.
14. Овсянников Л. В. *Групповой анализ дифференциальных уравнений*. Наука; 1978.
15. Aristov S. N. *Eddy Currents in Thin Liquid Layers* [dissertation]. Vladivostok: Institute of Automation and Control Processes; 1990.
16. Gubareva K. V., Prosviryakov E. Yu. Exact Analytical Solution to the Problem of Stationary Convection in the Boussinesq Approximation with Account for Viscous Dissipation. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2025;6:23–38. DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.023-038.
17. Lin C. C. Note on a Class of Exact Solutions in Magneto-Hydrodynamics. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. 1958;1:391–395.
18. Sidorov A. F. Two Classes of Solutions of the Fluid and Gas Mechanics Equations and Their Connection to Traveling Wave Theory. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1989;30(2):197–203. DOI: 10.1007/BF00852164.
19. Baranovskii E. S., Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Y. Exact Solutions to the Navier–Stokes Equations with Couple Stresses. *Symmetry*. 2021;13(8):1355. DOI: 10.3390/sym13081355.
20. Zubarev N. M., Prosviryakov E. Y. Exact Solutions for Layered Three-Dimensional Nonstationary Isobaric Flows of a Viscous Incompressible Fluid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019;60(6):1031–1037. DOI: 10.1134/S0021894419060075.
21. Meshalkin L. D., Sinai I. G. Investigation of the Stability of a Stationary Solution of a System of Equations for the Plane Movement of an Incompressible Viscous Liquid. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1961;25(6):1700–1705.
22. Ladyzhenskaya O. A. On Nonstationary Navier–Stokes Equations. *Vestnik Leningradskogo Universiteta*. 1958;19:9–18.
23. Obukhov A. M. Kolmogorov Flow and Laboratory Simulation of It. *Russian Mathematical Surveys*. 1983;38(4):113–126.
24. Polyanin A. D., Zaitsev V. F. *Handbook of Nonlinear Partial Differential Equations*. Chapman & Hall/CRC Press; 2004.
25. Boyd J. P. *Chebyshev and Fourier Spectral Methods*. 2nd ed. Dover Publications; 2001.
26. Titchmarsh E. C. *Eigenfunction Expansions Associated with Second-Order Differential Equations*. 2nd ed. Oxford University Press; 1962.
27. Batchelor G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press; 2000.
28. Schlichting H., Gersten K. *Boundary-Layer Theory*. 9th ed. Springer; 2017.
29. Gubareva K. V., Prosviryakov E. Yu. MATLAB Code for Inhomogeneous Couette–Poiseuille Flow with Rayleigh Friction and Permeable Boundaries. Mendeley Data, V1. 2026. DOI: 10.17632/dcgkct8j8v.1. Режим доступа: https://data.mendeley.com/datasets/dcgkct8j8v/1.
30. Sivashinsky G. I. Weak Turbulence in Periodic Flows. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985;17(2):243–255.

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ МОРСКИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ РОССИЙСКОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

В. Ж. Куклин[1,а], **М. А. Кочаров**[1,б], **Е. А. Тихонов**[2,в], **А. Д. Коцаренко**[1,г]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация*

[2] *Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Российская Федерация*

[а] *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2332-895X,* ✍ *vzh.kuklin@gmail.com*

[б] *ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5235-8484, kocharov@niisi.ras.ru*

[в] *ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1941-127X, tihonov@petrsu.ru*

[г] *ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9227-2661, akots@cs.niisi.ras.ru*

Аннотация: в условиях санкционных ограничений и стратегической задачи освоения Арктической зоны ключевым приоритетом российского судостроения становится обеспечение технологического суверенитета в области судовых электроэнергетических систем (ИЭЭС). В работе представлены результаты этапа НИОКР по разработке устройств локальной автоматизации (УЛА) на базе отечественного микроконтроллера К5500ВК018. Основной проблемой при использовании данной элементной базы в агрессивной морской среде является обеспечение надежного теплоотвода в условиях пассивной вентиляции при температурах окружающего воздуха до 60 °С. Целью исследования была оценка теплового состояния опытных образцов УЛА и оптимизация конструкции корпуса для исключения перегрева критических компонентов. Методология работы основана на численном моделировании сопряженного теплообмена и гидродинамики в пакете SOLIDWORKS Flow Simulation. Проведена проверка сеточной сходимости, учтено тепловое излучение методом дискретного переноса (Discrete Transfer), использованы анизотропные свойства материалов печатных плат.

В ходе расчетов выявлено превышение допустимой температуры микроконтроллера К5500ВК018 в базовой конструкции корпуса. Для устранения перегрева предложена модернизация корпуса с организацией дополнительных вентиляционных отверстий. Результаты показали, что модернизация обеспечила увеличение массового расхода воздуха в зоне тепловыделения на 57,5%, что позволило снизить максимальную температуру микроконтроллера до 84,48 °С при температуре окружающей среды 60 °С (предельное значение — 85 °С). Установлено, что предложенная конструкция обеспечивает надежную работу устройств без применения активных систем охлаждения и радиаторов. Полученные результаты подтверждают возможность серийного производства конкурентоспособных отечественных УЛА для морских ИЭЭС, что вносит вклад в импортозамещение и повышение технологической безопасности отрасли в условиях глобальной нестабильности цепочек поставок.

Ключевые слова: импортозамещение, судовая автоматика, морские электроэнергетические системы, Багет-ПЛК, Комдив-МК, АЦП AD7606B, тепловое состояние, численное моделирование, технологический суверенитет.

Благодарности: работа выполнена в рамках темы «1023032900401-5-1.2.1 Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения (FNEF-2024-0002)», реализуемой НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по тематическому плану НИОКР, выполняемых в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Для цитирования: Куклин В. Ж., Кочаров М. А., Тихонов Е. А., Коцаренко А. Д. Оценка теплового состояния устройства локальной автоматизации для морских электроэнергетических систем на базе российской элементной базы. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):74–83.

Поступила в редакцию: 30.04.2026. *В окончательном варианте: 18.06.2026.*

THERMAL ANALYSIS OF A LOCAL AUTOMATION UNIT IN MARINE INTEGRATED ELECTRICAL POWER SYSTEMS USING DOMESTIC COMPONENTS

V. Zh. Kuklin[1,a], **M. A. Kocharov**[1,b], **E. A. Tikhonov**[2,c], **A. D. Kotsarenko**[1,d]

[1] *Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation*

[2] *Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation*

[a] *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2332-895X, ✍ vzh.kuklin@gmail.com*

[b] *ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5235-8484, kocharov@niisi.ras.ru*

[c] *ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1941-127X, tihonov@petrsu.ru*

[d] *ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9227-2661, akots@cs.niisi.ras.ru*

Abstract: we studied the development of local automation devices (LADs) for marine integrated electric power systems (IEES) under conditions of technological sovereignty requirements in the Russian shipbuilding industry. We focused on LAD prototypes based on the domestic microcontroller K5500VK018 and analyzed thermal constraints associated with their operation in harsh marine environments. We examined heat dissipation under passive ventilation conditions at ambient air temperatures up to 60 °C and evaluated the thermal state of the devices. We also optimized the enclosure design to prevent overheating of critical components.

We used numerical simulation of conjugate heat transfer and fluid dynamics implemented in SolidWorks Flow Simulation. We performed grid convergence analysis, accounted for thermal radiation using the Discrete Transfer method, and incorporated anisotropic thermal properties of printed circuit board materials. We found that the baseline enclosure design caused the K5500VK018 microcontroller to exceed its maximum allowable operating temperature. We proposed a modified enclosure design with additional ventilation openings.

We showed that the modified design increased the mass airflow rate in the heat-generating zone by 57.5% and reduced the maximum microcontroller temperature to 84.48 °C at an ambient temperature of 60 °C (limit: 85 °C). We demonstrated that the proposed design ensures reliable operation of the device without active cooling systems or heat sinks. The results confirm the feasibility of mass production of domestic LADs for marine IEES and indicate improved technological independence in the context of global supply chain instability.

Keywords: import substitution, marine automation, marine power systems, BAGET-PLC, Komdiv-MK, AD7606B ADC, heat transfer state, computer-aided simulation, technological sovereignty.

Acknowledgements: this work was carried out within the framework of the Mathematical Modeling of Multiscale Dynamic Processes and Virtual Environment Systems R&D project No. 1023032900401-5-1.2.1 (FNEF-2024-0002), conducted at the NRC "Kurchatov Institute" – SRISA under a government order.

Cite this article: Kuklin V. Zh., Kocharov M. A., Tikhonov E. A., Kotsarenko A. D. Thermal Analysis of a Local Automation Unit in Marine Integrated Electrical Power Systems Using Domestic Components. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):74–83.

Original article submitted: 30.04.2026. *Revision submitted: 18.06.2026.*

Введение

Современное российское судостроение, ориентированное на освоение Арктической зоны и развитие флота с интегрированными электроэнергетическими системами (ИЭЭС), сталкивается с критической зависимостью от импортного оборудования. Хотя ведущие зарубежные производители ИЭЭС для судостроения, такие как ABB (Швейцария), а также Siemens Energy (Германия) и GE Marine (США) [1] не полностью ограничили поставки через третьи страны, но высокая стоимость и главное — низкая надежность таких логистических цепочек ставят перед отечественной наукой задачу импортозамещения данного типа оборудования.

Особого внимания требует необходимость соответствия жестким требованиям к оборудованию, работающему в условиях морской среды: устойчивость к вибрациям, широкому температурному диапазону, повышенной влажности и соленой атмосфере, а также обеспечение высочайшей

надежности и отказоустойчивости в соответствии с правилами Российского морского регистра судоходства (РМРС) и другой нормативной документации [2, 3]. Важность этого направления подчеркивается в Стратегии развития судостроительной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года [4–6].

Так как температурные режимы работы морских судов могут быть достаточно высокими (до 60 °С), то определение теплового режима и выбор системы охлаждения электронного блока являются крайне важными техническими задачами, решение которых обеспечит надежность и безотказность работы компонентов устройств локальной автоматизации (УЛА).

На данном этапе выполнения НИОКР решены следующие задачи:

1) разработана конструкция корпуса для опытного комплекта устройств локальной автоматизации;

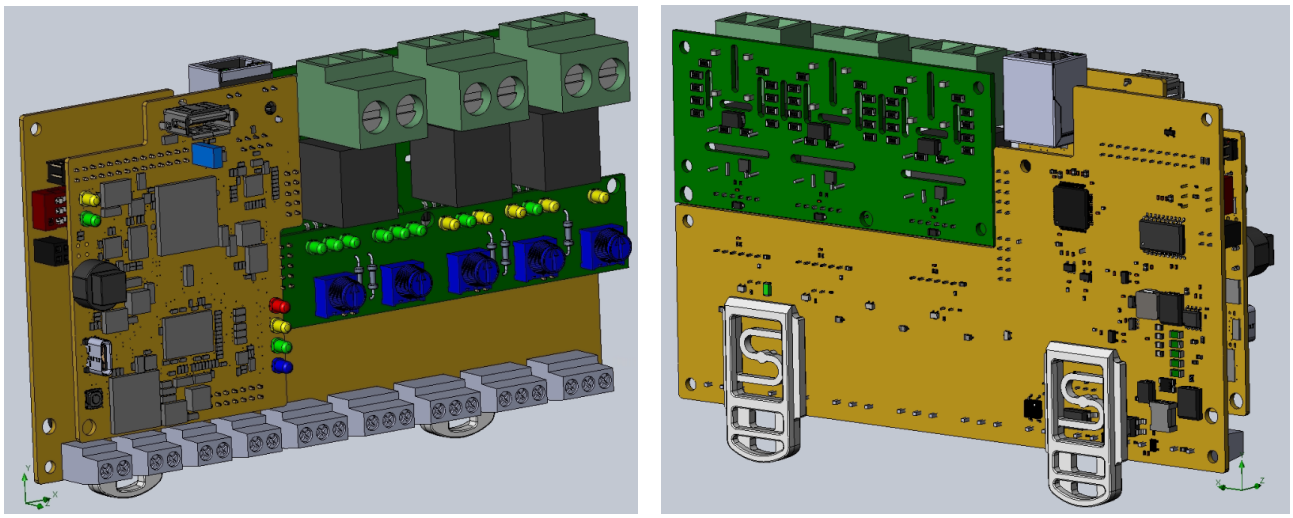
2) разработана численная модель, учитывающая мощности тепловыделения микросхем и позволяющая рассчитывать поля температур как воздуха, так и твердых компонентов, а также поля скоростей движения воздуха как вокруг, так и внутри корпуса из-за естественной конвекции;

3) выполнена оценка теплового состояния устройства в диапазоне температур окружающего воздуха от 40 до 60 °С;

4) выполнена модернизация корпуса устройства, улучшающая условия пассивной вентиляции и обеспечивающая температурный режим, исключающий перегрев тепловыделяющих микросхем во всем диапазоне эксплуатационных температур.

Материалы и методы

Функциональная нагрузка на УЛА включает следующее: контроль электрических параметров (U, I, $\cos(\varphi)$ и т.д.), защиту от аварийных режимов (перегрузка, короткое замыкание, асимметрия фаз), автоматическую синхронизацию генераторов, балансировку активной и реактивной мощности. Диапазон рабочих температур согласно РМРС составляет от –25 °С до +55 °С. Примем максимальную температуру — 60 °С. Внешний вид разработанного устройства представлен на рисунке 1.



а *б*

Рис. 1. *Внешний вид разработанного устройства: а — передняя сторона; б — задняя сторона*

В качестве аппаратной платформы для разработки компонентов УЛА выбран микропроцессорный модуль, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» [7]. Основные тепловыделяющие микросхемы следующие:

1) ОЗУ DDR3 MT41K256M16TW-107-IT:P — 512 Мбайт (рисунок 2, А);

2) микроконтроллер — К5500ВК018 (300 МГц, ядро с архитектурой КОМДИВ64, совместимой с MIPS64) (рисунок 2, В);

3) аналогово-цифровой преобразователь AD7606B (рисунок 2, С).

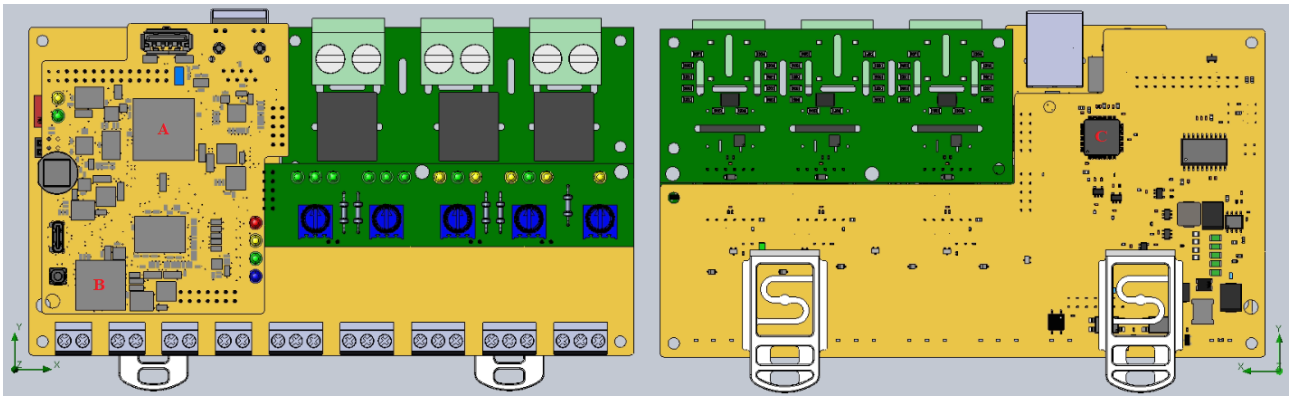


Рис. 2. *Источники тепла разработанного устройства: A — MT41K256M16TW-107-IT:P; B — K5500BK018; C — АЦП AD7606B*

Спроектированный корпус устройства, состоящий из основы и крышки, показан на рисунке 3.

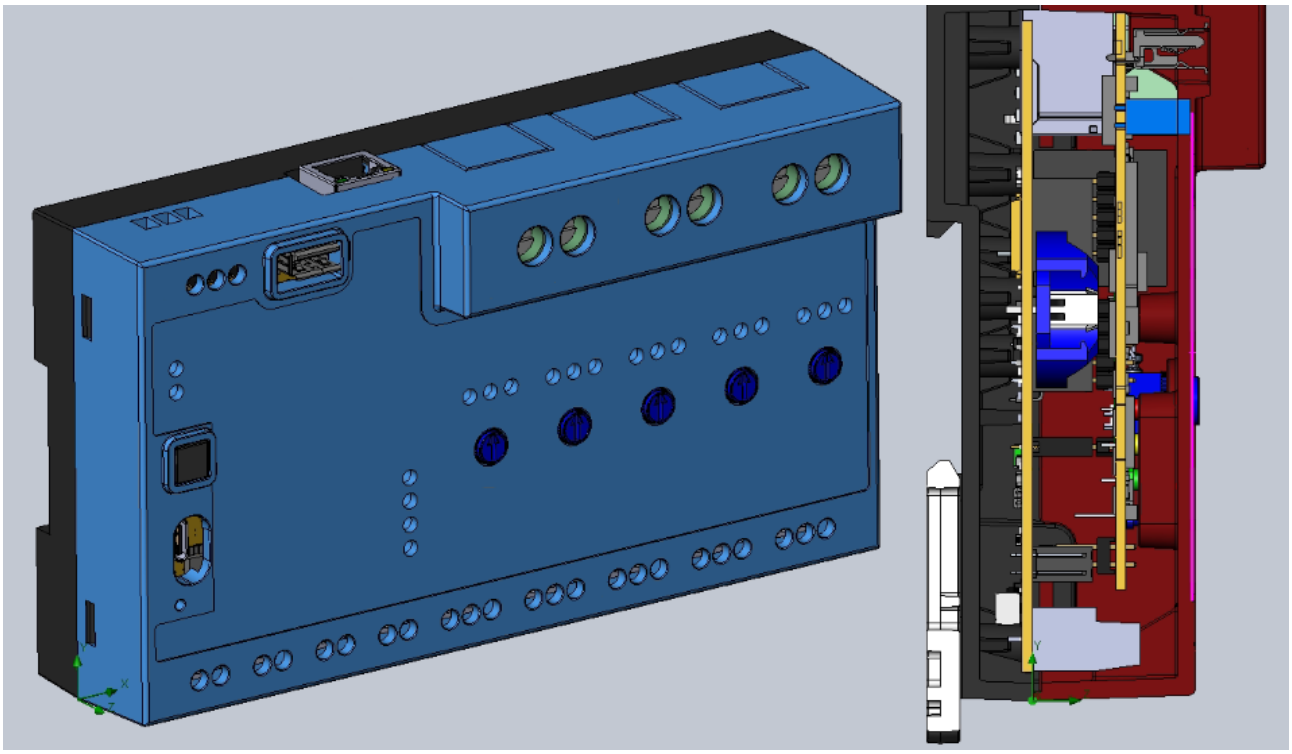


Рис. 3. *Корпус устройства*

Мощность тепловыделения и допустимые температуры источников указаны в таблице 1.

Таблица 1

Мощности тепловых источников и предельные значения температур

Источник	**Мощность тепловыделения, Вт**	**Предельная температура, °C**
K5500BK018	0,5128	85
MT41K256M16TW-107-IT:P	0,3699	95
АЦП AD7606B	0,1800	85

Для моделирования теплового состояния используем систему численного моделирования

FlowSimulation [8, 9]. Важнейшим этапом построения расчетной модели является построение расчетной сетки и проверка сеточной сходимости, а также задание теплофизических свойств [10]. При этом использовалось локальное мельчение расчетной сетки в объемах тепловыделяющих компонентов (таблица 2).

Таблица 2

Настройки расчетной сетки

Тип сетки	**Уровень разрешения расчетной сетки**
Базовая сетка	0,5128
Тепловыделяющие компоненты	0,3699
Печатные платы	0,1800

Внешний вид расчетной сетки в сечении, пересекающем тепловыделяющие компоненты, представлен на рисунках 4 и 5.

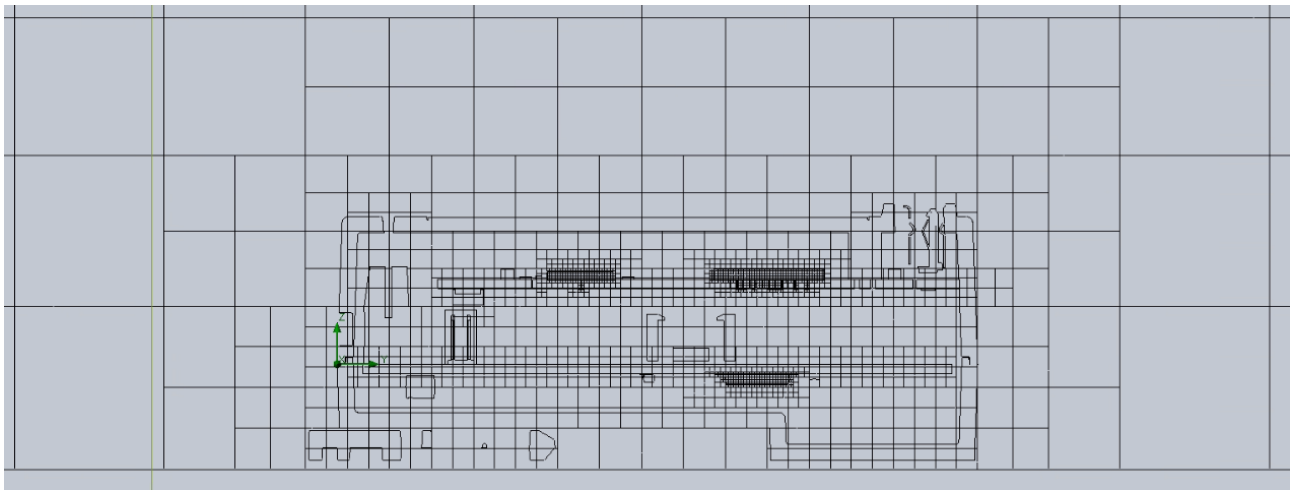


Рис. 4. *Вид расчетной сетки в сечении, пересекающем тепловыделяющие компоненты*

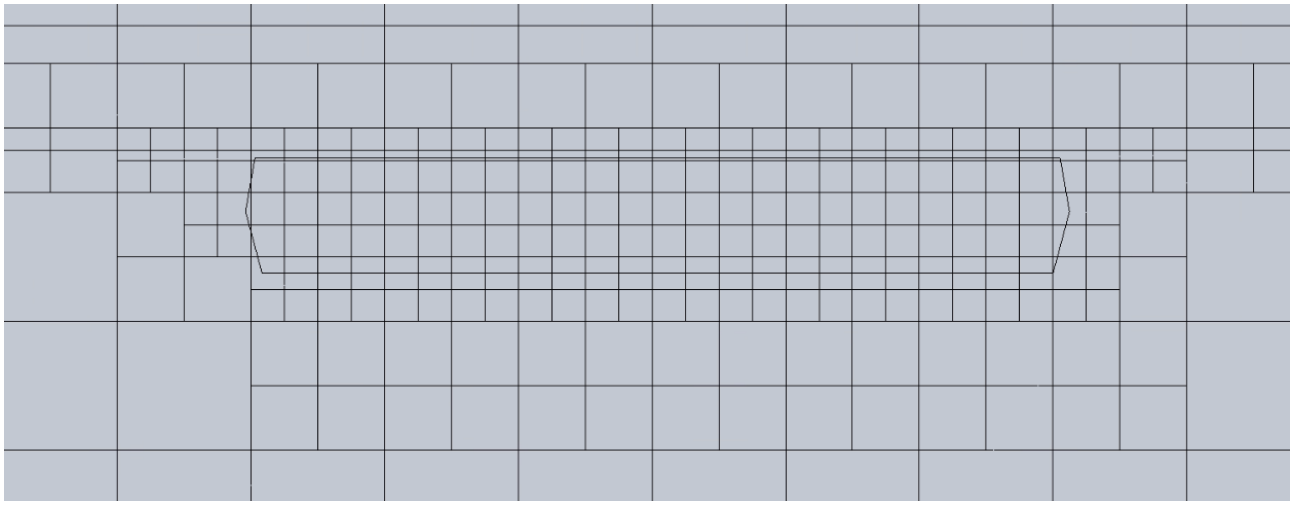


Рис. 5. *Вид расчетной сетки в зоне АЦП AD7606B*

Результаты расчета сеточной сходимости представлены на рисунке 6.

Как видно, сеточная сходимость достигается при уровне разрешения базовой сетки — 7 и минимальном зазоре улучшения канала — 0,02 м. Внешний вид расчетной сетки в сечении представлен на рисунках 7 и 8.

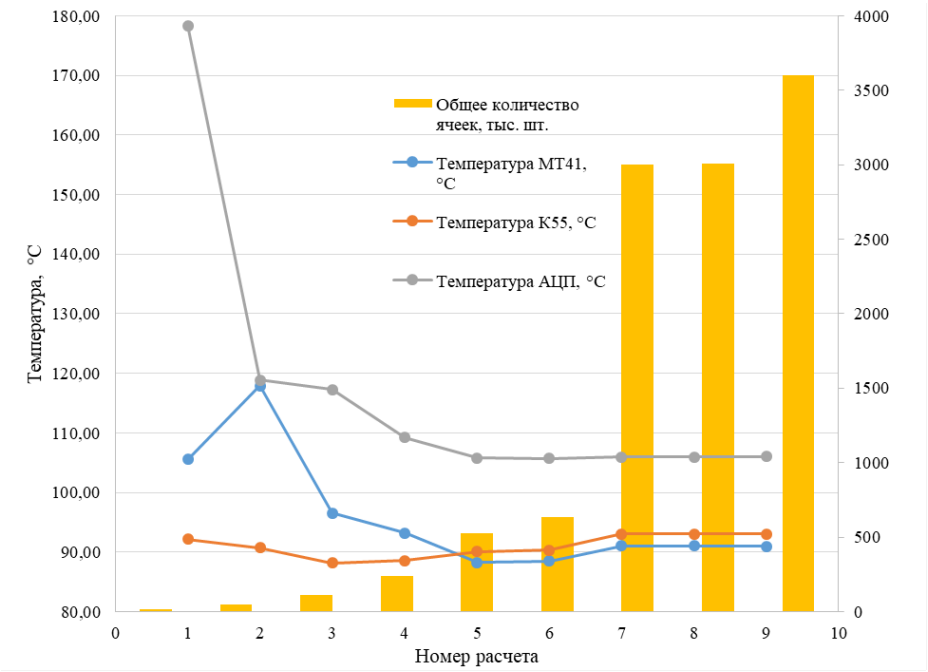


Рис. 6. *Результаты расчета сеточной сходимости*

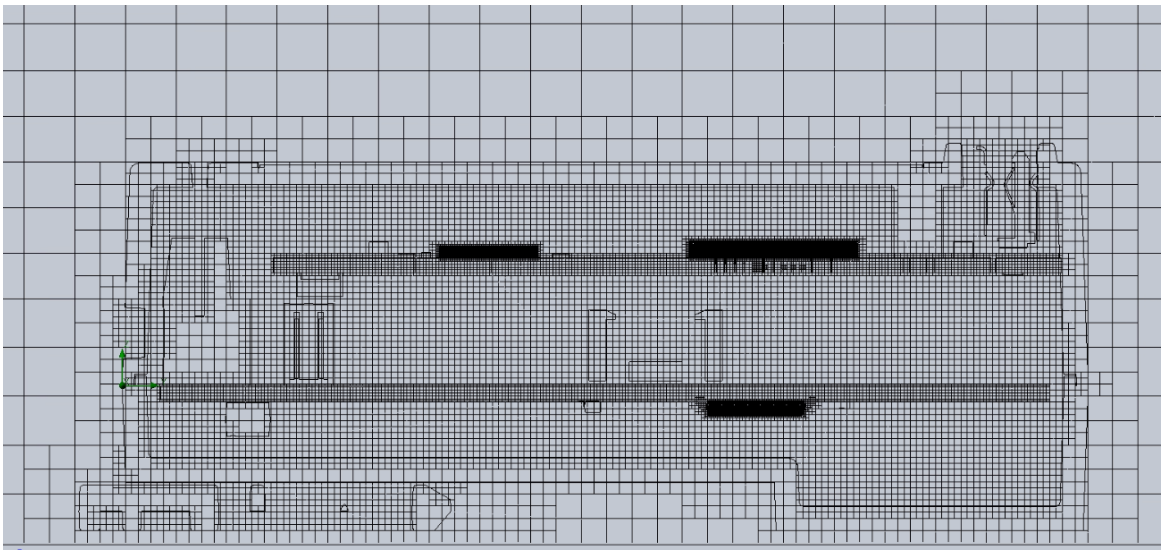


Рис. 7. *Вид расчетной сетки в сечении, пересекающем тепловыделяющие компоненты*

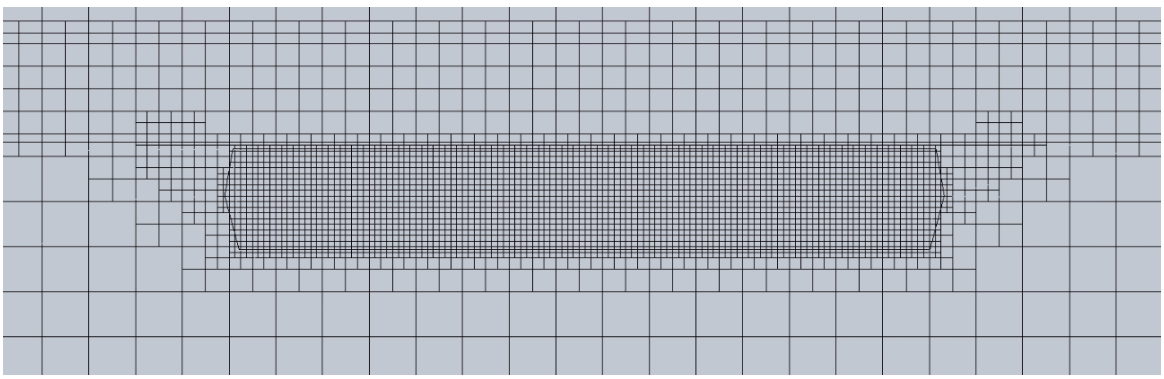


Рис. 8. *Вид расчетной сетки в зоне АЦП AD7606B*

Для учета влияния излучения используем метод дискретного переноса. Для расчета излучения используются все поверхности сборки при коэффициенте эмиссии, равном 0,9. Материал печатных плат — FR4 HiTg.

Результаты

Результаты серии расчетов с постепенным понижением температуры с 60 °C представлены на рисунке 9.

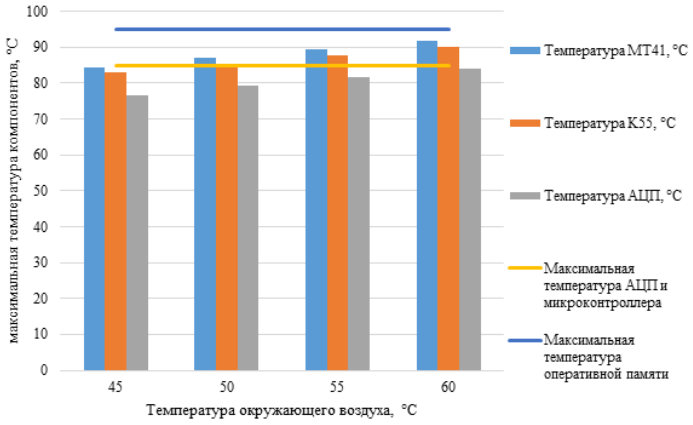


Рис. 9. *Результаты расчетов*

Поля распределения температур по поверхности корпуса и конвекционные потоки вокруг представлены на рисунке 10.

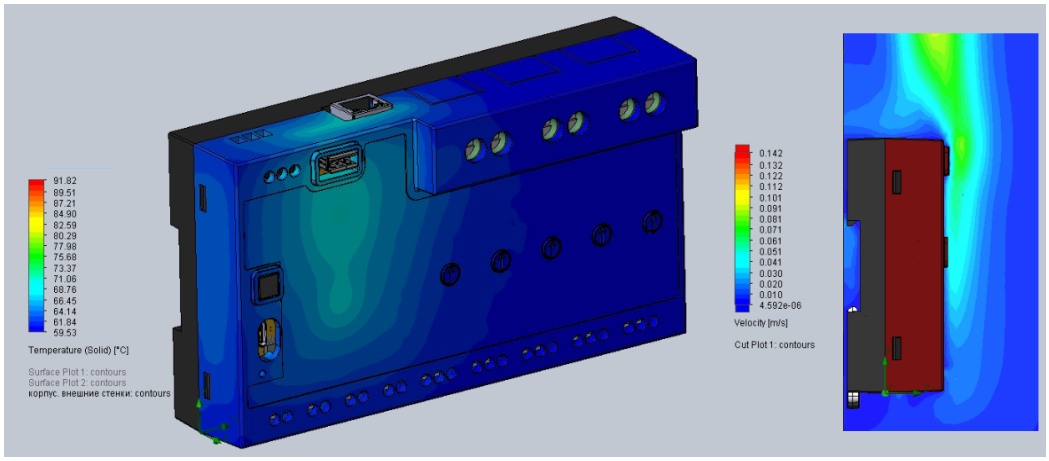


Рис. 10. *Поля распределения температур по поверхности корпуса и конвекционные потоки вокруг*

Поля распределений температур печатных плат показаны на рисунке 11.

Как видно из рисунков, температурные нагрузки на переднюю плату значительно выше. Это связано как с большей мощностью тепловыделения (передняя плата — 0,8827 Вт, задняя — 0,180 Вт), так и с особенностями течения воздуха внутри корпуса (рис. 12).

В нижней части корпуса под источниками тепловыделения были выполнены дополнительные вентиляционные отверстия (рис. 13) для входа воздуха.

Результаты расчета с модернизированным корпусом представлены на рисунке 14.

Максимальная температура микроконтроллера при температуре окружающего воздуха 60 °C составляет 84,48 °C и не превышает допустимого значения.

Для оценки расхода воздуха определим массовый расход воздуха через поверхность, показанную на рисунке 15.

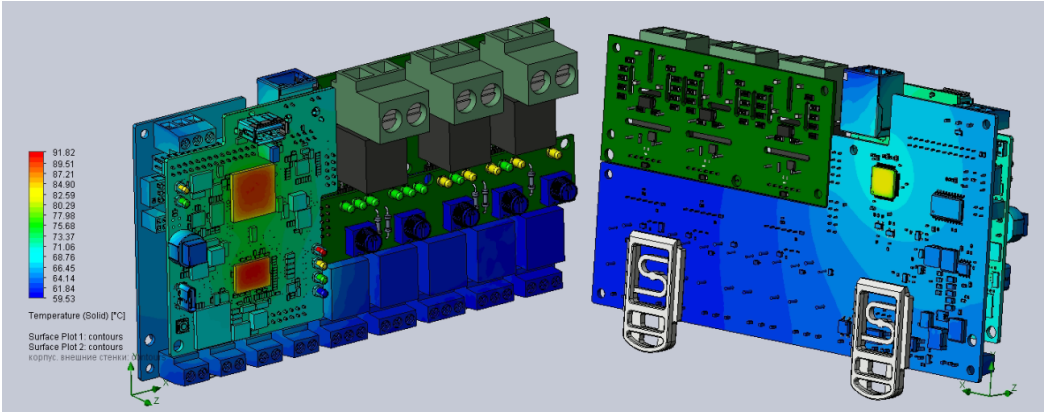


Рис. 11. *Поля распределений температур печатных плат*

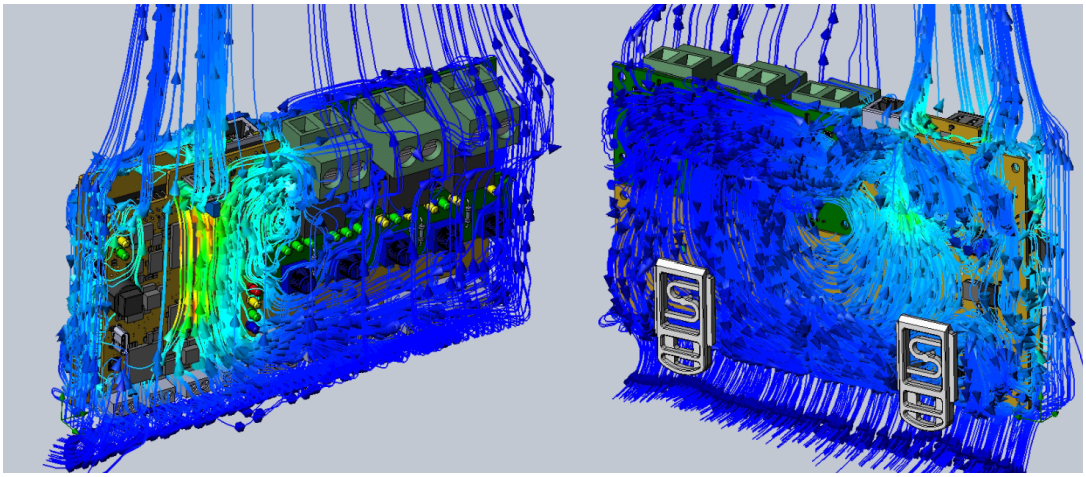


Рис. 12. *Линии тока воздуха внутри корпуса устройства*

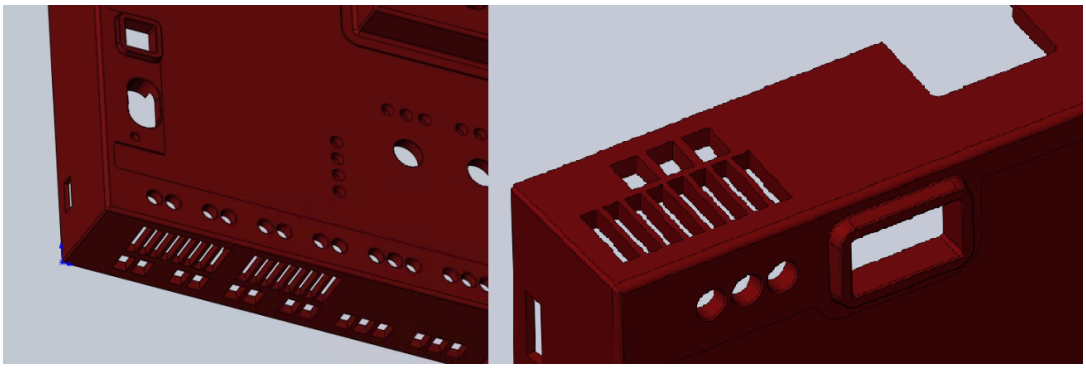


Рис. 13. *Дополнительные вентиляционные отверстия в нижней и верхней частях корпуса*

Данная поверхность полностью перекрывает зазор между корпусом и печатной платой. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

Расчет массового расхода воздуха

Тип корпуса	**Массовый расход воздуха, кг/с**	**Отклонение, %**
Базовый корпус	3,46526E-06	0
Модернизированный корпус	5,45891E-06	57,5

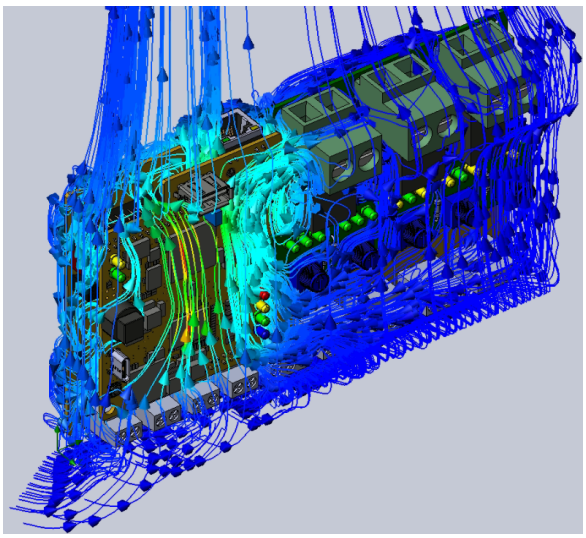


Рис. 14. *Линии тока внутри устройства с модернизированным корпусом*

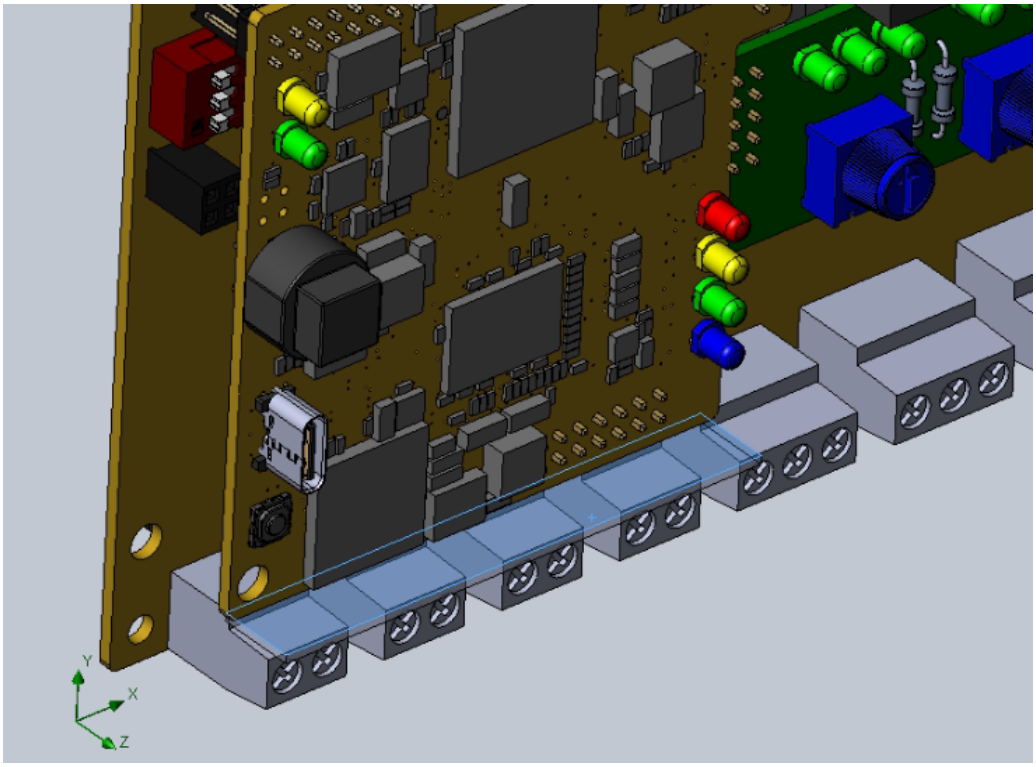


Рис. 15. *Поверхность для оценки массового расхода воздуха*

Как видим, расход воздуха в зоне размещения микроконтроллера в модернизированном корпусе вырос более чем на 50%. Данное обстоятельство объясняет снижение максимальной температуры микроконтроллера до приемлемых значений.

Обсуждение и заключение

В рамках выполненного этапа НИОКР впервые применена платформа на базе отечественного микроконтроллера К5500ВК018 в составе морских УЛА. Предложена унифицированная архитектура, позволяющая на одной аппаратной базе реализовать 7 функционально различных устройств. Разработаны и изготовлены макетные образцы электронных устройств. Разработаны детали корпуса, которые обеспечивают пассивную систему охлаждения тепловыделяющих компонентов: микроконтроллера, оперативной памяти и АЦП. Результаты показали недостаточный теплоотвод от микроконтроллера К5500ВК018 и превышение его максимальной температуры бо-

лее чем на 5 °C. Модернизация корпуса с организацией входного и выходного вентиляционных отверстий в зоне размещения микроконтроллера позволила снизить максимальную расчетную температуру до 84,48 °C при максимальной температуре, равной 85 °C.

Работа выполнена в рамках комплексной темы «1023032900401-5-1.2.1 Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения (FNEF-2024-0002)», реализуемой НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по тематическому плану НИОКР, выполняемых в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ), вносит вклад в обеспечение технологического суверенитета и формирует основу для серийного производства конкурентоспособного оборудования в условиях глобальной нестабильности цепочек поставок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thongam J. S., Tarbouchi M., Okou A. F., Bouchard D., Beguenane R. All-Electric Ships – A Review of the Present State of the Art. *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 2013:1–8. DOI: 10.1109/ever.2013.6521626.
2. *Морской регистр судоходства.* Режим доступа: https://rs-class.org/.
3. *ГОСТ Р 58095.12–2020. Судовое электрооборудование. Часть 12. Требования к устройствам автоматики.* М.: Стандартинформ; 2020.
4. *Стратегия развития судостроительной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 14.12.2020 № 3614-р.* Режим доступа: https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012170013.
5. Иванов А. Б., Петров С. Н. Импортозамещение в судовой автоматике: вызовы и решения. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение.* 2024;2:45–58. DOI: 10.18698/0236-3941-2024-2-45-58.
6. Козлов Д. В. Применение отечественных микроконтроллеров в промышленной автоматике *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2025;1:12–21.
7. *БАГЕТ-ПЛК1-01: Платформа программно-логического управления на базе отечественного микроконтроллера.* М.: НИЦ «Курчатовский институт»; 2023.
8. Boukhanouf R., Haddad A. A CFD Analysis of an Electronics Cooling Enclosure for Application in Telecommunication Systems. *Applied Thermal Engineering.* 2010;30(16):2426–2434. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.06.012.
9. Dipu Md N., Apu M. H., Chowdhury P. P. Optimization of the Desktop CPU's Straight Heatsink via CFD Simulation by Solidworks Flow Simulation. *International Journal of Pioneering Technology and Engineering.* 2025;4:1–16. DOI: 10.56158/jpte.2025.113.4.01.
10. Семенов А. Б., Куцбах А. А., Муранов А. Н., Семенов Б. И. Разработка методики математического моделирования процесса литья под давлением полимеров, наполненных металлическими порошками. *Технология металлов.* 2019;1:9–16. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-1-0-9-16.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОГЛАСОВАНИЯ GAAS КРИСТАЛЛА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА С КЕРАМИЧЕСКИМ КОРПУСОМ QFN

В. В. Шеденко[а], С. У. Увайсов[б], В. С. Иванов[в], М. С. Христюк[г]
МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация
[а] *ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2833-6277,* ✍ *ShedenkoVV@mail.ru*
[б] *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1943-6819, uvajsov@mirea.ru*
[в] *ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9827-1690, ivanov_vs@mirea.ru*
[г] *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7721-3631, khristuk.n15@gmail.com*

Аннотация: в статье исследовано согласование GaAs СВЧ-усилителя мощности с керамическим корпусом типа QFN. Показано, что исходная конфигурация корпуса не обеспечивает требуемого согласования вследствие влияния паразитных параметров выводов, межсоединений и центральной заземляющей площадки.

Исследование основано на электромагнитном моделировании структуры «кристалл — корпус» и анализе S-параметров. Проведена модификация геометрии корпуса, включающая изменение конфигурации заземляющей площадки, сигнальных выводов и соединительных проводников. Показано, что формирование многозвенной реактивной структуры позволяет улучшить согласование и снизить влияние паразитных параметров без применения дополнительных внешних согласующих цепей.

Ключевые слова: усилитель мощности, СВЧ-диапазон, арсенид галлия, корпус QFN, согласование импеданса, паразитные параметры, S-параметры.

Для цитирования: Шеденко В. В., Увайсов С. У., Иванов В. С., Христюк М. С. Исследование согласования GaAs кристалла усилителя мощности СВЧ-диапазона с керамическим корпусом QFN. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):84–93.

Поступила в редакцию: 11.05.2026. *В окончательном варианте: 20.05.2026.*

IMPEDANCE MATCHING OF A GAAS MICROWAVE POWER AMPLIFIER DIE TO A CERAMIC QFN PACKAGE

V. V. Shedenko[a], S. U. Uvaysov[b], V. S. Ivanov[c], M. S. Hristyuk[d]
MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation
[a] *ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2833-6277,* ✍ *ShedenkoVV@mail.ru*
[b] *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1943-6819, uvajsov@mirea.ru*
[c] *ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9827-1690, ivanov_vs@mirea.ru*
[d] *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7721-3631, khristuk.n15@gmail.com*

Abstract: we studied impedance matching between a GaAs microwave power amplifier and a ceramic QFN package. We showed that the initial package configuration does not provide adequate impedance matching due to parasitic effects from the package leads, bond wires, and the central ground pad. We based the analysis on electromagnetic simulations of the die–package structure and S-parameter evaluation. We then modified the package geometry by adjusting the ground pad layout, signal leads, and bond-wire interconnects. We showed that introducing a multistage reactive structure improves impedance matching and reduces the influence of parasitic elements without the need for external matching circuits.

Keywords: power amplifier, microwave frequency range, gallium arsenide, QFN package, impedance matching, parasitic parameters, S-parameters.

Cite this article: Shedenko V. V., Uvaysov S. U., Ivanov V. S., Hristyuk M. S. Impedance Matching of a GaAs Microwave Power Amplifier Die to a Ceramic QFN Package. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):84–93.

Original article submitted: 11.05.2026. *Revision submitted: 20.05.2026.*

Введение

Усилители мощности СВЧ-диапазона на арсениде галлия широко применяются в радиолокационных и телекоммуникационных системах [1]. При работе в диапазоне 9–11 ГГц паразитные

параметры корпуса начинают существенно влиять на импедансные характеристики активного кристалла.

Корпуса типа QFN широко используются в СВЧ-устройствах благодаря малым габаритам и эффективному теплоотводу [2]. Однако паразитные параметры выводов, bond-wire соединений и заземляющей площадки могут ухудшать согласование усилителя.

Целью работы является исследование влияния конструктивных параметров QFN-корпуса на согласование GaAs СВЧ-усилителя мощности и разработка подхода к его улучшению без применения внешних согласующих цепей.

Анализ предметной области и постановка задачи

В диапазоне 9–11 ГГц выводы, bond-wire соединения и центральная заземляющая площадка корпуса QFN формируют распределенную реактивную структуру, существенно влияющую на входной и выходной импедансы усилителя [3]. Паразитная индуктивность выводов совместно с емкостями относительно заземляющей области ухудшает согласование и изменяет характеристики системы «кристалл — корпус».

Центральная заземляющая площадка обеспечивает теплоотвод и одновременно влияет на распределение токов возврата и паразитные связи между цепями устройства. В результате характеристики кристалла в составе корпуса могут существенно отличаться от параметров отдельного кристалла.

В работе исследуется система «кристалл — корпус QFN» с неудовлетворительным входным согласованием исходной конфигурации. Требовалось обеспечить $|S11| \leq -10$ дБ и $|S22| \leq -4$ дБ в диапазоне 9–11 ГГц при сохранении требуемого усиления путем модификации геометрии корпуса без применения внешних согласующих цепей.

Методика моделирования и исходная модель

Исследование проводилось в среде Keysight ADS с использованием электромагнитного решателя Momentum [4, 5]. Корпус QFN моделировался как многослойная структура с учетом сигнальных выводов, центральной заземляющей площадки и bond-wire соединений.

Кристалл усилителя мощности задавался двухпортовой моделью S2P, подключенной к электромагнитной модели корпуса, представленной файлом S4P (рис. 1). Формировалась комбинированная модель системы «кристалл — корпус» [6].

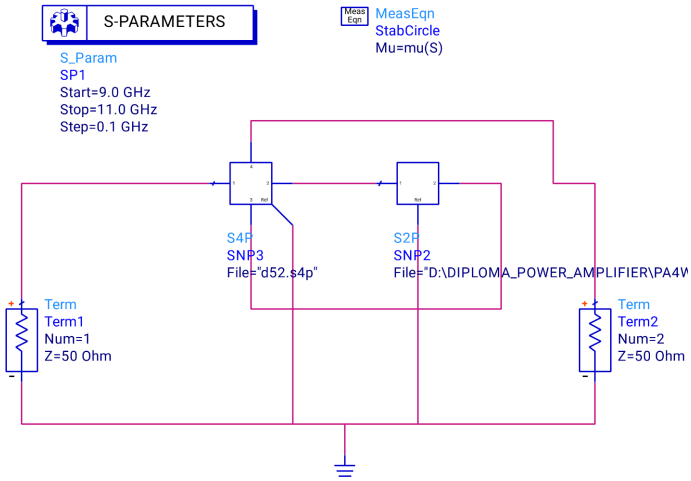


Рис. 1. *Эквивалентная схема структуры «кристалл — корпус»*

Входной импеданс системы «кристалл — корпус» может быть представлен в виде формулы (1):

$$Z_{in} = R_{in} + j\omega L_{in} + \frac{1}{j\omega C_{in-paddle}}, \tag{1}$$

где L_{in} — индуктивность соединительных проводников, C_{in} — паразитная емкость между входной цепью и центральной заземляющей площадкой.

Выходной импеданс системы «кристалл — корпус» может быть представлен в виде формулы (2):

$$Z_{out} = R_{out} + j\omega L_{out} + \frac{1}{j\omega C_{out-paddle}}, \tag{2}$$

где L_{out} — индуктивность соединительных проводников, C_{out} — паразитная емкость между выходной цепью и центральной заземляющей площадкой.

Комплексная проводимость паразитного взаимодействия через общую заземляющую область может быть оценена выражением (3):

$$Y_{fb} \approx j\omega C_{in-paddle} + j\omega C_{out-paddle} + Y_{gnd}, \tag{3}$$

где Y_{fb} — эквивалентная комплексная проводимость паразитного взаимодействия, Y_{gnd} — комплексная проводимость общей области заземления.

Результаты моделирования и оптимизация конструкции корпуса

На первом этапе выполнено моделирование исходной конструкции корпуса QFN с подключенным кристаллом усилителя мощности (рис. 2). Исходная конфигурация корпуса характеризовалась реактивной структурой, не обеспечивающей требуемого согласования в диапазоне 9–11 ГГц.

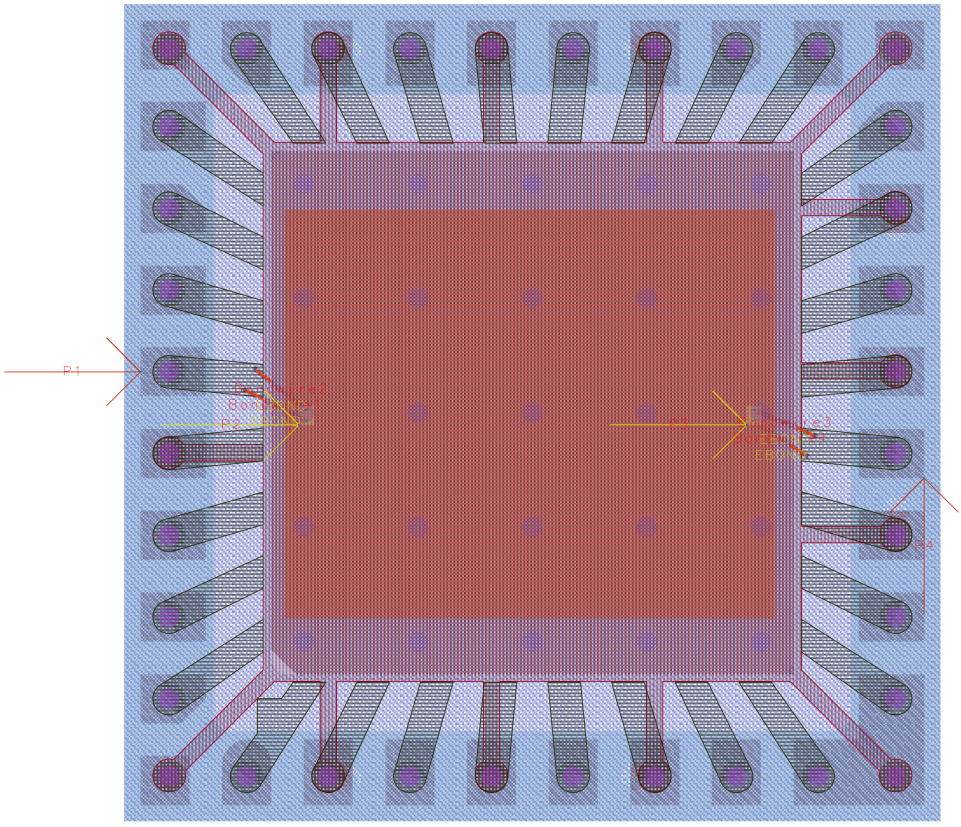


Рис. 2. *Исходная геометрия корпуса*

Для оценки влияния конструкции корпуса были проанализированы S-параметры в диапазоне частот 9–11 ГГц. На рисунке 3 представлены амплитудные характеристики |S11|, |S21|, |S12| и |S22| исходной конфигурации корпуса. Повышенный уровень |S11| указывает на недостаточное входное согласование, обусловленное паразитной индуктивностью выводов и недостаточной емкостной компенсацией со стороны центральной заземляющей площадки.

Для анализа импедансных характеристик на рисунке 4 приведены диаграммы Смитта входного и выходного коэффициентов отражения. Входной импеданс смещен в индуктивную об-

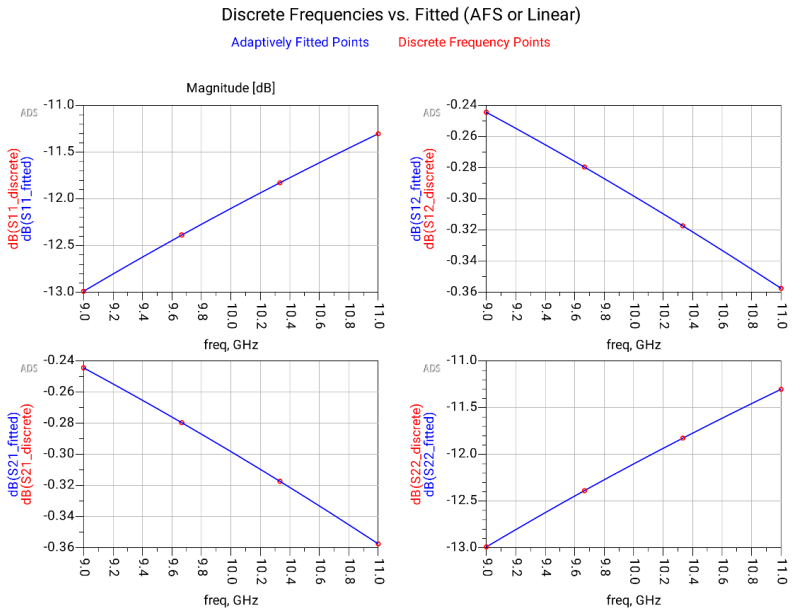


Рис. 3. *Амплитудные характеристики S-параметров исходной конфигурации корпуса QFN без подключенного кристалла*

ласть, что указывает на влияние паразитной индуктивности сигнальных выводов и проволочных межсоединений.

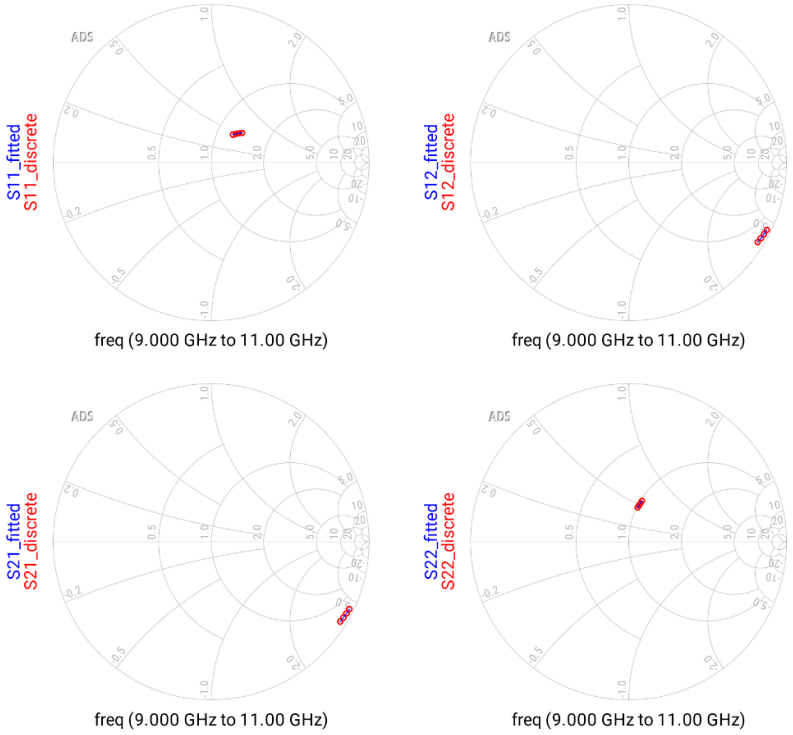


Рис. 4. *Диаграммы Смитта S-параметров исходной конфигурации корпуса QFN без подключенного кристалла*

Амплитудные характеристики позволяют оценить согласование, а диаграммы Смитта — характер реактивных составляющих импеданса. Для исходной конфигурации коэффициент отражения |S11| превышает уровень −10 дБ, что обусловлено паразитной индуктивностью выводов и недостаточной емкостной компенсацией относительно центральной заземляющей площадки.

На рисунке 5 представлены S-параметры системы «кристалл — корпус» в диапазоне 9–11

ГГц. После подключения кристалла коэффициент передачи |S21| составляет 23–25 дБ. При этом |S11| достигает $-17\ldots-18$ дБ на нижней границе диапазона, однако с ростом частоты ухудшается до -7 дБ. Коэффициент |S22| также имеет выраженную частотную зависимость с наиболее низкими значениями в области 9.7–10 ГГц, что связано с влиянием паразитных параметров корпуса.

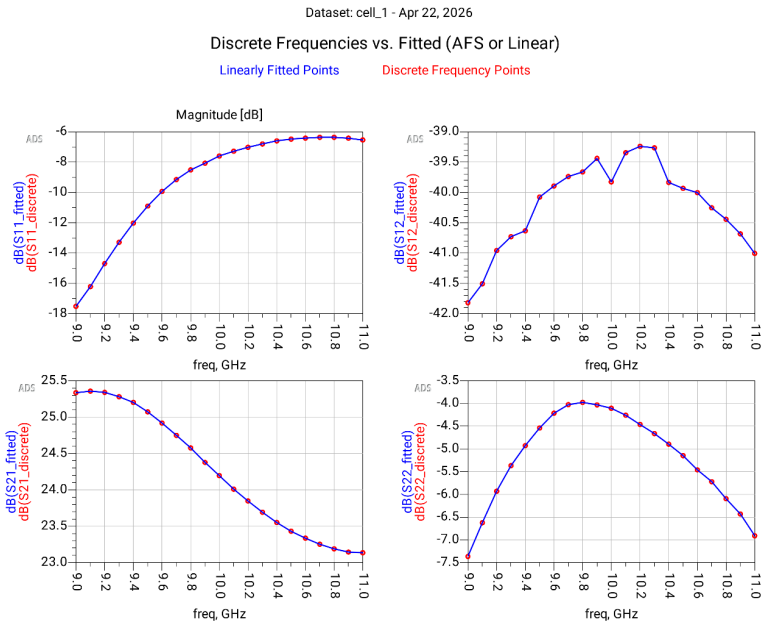


Рис. 5. *Амплитудные характеристики S-параметров системы «кристалл — корпус» в исходной конфигурации корпуса QFN*

Диаграммы Смитта (рис. 6) подтверждают индуктивный характер входного импеданса. Смещение траектории S11 относительно центра диаграммы обусловлено паразитной индуктивностью выводов и проволочных соединений.

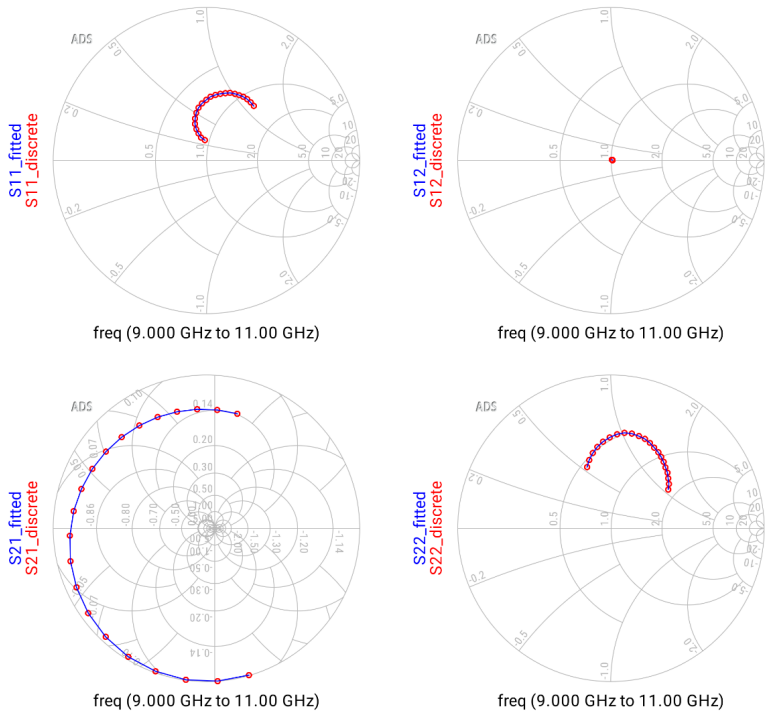


Рис. 6. *Диаграммы Смитта S-параметров системы «кристалл — корпус» в исходной конфигурации корпуса QFN*

Исходная конфигурация корпуса не обеспечивает требуемого согласования вследствие влияния паразитных реактивных параметров. Для улучшения характеристик была выполнена корректировка геометрии корпуса, направленная на увеличение распределенной емкости относительно заземляющей области и формирование многозвенной реактивной структуры.

Основные изменения включали увеличение емкости между сигнальными выводами и заземляющей площадкой, оптимизацию топологии проводников с учетом индуктивности bond-wire соединений и выводов, а также увеличение числа заземляющих переходных отверстий. В результате сформирована реактивная структура типа C–L–C–L–C–L на входе и L–C–L–C–L–C на выходе [7], обеспечивающая более эффективное преобразование импеданса и частичную компенсацию паразитной индуктивности (рис. 7).

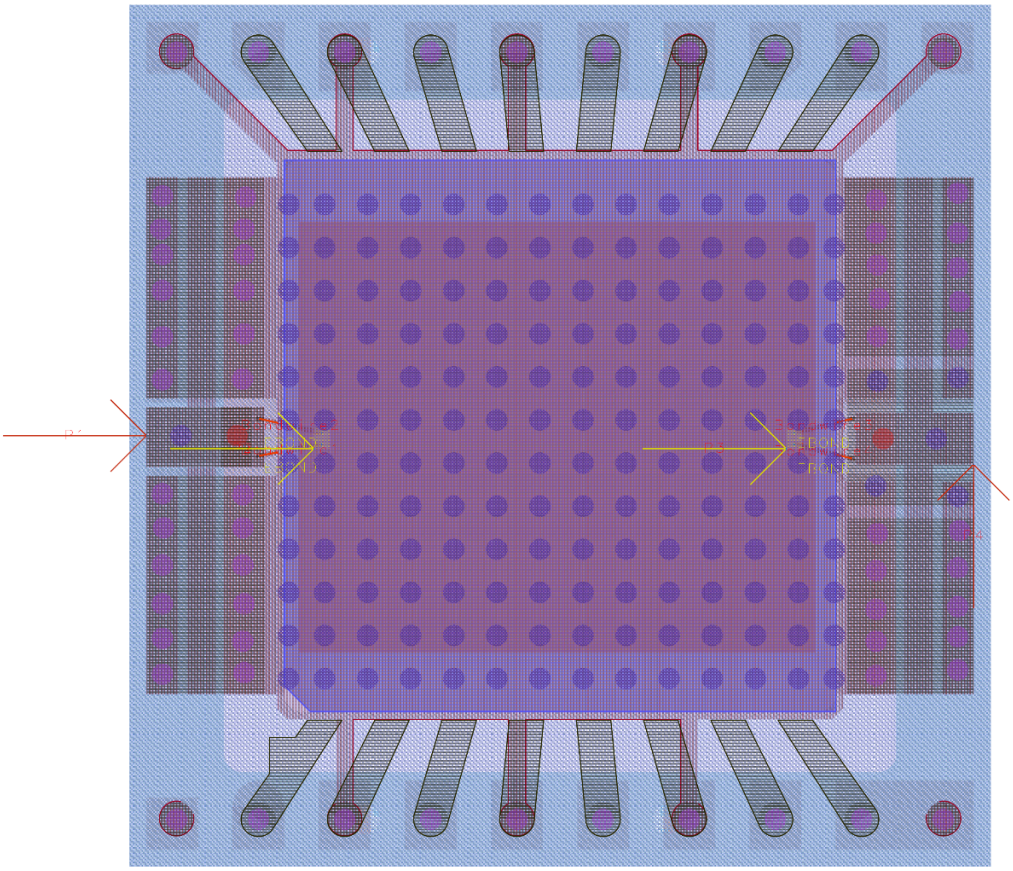


Рис. 7. *Модифицированная геометрия корпуса*

Указанные изменения направлены на формирование распределенной реактивной структуры корпуса за счет увеличения распределенной емкости относительно заземляющей области и использования индуктивности выводов и bond-wire соединений. В отличие от исходной конфигурации, характеризующейся выраженным индуктивным характером импеданса, модифицированная геометрия обеспечивает частичную компенсацию паразитной индуктивности и более равномерное преобразование импеданса.

Реализация последовательности реактивных элементов, эквивалентной многозвенной цепи типа C–L–C–L–C–L на входе и L–C–L–C–L–C на выходе, позволяет снизить уровень отражения и улучшить согласование в рабочем диапазоне частот.

Результаты моделирования (рис. 8) показывают, что после модификации корпуса коэффициенты отражения |S11| и |S22| снижаются до уровня менее −15 дБ в значительной части рассматриваемого диапазона частот, что свидетельствует об улучшении согласования по сравнению с исходной конфигурацией.

Для подтверждения эффективности реализованной многозвенной реактивной структуры и анализа импедансных характеристик на рисунке 9 приведены диаграммы Смитта S-параметров модифицированной конфигурации корпуса.

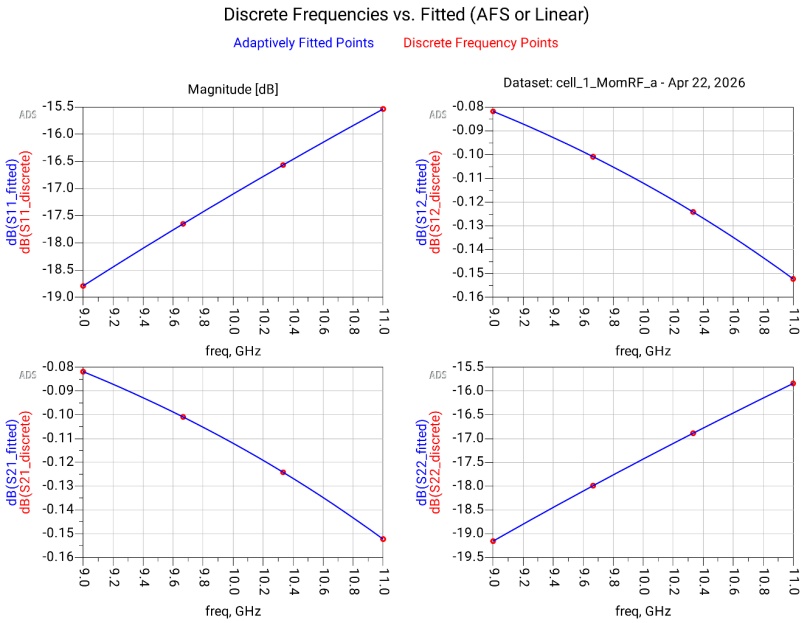


Рис. 8. *Амплитудные характеристики S-параметров модифицированной конфигурации корпуса QFN без подключенного кристалла*

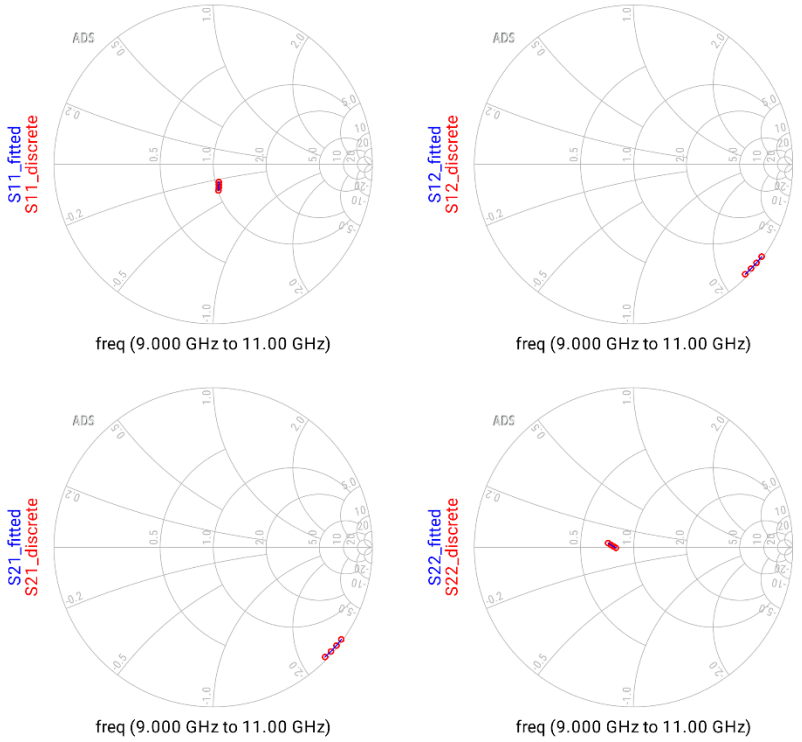


Рис. 9. *Диаграммы Смитта S-параметров модифицированной конфигурации корпуса QFN без подключенного кристалла*

Диаграммы Смитта показывают смещение траекторий коэффициентов отражения к центру диаграммы, что свидетельствует об улучшении согласования по сравнению с исходной конфигурацией.

На рисунке 10 представлены S-параметры системы «кристалл — модифицированный корпус». Коэффициент |S11| находится на уровне $-10\ldots-14$ дБ, а |S22| — $-6\ldots-8$ дБ. Уровень обратной передачи |S12| не превышает -35 дБ, что свидетельствует о достаточной развязке между входной и выходной цепями.

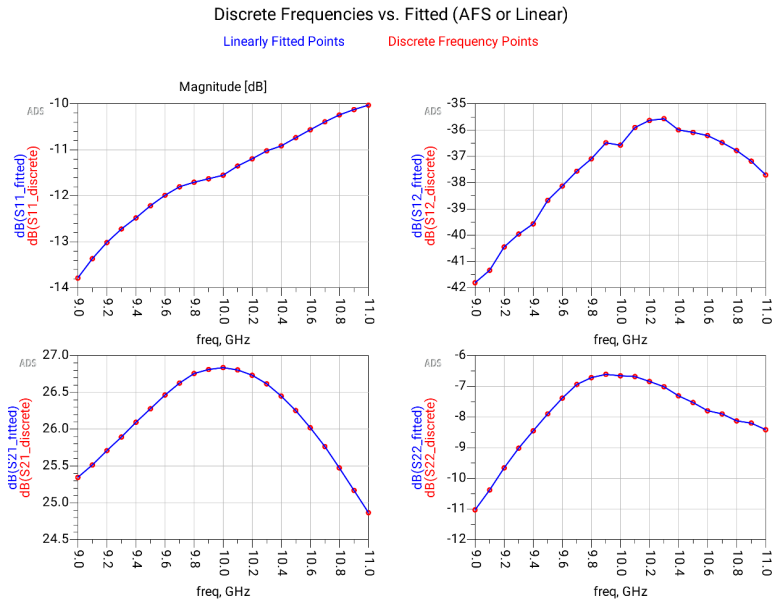


Рис. 10. *Амплитудные характеристики S-параметров системы «кристалл — модифицированный корпус QFN»*

Оптимизация конструкции корпуса позволила улучшить согласование кристалла без применения внешних согласующих цепей. На рисунке 11 приведены диаграммы Смитта S-параметров системы «кристалл — корпус», подтверждающие уменьшение реактивной составляющей импеданса.

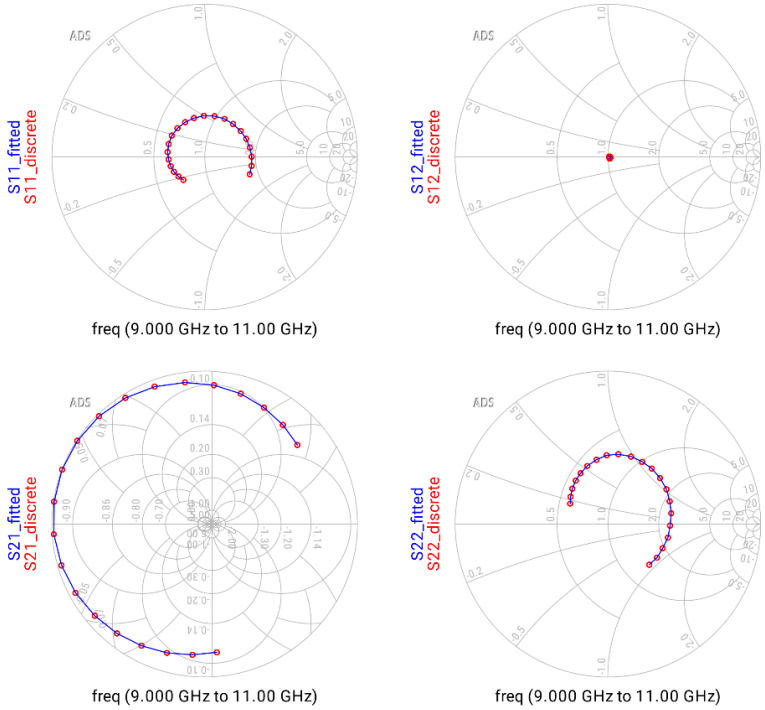


Рис. 11. *S-параметры системы «кристалл — модифицированный корпус» на диаграмме Смитта*

Для оценки влияния модификации корпуса выполнено сравнение S-параметров системы «кристалл — корпус» для исходной и модифицированной конфигураций корпуса. Амплитудные характеристики и диаграммы Смитта приведены на рисунках 12 и 13.

Как следует из рисунка 12, модификация корпуса приводит к улучшению согласова-

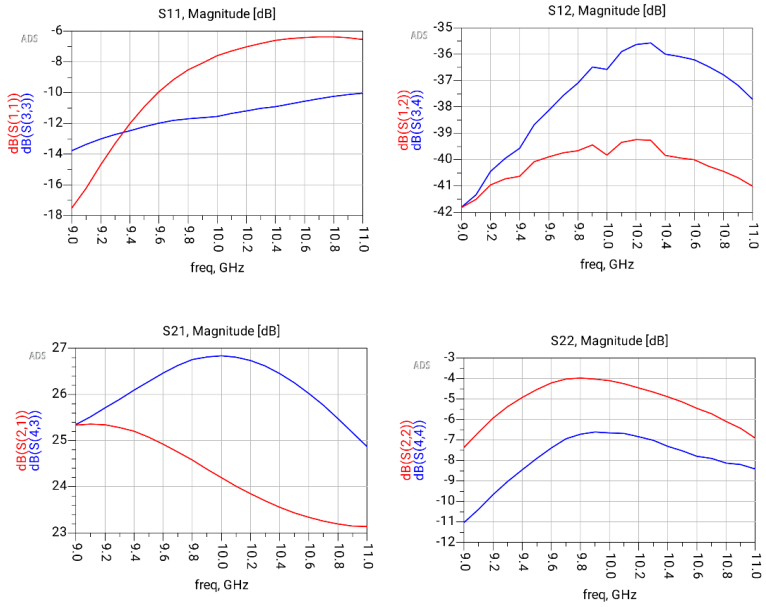


Рис. 12. *Амплитудные характеристики S-параметров системы «кристалл — корпус» для исходной и модифицированной конфигураций корпуса QFN*

ния. Коэффициент отражения |S11| для модифицированной конфигурации (S(3,3)) находится на уровне −10…−12 дБ, тогда как для исходной конфигурации (S(1,1)) на верхней границе диапазона ухудшается до −6…−8 дБ.

Аналогичное улучшение наблюдается для |S22|: для модифицированного корпуса значения составляют −7…−9 дБ (S(4,4)) против −4…−6 дБ для исходной конфигурации. Коэффициент передачи |S21| достигает 26–27 дБ (S(4,3)) и имеет более равномерную частотную зависимость.

Уровень обратной передачи |S12| в обеих конфигурациях не превышает −35 дБ, что свидетельствует о достаточной развязке между входной и выходной цепями. Диаграммы Смитта для обеих конфигураций приведены на рисунке 13.

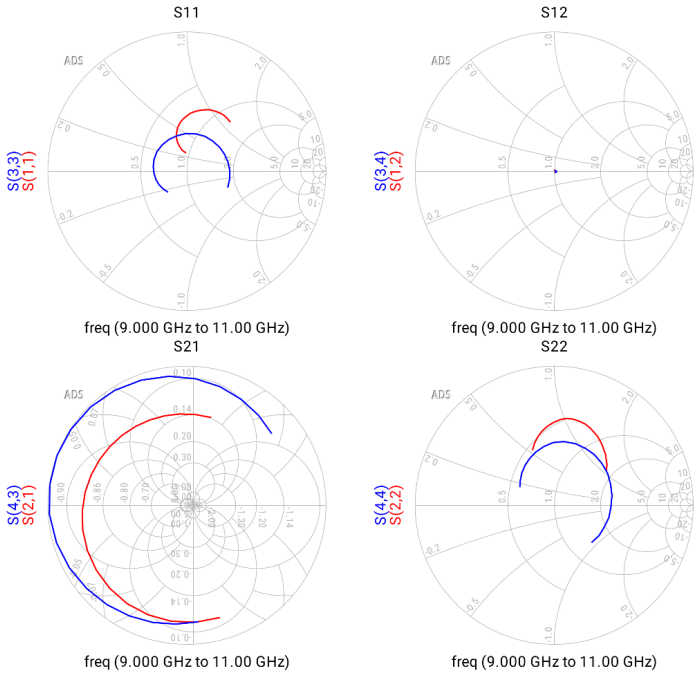


Рис. 13. *Диаграммы Смитта S-параметров системы «кристалл — корпус» для исходной и модифицированной конфигураций корпуса QFN*

Диаграммы Смитта показывают смещение траекторий коэффициентов отражения S(3,3) и S(4,4) к центру диаграммы, что свидетельствует о снижении реактивной составляющей импеданса и частичной компенсации паразитной индуктивности.

Заключение

В работе исследовано влияние конструктивных параметров QFN-корпуса на согласование GaAs СВЧ-усилителя мощности. Электромагнитное моделирование системы «кристалл — корпус» показало, что исходная конфигурация характеризуется выраженным индуктивным характером импеданса и недостаточной емкостной компенсацией относительно заземляющей области, что ухудшает согласование.

Корректировка геометрии корпуса, направленная на формирование многозвенной реактивной структуры, позволила улучшить импедансное согласование без применения внешних согласующих цепей. В результате достигнут уровень |S11| ниже −10 дБ в значительной части диапазона 9–11 ГГц при улучшении |S22| и сохранении требуемого усиления.

Научная новизна работы заключается в демонстрации возможности использования паразитных элементов QFN-корпуса в качестве распределенной согласующей структуры для формирования требуемых импедансных характеристик усилителя.

В работе использовалось детерминированное электромагнитное моделирование с фиксированными значениями параметров. Однако на практике физико-механические свойства материалов корпуса и геометрические размеры имеют технологические разбросы. Методология учета таких разбросов на основе многократных расчетов (имитационного моделирования) применительно к механическим воздействиям на печатные узлы изложена в [8]. Адаптация данного подхода к анализу статистических вариаций S-параметров усилителя с корпусом QFN рассматривается как направление дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lai Y. L., Ho C. Y. Electrical Modeling of Quad Flat No-Lead Packages for High-Frequency IC Applications. *2004 IEEE Region 10 Conference TENCON.* 2004;4:344–347. DOI: 10.1109/TENCON.2004.1414940.
2. Lu A. C. W., Xie D. J., Shi Z. F., Ryu W. Electrical and Thermal Modelling of QFN Packages. *Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000).* 2000:352–356. DOI: 10.1109/EPTC.2000.906399.
3. Гагарина Л. Г., Рубцов Ю. В. Особенности разработки метода классификации плоских QFN-корпусов для применения в составе автоматизированных систем технической подготовки производства изделий микроэлектроники. *Известия вузов. Электроника.* 2022;27(3):322–332. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-3-322-332.
4. Степанов В. И., Метель А. А., Сальников А. С., Добуш И. М., Калентьев А. А. Методика моделирования QFN корпусов и ее верификация. *Проблемы развития перспективных микро- и наноэлектронных систем.* 2022;3:74–81. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-74-81.
5. Ищенко Е. А., Пастернак Ю. Г., Пендюрин В. А., Проскурин Д. К., Федоров С. М. Применение эквивалентных схем PIN-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования. *Труды учебных заведений связи.* 2023;9(4):21–33. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33.
6. Sun H., Zhu B., Sun L., Li H., Yang L. EMC Computer Modelling and Simulation of Integrated Circuits in QFN Package. *Progress in Electromagnetics Research M.* 2013;33:263–275. DOI: 10.2528/PIERM13082802.
7. Singh S., Chawla P. Broadband Impedance Matching Network Design for RF Power Amplifier in 5G Frequency Band. *2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET).* 2021:1–4. DOI: 10.1109/INCET51464.2021.9456168.
8. Битюков В. К., Долматов А. В., Задерновский А. А., Стариковский А. И., Увайсов Р. М. Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования. *Russian Technological Journal.* 2023;11(6):28–38. DOI: https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКА ПРИ КОЛЛИЗИЯХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Е. В. Страшнов[а], И. П. Саблин[б]

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

[а] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0937-4052,* ✍ *strashnov_evg@mail.ru*

[б] *sablinivan97@gmail.com*

Аннотация: в работе предлагаются методы и подходы для моделирования звука, возникающего при коллизиях виртуальных объектов в системах виртуального окружения. Предлагаемые решения основаны на воспроизведении звуковых файлов при появлении одного из событий, связанного с соударением виртуальных объектов, а также с трением скольжения и качения между ними. Подготовка звуковых файлов для каждой пары типов объектов, участвующих в коллизии, осуществляется в аудиоредакторе Audacity с открытой лицензией. Моделирование звука при соударениях и трении виртуальных объектов реализовано с применением библиотеки Miniaudio с открытым исходным кодом для воспроизведения звука в трехмерной виртуальной среде. В процессе такого моделирования вычисление уровня громкости звука осуществляется на основе информации, получаемой на стадиях определения и разрешения коллизий виртуальных объектов. Расчет громкости воспроизводимого звука при соударении виртуальных объектов реализован с применением математической модели гармонического осциллятора. Апробация предлагаемых в статье решений проводилась в программном комплексе виртуального окружения VirSim на примере взаимодействий виртуального робота с различными объектами виртуального окружения и этих объектов друг с другом.

Ключевые слова: моделирование звука, коллизия, удар, трение скольжения, трение качения, звуковой файл, Miniaudio, системы виртуального окружения.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения».

Для цитирования: Страшнов Е. В., Саблин И. П. Моделирование звука при коллизиях объектов в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):94–101.

Поступила в редакцию: 20.03.2026. *В окончательном варианте: 29.03.2026.*

SOUND SIMULATION FOR OBJECT COLLISIONS IN VIRTUAL ENVIRONMENTS

E. V. Strashnov[a], I. P. Sablin[b]

Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

[а] *ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0937-4052,* ✍ *strashnov_evg@mail.ru*

[b] *sablinivan97@gmail.com*

Abstract: we proposed methods for sound simulation during collisions of virtual objects in virtual environments. The approach is based on the playback of pre-recorded audio signals triggered by collision events, as well as by sliding and rolling friction between objects. We generated sound samples for each pair of interacting object types using the Audacity audio editor. We implemented sound rendering with the open-source Miniaudio library to support 3D audio in a virtual environment. During simulation, sound volume depends on parameters obtained from collision detection and collision response. We computed sound amplitude during impacts using a harmonic oscillator model. We tested the proposed methods in the VirSim virtual environment software package using interactions between a virtual robot and various objects, as well as object-object interactions. The results show that the approach provides consistent and realistic audio feedback for collision and friction events.

Keywords: sound simulation, collision, impact, sliding friction, rolling friction, audio file, Miniaudio, virtual environment.

Acknowledgements: this is a part of the FNEF-2024-0002 Simulation of Multiscale Dynamic Processes and Virtual Environments government contract granted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute".

Cite this article: Strashnov E. V., Sablin I. P. Sound Simulation for Object Collisions in Virtual Environments. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):94–101.

Original article submitted: 20.03.2026. *Revision submitted: 29.03.2026.*

Введение

Моделирование пространственного звука значительно усиливает уровень погружения человека в виртуальный мир. Это особенно важно для систем виртуальной реальности [1, 2], которые применяются в тренажерах, обучающих симуляторах и т. д. Некоторые звуки возникают при коллизиях и контактах виртуальных объектов, когда они сталкиваются между собой (удар) или движутся друг относительно друга (трение). Например, подобные ситуации происходят в процессе тренировки оператора навыкам управления виртуальным мобильным роботом в виртуальном окружении, содержащем различные объекты.

Столкновение виртуальных объектов друг с другом приводит к кратковременному звуку, который воспроизводится только один раз в момент удара. В свою очередь, звук при трении объектов продолжается до тех пор, пока они движутся друг относительно друга. Один из подходов [3] для моделирования звука заключается в том, чтобы заранее записать набор звуковых образцов для различных уровней удара. Тогда в момент удара будет воспроизведен тот звуковой образец, который наиболее близко соответствует фактическому импульсу при ударе. Такое решение является трудоемким по причине необходимости записи большого числа звуковых файлов. Альтернативный подход состоит в соответствующем изменении громкости одного образца звукового файла в реальном времени, что широко применяется в игровых движках (например, Unreal Engine [4] и др.). Другие решения [5, 6] предполагают синтез звука во время работы самой системы виртуального окружения, тем самым осложняя обеспечение реального времени моделирования.

В данной работе предлагаются методы и подходы для моделирования звука при коллизиях виртуальных объектов, основанные на использовании одного образца звукового файла для каждого типа пар взаимодействующих объектов при ударе, а также при трении скольжения и качения. Предлагаемые в статье решения были реализованы в системе виртуального окружения VirSim [7], созданной в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ. Для обработки звука была задействована открытая библиотека Miniaudio [8], позволяющая в реальном времени одновременно воспроизводить множество различных звуковых файлов.

Подготовка звуковых файлов

Для каждой пары типов объектов, участвующих в коллизии, необходимо найти соответствующий звуковой файл, наиболее близкий по звучанию к моделированию рассматриваемой коллизии. Поиск и скачивание таких звуковых файлов можно осуществить в сети Интернет (например, на сайтах Freesound.org, zvukogram.com и др.).

Некоторые скачанные файлы могут потребовать корректировки (например, изменение громкости, продолжительности и др.). Для этого можно использовать аудиоредактор Audacity с открытой лицензией. В данном редакторе звуковой файл приводится к уровню громкости, максимально возможному при коллизии данной пары типов объектов. На рис. 1а показан пример исходного звукового файла в редакторе Audacity, а на рис. 1б — результат изменения громкости этого файла.

Продолжительность звуковых файлов будет отличаться в зависимости от типа коллизий. Для звуков соударений виртуальных объектов продолжительность звуковых файлов соответствует продолжительности звука при соударении соответствующих реальных объектов. Воспроизведение звуковых файлов трения (скольжения и качения) виртуальных объектов должно продолжаться до тех пор, пока при процессе трения между этими объектами не будет достигнут порог слышимости. Для этого на этапе подготовки из найденных исходных записей звуков трения выделяются фрагменты продолжительностью 1 сек. (с возможностью корректного зацикливания).

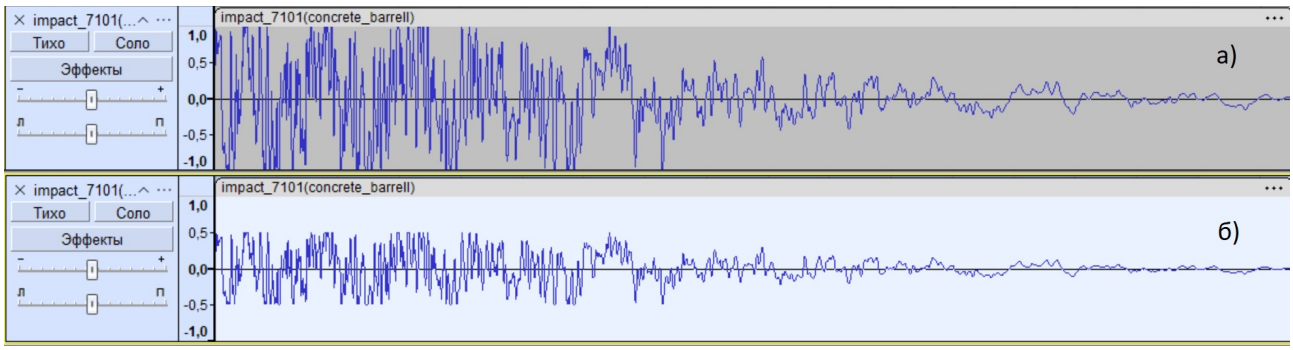


Рис. 1. *Сравнение звукового файла в аудиоредакторе Audacity:а) до изменения громкости; б) после него*

Эти фрагменты зацикливаются при дальнейшем моделировании, обеспечивая плавный и непрерывный звук трения между объектами.

Вычисление информации о коллизии виртуальных объектов

Моделирование коллизий виртуальных объектов в системах виртуального окружения сводится к вычислению контактной информации [9], состоящей из множества точек P_i, $i = \overline{1,N}$ контактной площадки (см. рис. 2), единичной нормали $\mathbf{n}$ к этой площадке и единичных векторов t_1 и t_2 плоскости контактной площадки, где N — число контактных точек.

Положение P виртуального источника звука вычисляется как средняя точка (геометрический центр) контактной площадки:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_i}{N}. \tag{1}$$

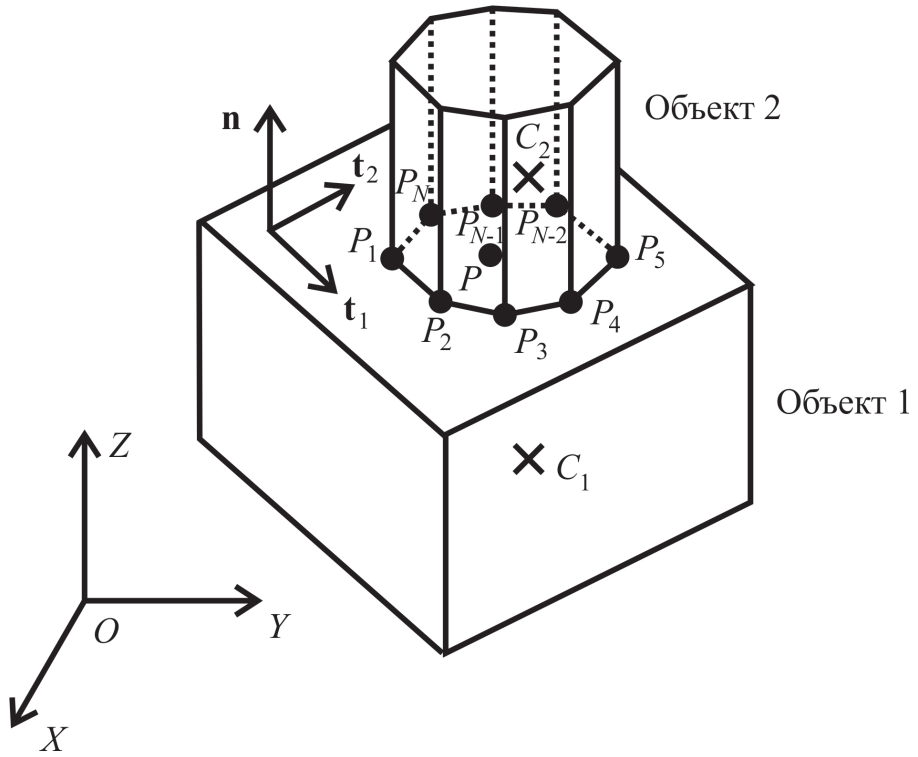


Рис. 2. *Коллизия двух виртуальных объектов*

Движение виртуального объекта, являющегося твердым телом, описывается с помощью линейной скорости $\mathbf{v}$ его центра масс C и угловой скорости ω. Скорость точки P в мировой системе координат $OXYZ$ вычисляется через эти скорости следующим образом:

$$v^P = v + \omega \times r, r = \overrightarrow{CP}.$$

В данном случае точка контакта P является общей точкой для рассматриваемой пары виртуальных объектов (см. рис. 2). Удар характеризуется тем, что перед столкновением объекты имеют ненулевые скорости вдоль нормали $\mathbf{n}$. Тогда модуль относительной скорости вдоль этой нормали вычисляется как

$$v_n = (v_2^P - v_1^P)n, \tag{2}$$

где $\mathbf{n}$ — нормаль к контактной плоскости, направленная от первого объекта ко второму, $v_1^P = v_1 + \omega_1 \times r_1$ и $v_2^P = v_2 + \omega_2 \times r_2$ — скорости точки P для двух объектов, $r_1 = \overrightarrow{C_1P}$, $r_2 = \overrightarrow{C_2P}$.

Приведенная масса этих объектов вычисляется по формуле:

$$m_{eff} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \tag{3}$$

где m_1 и m_2 — массы объектов.

Соотношения (1) — (3) формируют информацию, которая в дальнейшем необходима для моделирования звука столкновения двух виртуальных объектов. Запуск соответствующего звукового файла осуществляется, если выполнено условие $v_n > \varepsilon_{imp}$, где ε_{imp} — заданное пороговое значение для удара, ниже которого звук едва слышен.

В данной работе рассматриваются два вида трения: скольжения и качения. Согласно закону Кулона–Амонтона и модели трения качения [10] максимальные значения силы трения скольжения и момента трения качения пропорциональны силе реакции опоры:

$$F_{t,\max} = \mu F_n, M_{t,\max} = \delta F_n,$$

где μ и δ — коэффициенты трения скольжения и качения, которые зависят от материалов взаимодействующих объектов.

Фактические значения силы F_t трения скольжения и момента M_t трения качения зависят от модулей относительных скоростей движения объектов в контактной плоскости.

Модуль относительной линейной скорости v_t движения объектов вычисляется как

$$v_t = \|v_{t1}t_1 + v_{t2}t_2\|, \tag{4}$$

где $v_{t1} = (v_2^P - v_1^P)t_1$, $v_{t2} = (v_2^P - v_1^P)t_2$, t_1 и t_2 — единичные векторы в плоскости контакта виртуальных объектов.

Модуль относительной угловой скорости ω_t вычисляется аналогичным образом:

$$\omega_t = \|\omega_{t1}t_1 + \omega_{t2}t_2\|, \tag{5}$$

где $\omega_{t1} = (\omega_2 - \omega_1)t_1$, $\omega_{t2} = (\omega_2 - \omega_1)t_2$.

Соотношения (1), (4), (5) и величина силы реакции опоры F_n формируют информацию, которая необходима для моделирования источников звука при трении скольжения и качения виртуальных объектов. Воспроизведение звука продолжается до тех пор, пока выполнены условия $F_t > \varepsilon_{sli}$ и $M_t > \varepsilon_{rol}$, где ε_{sli} и ε_{rol} — пороговые значения для силы трения скольжения и момента трения качения, соответственно, ниже которых звук едва слышен.

Математическая модель расчета громкости звука при коллизиях виртуальных объектов

В качестве теоретической основы для расчета громкости при ударе виртуальных объектов предлагается модель, в которой возникновение звуковой волны описывается в виде консервативного гармонического осциллятора (см. рис. 3). Данная модель рассматривает движение груза массой m_{eff} с начальной скоростью v_n под действием пружины жесткостью k, характеризующей упругие свойства материалов сталкивающихся объектов. Динамика консервативного гармонического осциллятора описывается вторым законом Ньютона в виде дифференциального уравнения:

$$m_{eff}\ddot{x}(t) = -kx(t),$$

где $x(t)$ — величина отклонения.

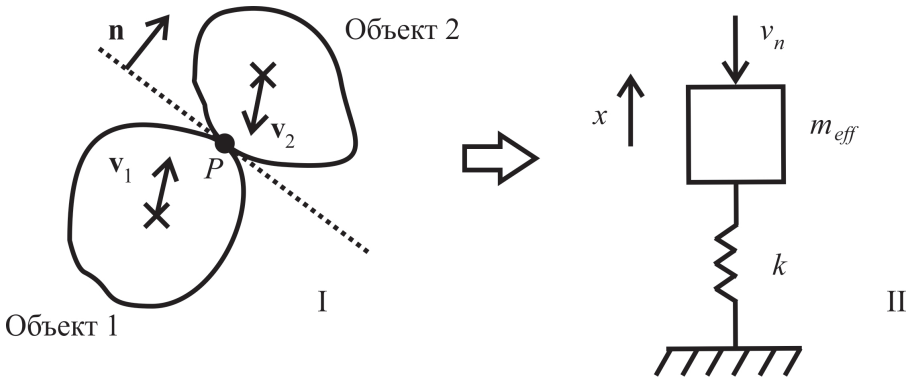


Рис. 3. *Модель описания звуковой волны при ударе объектов (I) в виде гармонического осциллятора (II)*

После преобразований данное уравнение можно записать в виде

$$\ddot{x}(t) + \omega_p^2 x(t) = 0, \tag{6}$$

где $\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}}$– частота гармонического осциллятора.

При ударе звуковая волна рассматривается на длине полупериода (t изменяется от 0 до $\tau = T/2$, где $T = 2\pi/\omega_p$ — период колебаний). Решение дифференциального уравнения (6) с учетом начальных условий $x(0) = 0$ и $\dot{x}(0) = -v_n$ примет вид:

$$x(t) = A\cos(\omega_p t + \pi/2) = -A\sin(\omega_p t), 0 \le t \le \tau, \tag{7}$$

где $A = v_n\sqrt{\frac{m_{eff}}{k}}$ — амплитуда колебаний.

Громкость звука зависит от звукового давления, которое пропорционально амплитуде звуковой волны. Из решения (7) для гармонического осциллятора получим следующее соотношение:

$$P_{imp} = bv_n\sqrt{\frac{m_{eff}}{k}},$$

где b — постоянный коэффициент пропорциональности, который зависит от скорости звука, плотности воздуха и др.

Согласно [11] громкость звука (в децибелах) при ударе виртуальных объектов в общем случае вычисляется по формуле:

$$V_{imp} = 20\log_{10}(\frac{P_{imp}}{P_0}) = 20\log_{10}(bv_n\sqrt{\frac{m_{eff}}{k}}/P_0),$$

где $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — порог звукового давления.

Подготовленный в аудиоредакторе Audacity звуковой файл соударения объектов соответствует максимально возможной приведенной массе m^0_{eff} и максимально возможному модулю относительной скорости v^0_n. Обозначим его громкость через V^0_{imp}. Для уменьшения этой громкости (в децибелах) при конкретном столкновении рассматривается разность:

$$\Delta V_{imp} = V^0_{imp} - V_{imp} = 20\log_{10}\left(bv^0_n\sqrt{\frac{m^0_{eff}}{k}}/P_0\right) - 20\log_{10}\left(bv_n\sqrt{\frac{m_{eff}}{k}}/P_0\right) =$$

$$= 20\log_{10}\left(\frac{v^0_n\sqrt{m^0_{eff}}}{v_n\sqrt{m_{eff}}}\right). \tag{8}$$

Амплитуда звуковой волны при трении скольжения и качения зависит от потери энергии на трение [5], которая пропорциональна величине $\sqrt{F_n w}$, где F_n – сила реакции опоры, w — относительная скорость, вычисляемая по формулам (4) или (5). Подготовленные в аудиоредакторе

Audacity звуковые файлы трения виртуальных объектов соответствуют максимально возможной силе реакции опоры F_n^0 и максимально возможным модулям относительных скоростей v_t^0 и ω_t^0. Тогда уменьшение громкости звука (в децибелах) при трении скольжения и качения виртуальных объектов вычисляется как

$$\Delta V_{sli} = 20\log_{10}\left(\frac{\sqrt{F_n^0 v_t^0}}{\sqrt{F_n v_t}}\right), \qquad \Delta V_{rol} = 20\log_{10}\left(\frac{\sqrt{F_n^0 \omega_t^0}}{\sqrt{F_n \omega_t}}\right). \tag{9}$$

Моделирование звука в системе виртуального окружения VirSim

Моделирование звука при коллизиях виртуальных объектов проводилось в системе виртуального окружения VirSim [7], созданной в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ. Этот программный комплекс содержит подсистему звука, которая реализована с применением библиотеки Miniaudio. Более подробно с методами и подходами реализации подсистемы звука системы виртуального окружения VirSim можно ознакомиться в работе [12].



Рис. 4. *Столкновение виртуальной модели робота с бочкой*

В процессе моделирования звук при ударе виртуальных объектов формируется на основе события, когда модуль относительной скорости движения объектов превышает заданное пороговое значение $\varepsilon_{imp} = 0.02$ м/с. Для этого события в подсистеме звука запускается подготовленный звуковой файл удара с уменьшенной по формуле (8) громкостью. Звуки трения скольжения и качения виртуальных объектов продолжаются до тех пор, пока сила трения скольжения и момент трения качения превышают пороговые значения $\varepsilon_{sli} = 1$ Н и $\varepsilon_{rol} = 0.001$ Н $\cdot$ м, соответственно. Для событий трения скольжения и качения виртуальных объектов запускается соответствующий подготовленный звуковой файл, который зацикливается и проигрывается, пока превышены эти пороговые значения, а изменение его громкости на каждом шаге моделирования вычисляется из соотношений (9). Моделирование в программном комплексе VirSim проводилось в созданной нами виртуальной сцене, которая содержит модель управляемого мобильного гусеничного робота и различные типы виртуальных объектов: бочки, коробки, паллеты и т.д. На рисунках 4 и 5 показаны примеры столкновения робота с бочкой и коробками. При столкновении робота с бочкой (см. рис. 4) возникает качение бочки, что соответствует звуку трения качения бочки по бетонному



Рис. 5. *Столкновение виртуальной модели робота с коробками*

полу. Во втором примере (см. рис. 5) столкновение робота с коробками приводит к их развалу и падению на бетонный пол.

Заключение

В данной работе предложены методы и подходы к моделированию звука, возникающего при ударе и трении (скольжения и качения) виртуальных объектов. Разработан подход, при котором громкость и длительность звука вычисляются на основе моделируемых физических параметров коллизии. Для моделирования звука при ударе виртуальных объектов была рассмотрена математическая модель консервативного гармонического осциллятора. Апробация предложенных решений проводилась в системе виртуального окружения VirSim и показала их адекватность поставленным задачам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tang J. Research on the Application of Sound in Virtual Reality. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023;44:206–212. DOI: 10.54097/hset.v44i.7323.
2. Азанова В. А. Применение 3D-звука в системах виртуальной реальности. *Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий:* материалы II Международной научно-технической конференции. 2018:89-96.
3. Turchet L., Pugliese R., Takala T. Physically Based Sound Synthesis and Control of Jumping Sounds on an Elastic Trampoline. *Proceedings of ISon 2013, 4th Interactive Sonification Workshop.* Erlangen: Fraunhofer IIS; 2013.
4. *Unreal Engine Documentation: Working with Audio*. Режим доступа: https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/working-with-audio-in-unreal-engine.
5. Van den Doel K., Kry P. G., Pai D. K. FoleyAutomatic: Physically-Based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation. *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'01).* New York: ACM; 2001:537–544. DOI: 10.1145/383259.383322.

6. Liu S., Manocha D. *Sound Synthesis, Propagation, and Rendering: A Survey.* 2020. arXiv:2011.05538. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2011.05538. DOI: 10.48550/arXiv.2011.05538.
7. Михайлюк М. В., Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В., Крючков Б. И., Усов В. М. Система виртуального окружения VirSim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос.* 2020;4:72-95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
8. *Документация Miniaudio.* Режим доступа: https://miniaud.io/docs/.
9. Торгашев М. А., Страшнов Е. В. Определение коллизий аппроксимирующих цилиндров в системах виртуального окружения. *Программная инженерия.* 2021;12(7):385-392. DOI: 10.17587/prin.12.385-392.
10. Cross R. Coulomb's Law for Rolling Friction. *American Journal of Physics.* 2016;84(3):221–230. DOI: 10.1119/1.4938149.
11. Радзишевский А. Ю. *Основы аналогового и цифрового звука.* М.: Издательский дом «Вильямс»; 2006. 288 с.
12. Саблин И. П., Михайлюк М. В., Омельченко Д. В., Кононов Д. А. Моделирование звука в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики.* 2025;6(2):92-99.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

О. С. Володько[1,а], **Н. А. Буряк**[2,б]

[1] *Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация*

[2] *Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск, Российская Федерация*

[а] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0580-9103,* ✍ *osv@icm.krasn.ru*

[б] *ORCID: http://orcid.org/0009-0004-6831-9613, buryakna98@gmail.com*

Аннотация: рост концентрации углекислого газа в атмосфере, обусловленный как природными, так и антропогенными воздействиями, является одной из ключевых причин изменения климата, что делает проблему точного долгосрочного прогнозирования выбросов принципиально важным вопросом современной науки. В работе выполнен сравнительный анализ эффективности различных методов машинного обучения для прогнозирования временных рядов концентрации углекислого газа на основе данных научной обсерватории «Станция высотной мачты» в Центральной Сибири за период 2009–2022 гг. Рассмотрены ансамблевые модели: случайный лес, градиентный бустинг — и рекуррентная нейронная сеть с архитектурой долгой краткосрочной памяти. В качестве предикторов использованы интенсивность пожаров, лаговая переменная (количество дней от начала наблюдений) и метеорологические параметры: температура воздуха, максимальная и минимальная температура за день, температура точки росы, относительная влажность, скорость ветра, атмосферное давление, количество осадков. Показано, что архитектура нейронной сети долгой краткосрочной памяти обеспечивает более высокую точность прогноза на валидационной выборке по сравнению с ансамблевыми методами (средняя абсолютная ошибка: 2,87, среднеквадратичная ошибка: 3,91, коэффициент детерминации: 0,83). Установлено, что наиболее значимыми предикторами являются температура воздуха, относительная влажность, температура точки росы и скорость ветра.

Ключевые слова: прогнозирование, углекислый газ, изменение климата, случайный лес, градиентный бустинг, нейросетевая модель долгой краткосрочной памяти.

Благодарности: авторы выражают благодарность к.б.н. Алексею Васильевичу Панову, с.н.с. Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, за предоставление данных измерений концентрации CO_2 со станции ZOTTO.

Для цитирования: Володько О. С., Буряк Н. А. Нейросетевая модель временных рядов для прогнозирования уровня углекислого газа в атмосфере Центральной Сибири. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):102–108.

Поступила в редакцию: 10.04.2026. *В окончательном варианте: 30.04.2026.*

A NEURAL NETWORK TIME SERIES MODEL TO FORECAST ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE CONCENTRATIONS IN CENTRAL SIBERIA

O. S. Volodko[1,a], **N. A. Buryak**[2,b]

[1] *Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

[2] *Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

[a] *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0580-9103,* ✍ *osv@icm.krasn.ru*

[b] *ORCID: http://orcid.org/0009-0004-6831-9613, buryakna98@gmail.com*

Abstract: the rise in atmospheric carbon dioxide concentrations driven by natural and anthropogenic factors is one of the main causes of climate change, making accurate long-term forecasting of atmospheric carbon dioxide concentrations an important scientific challenge. In this study, we compared the performance of several machine learning methods for forecasting atmospheric carbon dioxide concentrations using time series data collected at the ZOTTO Station in Central Siberia in

2009–2022. We evaluated ensemble methods, including random forest and gradient boosting, together with a recurrent neural network based on the Long Short-Term Memory architecture. The predictor variables included fire intensity, a lag variable representing the number of days since the beginning of the observation period, and meteorological parameters, including air temperature, daily maximum and minimum temperatures, dew point temperature, relative humidity, wind speed, atmospheric pressure, and precipitation. The results showed that the Long Short-Term Memory model achieved higher forecasting accuracy on the validation dataset than the ensemble methods, with a 2.87 mean absolute error, .91 RMS error, and 0.83 coefficient of determination. We found that air temperature, relative humidity, dew point temperature, and wind speed were the most important predictors of atmospheric carbon dioxide concentrations.

Keywords: forecasting, carbon dioxide, climate change, random forest, gradient boosting, LSTM.

Acknowledgements: the authors are grateful to Dr. Alexei V. Panov, Senior Researcher at the Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, a division of Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for providing atmospheric CO_2 concentration measurement data from the ZOTTO Station.

Cite this article: Volodko O. S., Buryak N. A. A Neural Network Time Series Model to Forecast Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations in Central Siberia. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):102–108.

Original article submitted: 10.04.2026. *Revision submitted: 30.04.2026.*

Введение

Концентрация углекислого газа CO_2 в атмосфере с 1958 года выросла более чем на 30%. Углекислый газ является основным парниковым газом, ответственным за глобальное потепление, таяние ледников, повышение уровня моря, закисление океана и увеличение частоты возникновения экстремальных погодных явлений.

Экосистема Сибири играет ключевую роль в глобальном углеродном цикле, однако ее динамика изучена недостаточно из-за удаленности региона и ограниченной сети наземных наблюдений. Научная обсерватория «Станция высотной мачты» (ZOTTO) с 2009 года обеспечивает непрерывные высокоточные измерения концентраций парниковых газов на шести высотах (до 301 м), что позволяет получать репрезентативные данные о фоновом состоянии атмосферы над Сибирью [1].

В мировой практике для прогнозирования CO_2 применяются различные подходы: от классических статистических моделей до современных методов машинного обучения и нейросетевых моделей. Исследование [2] в пригороде Китая продемонстрировало, что случайный лес и градиентный бустинг позволяют строить прогнозы и выделять ключевые метеорологические факторы, влияющие на сезонную динамику CO_2. В работе [3] для прогнозирования применяются нейросетевые модели, в том числе рекуррентная нейронная сеть с архитектурой долгой краткосрочной памяти.

Однако большинство работ либо ориентированы на глобальный масштаб, либо используют данные за короткие периоды. Задача долгосрочного прогнозирования CO_2 с применением нейросетевых архитектур остается недостаточно изученной, особенно для сибирского региона.

Цель настоящей работы — сравнительный анализ эффективности прогноза нейросетевой моделью долгой краткосрочной памяти и ансамблевыми методами (случайный лес и градиентный бустинг) ежедневной концентрации CO_2 в атмосфере Центральной Сибири на основе метеорологических параметров.

Материалы и методы

В работе использованы данные ежедневных измерений концентрации CO_2 на станции ZOTTO за период 2009–2022 гг. [4], выполняемые Институтом леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН) совместно с Институтом биогеохимии Макса Планка. В качестве параметров для прогноза использованы следующие характеристики: интенсивность пожаров (данные системы управления ресурсами информации о пожарах (FIRMS) [5]),

лаговая переменная (количество дней от начала наблюдений), метеорологические параметры: температура воздуха, максимальная и минимальная температура за день, температура точки росы, относительная влажность, скорость ветра, атмосферное давление, количество осадков (данные с сайта Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) [6]).

Для сравнительного анализа были реализованы ансамблевые модели машинного обучения: случайный лес [7], градиентный бустинг [8] — и нейросетевая модель долгой краткосрочной памяти [9]. В настоящей работе случайный лес представляет собой ансамбль из 100 решающих деревьев, каждое из которых обучалось на случайной подвыборке данных. Итоговый прогноз получен усреднением предсказаний по всем деревьям. Градиентный бустинг — метод последовательного построения деревьев, где каждое следующее дерево исправляет ошибки предыдущего. Использовалась стандартная реализация с регуляризацией для предотвращения переобучения.

Нейросетевая модель долгой краткосрочной памяти — рекуррентная нейронная сеть, способная учитывать долгосрочные зависимости во временных рядах благодаря механизму вентилей. Данный механизм включает регулирующие элементы, описываемые формулами (1)–(4):

$$f_t{=}\sigma\left(W_f x_t{+}U_f h_{t-1}{+}b_f\right), \tag{1}$$

$$i_t{=}\sigma(W_i x_t{+}U_i h_{t-1}{+}b_i) \tag{2}$$

$$o_t{=}\sigma(W_o x_t{+}U_o h_{t-1}{+}b_o), \tag{3}$$

$$c_t{=}f_t{\odot}c_{t-1}{+}i_t{\odot}tanh\left(W_c x_t{+}U_c h_{t-1}{+}b_c\right), \tag{4}$$

где σ — сигмоида, x_t — вход блока t, h_{t-1} — выход блока $t-1$, c_{t-1} — внутреннее состояние блока $t-1$, $\odot$ — поэлементное произведение, W_f, W_i, W_o, W_c, U_f, U_i, U_o, U_c, b_f, b_i, b_o, b_c — параметры модели, которые необходимо оценить. Вентиль забывания (1) определяет, какую информацию из предыдущего состояния ячейки следует удалить. Вентиль входного состояния (2) решает, какую новую информацию добавить. Вентиль выходного состояния (3) определяет, какая часть обновленного состояния ячейки будет передана на выход. Внутреннее состояние ячейки (4) выступает в роли долговременной памяти, сохраняя ключевую информацию на протяжении многих шагов.

Архитектура нейросетевой модели включала два слоя (128 и 32 нейрона) с вероятностью отключения нейронов, равной 0,3, для регуляризации, функция потерь — среднеквадратичная ошибка. Обучение останавливалось досрочно при отсутствии улучшения на валидационной выборке в течение семи эпох, дополнительно создавалось окно истории в размере 30 дней для прогноза следующего дня. Для всех данных применялась нормализация методом минимакс [10], приводящая значения признаков к диапазону [0;1]. Это необходимо для корректной работы нейросетевых моделей, чувствительных к масштабу входных величин.

Выборка была разделена на обучающую (60%), валидационную (15%) и тестовую (25%) части с сохранением хронологического порядка. Качество прогнозов оценивалось на валидационной выборке по трем стандартным метрикам [11]: средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратичная ошибка ($RMSE$), коэффициент детерминации (R^2):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|, \qquad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}, \qquad R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2},$$

где y_i — истинное значение, $\hat{y}_i$ — прогнозируемое значение, $\overline{y}$ — среднее значение в выборке, n – количество объектов выборки.

Для оценки качества прогнозирования нейросетевой моделью проверка проводилась в два этапа. Первый этап: стандартное разделение на обучающую и валидационную выборку. Второй этап: модель обучалась на периоде с 2009 по 2018 год, после чего ее веса были сохранены, далее она была протестирована на новом периоде с 2019 по 2022 год (тестовая выборка) без дообучения. Это позволило оценить способность модели к прогнозированию на будущих данных в условиях, максимально приближенных к реальному применению.

Результаты и анализ

В таблице приведены оценки точности прогнозирования, полученные на первом этапе.

Таблица

Сравнение качества прогноза ансамблевых моделей и нейросетевой модели долгой краткосрочной памяти

Модель	**MAE**	**RMSE**	$\boldsymbol{R^2}$
Случайный лес	5,23	7,06	0,42
Градиентный бустинг	4,74	6,23	0,55
Нейросетевая модель долгой краткосрочной памяти	2,87	3,91	0,83

Архитектура нейросетевой модели долгой краткосрочной памяти продемонстрировала лучшее качество прогноза, превосходя ансамблевые методы по всем метрикам. Высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0{,}83$) свидетельствует о том, что модель объясняет 83% дисперсии исходного ряда CO_2. Близость значений MAE и $RMSE$ (2,87 и 3,91 соответственно) указывает на отсутствие крупных выбросов в прогнозах.

Для оценки модели долгой краткосрочной памяти в максимально приближенных к реальности условиях был проведен второй этап проверки. Результаты второго этапа со следующими оценками: $MAE = 4{,}39$, $RMSE = 4{,}45$, $R^2 = 0{,}66$ — представлены на рисунке 1.

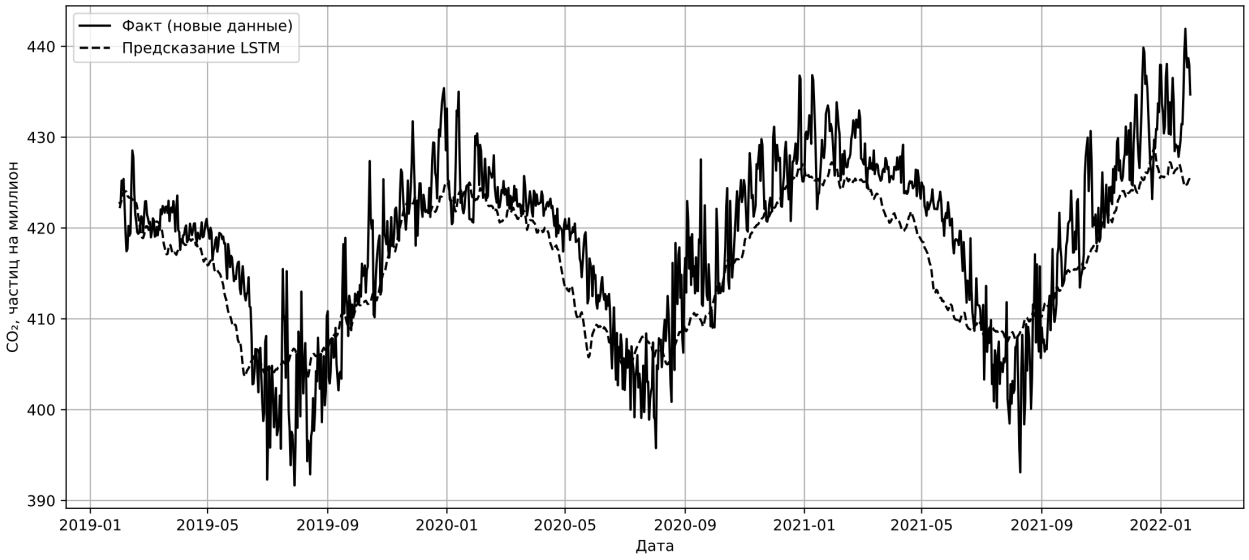


Рис. 1. *Сравнение результатов прогноза нейросетевой моделью долгой краткосрочной памяти с натурными измерениями CO_2*

Также был проведен анализ важности признаков, который показал, что наибольший вклад в прогноз вносят температура воздуха, скорость ветра, температура точки росы и относительная влажность. Для анализа применялись коэффициенты корреляции Пирсона [12] и Спирмена [13], результаты представлены на рисунках 2-3 соответственно.

На следующем этапе для оценки долгосрочной динамики CO_2 на период с 2026 по 2029 год были сформированы прогнозные значения ключевых метеорологических параметров: температура воздуха, температура точки росы, относительная влажность, скорость ветра — с помощью отдельной модели долгой краткосрочной памяти, обученной на многолетнем ряде наблюдений. Полученные прогнозные метеоданные подавались на вход ранее обученной модели. В результате получен прогноз среднесуточной концентрации CO_2 на 2026–2029 годы (рисунок 4).

Полученные результаты подтверждают эффективность применения рекуррентных нейросетей для долгосрочного прогнозирования концентрации углекислого газа в атмосфере. Преимущество рекуррентной нейронной сети долгой краткосрочной памяти перед ансамблевыми ме-

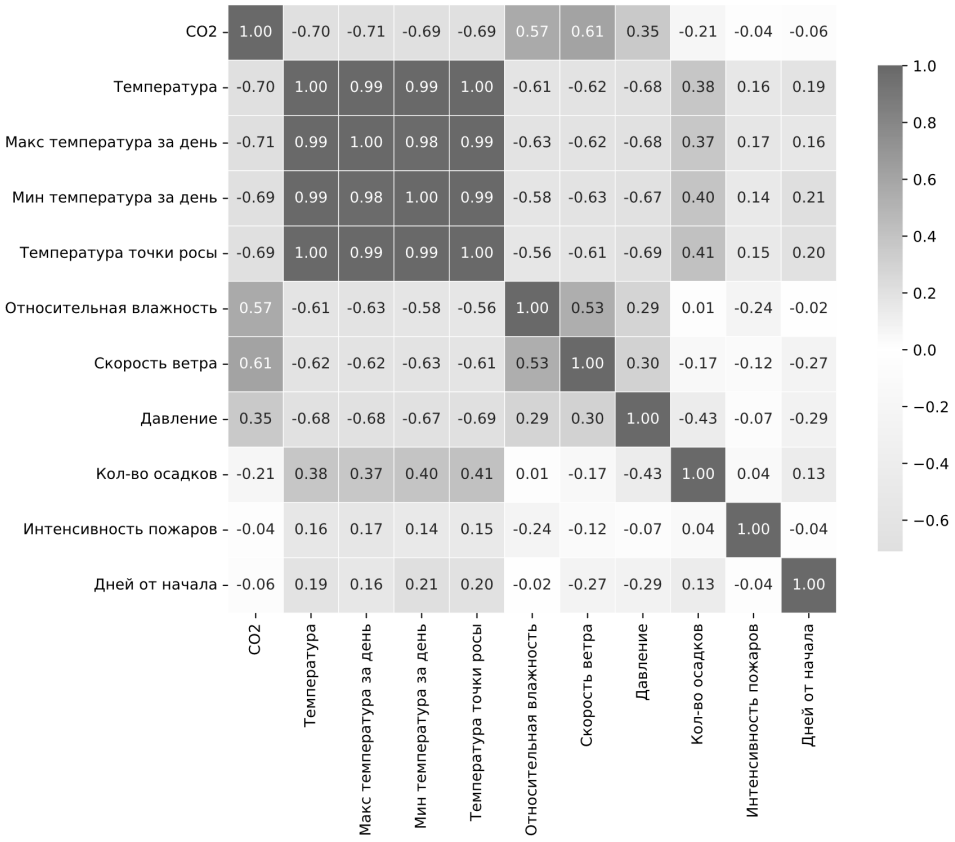


Рис. 2. *Матрица корреляций признаков, коэффициент Пирсона*

тодами машинного обучения объясняется способностью архитектуры учитывать долгосрочные зависимости благодаря механизму вентилей, тогда как случайный лес и градиентный бустинг оперируют только фиксированным набором признаков без учета последовательной структуры данных.

Выявленная высокая значимость температуры, влажности и скорости ветра как предикторов согласуется с физикой процесса: температура воздуха контролирует интенсивность дыхания экосистем (выделение углекислого газа), влажность — активность фотосинтеза (поглощение углекислого газа), а скорость ветра отвечает за рассеивание частиц в воздухе.

Сформированный прогноз на три года вперед: с 2026 по 2029 год — демонстрирует продолжение тренда роста концентрации углекислого газа в атмосфере над Центральной Сибирью, что согласуется с глобальными наблюдениями и подтверждает устойчивость выявленных закономерностей.

Заключение

Проведен сравнительный анализ трех методов машинного обучения для прогнозирования ежедневной концентрации углекислого газа в Центральной Сибири. Показано, что модель нейронной сети долгой краткосрочной памяти превосходит ансамблевые методы (случайный лес и градиентный бустинг) по точности прогноза.

Установлено, что ключевыми метеорологическими предикторами для прогноза углекислого газа являются температура воздуха, относительная влажность и скорость ветра, что соответствует физическим представлениям о функционировании наземных экосистем.

Выполнено прогнозирование ежедневной величины концентрации углекислого газа в атмосфере Центральной Сибири на период с 2026 по 2029 год с помощью модели нейронной сети долгой краткосрочной памяти.

В дальнейших исследованиях предполагается оценить вклад антропогенных источников (промышленные выбросы, энергетика, транспорт) в общий баланс углекислого газа.

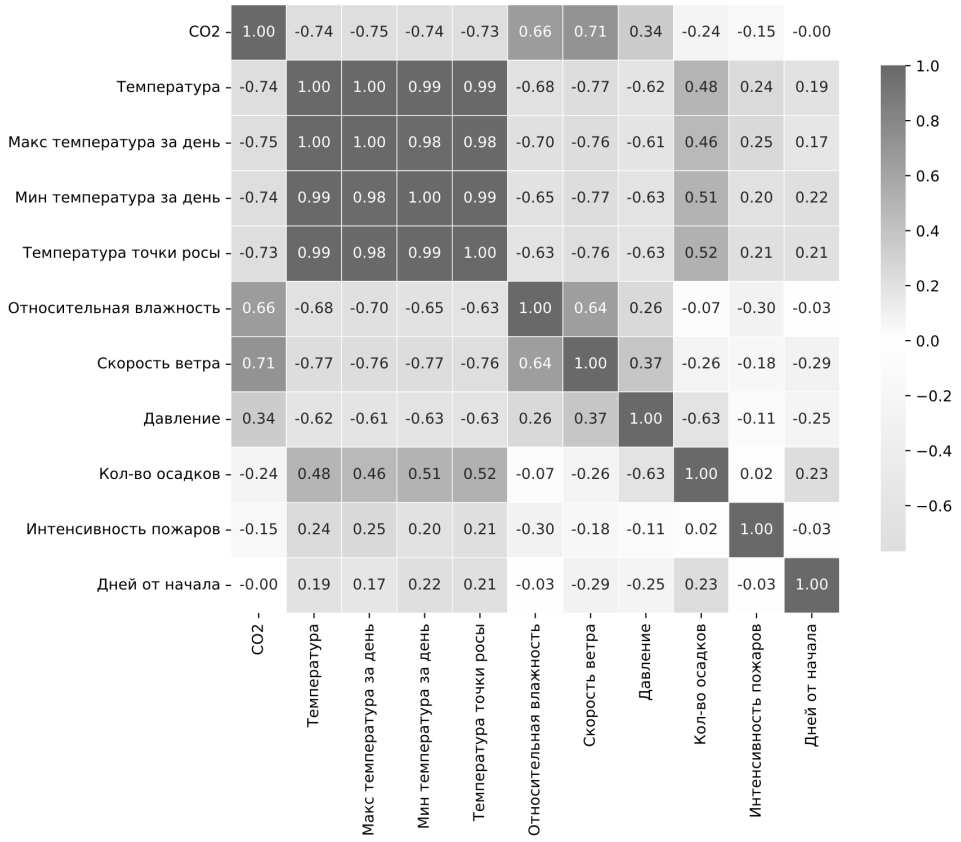


Рис. 3. *Матрица корреляций признаков, коэффициент Спирмена*

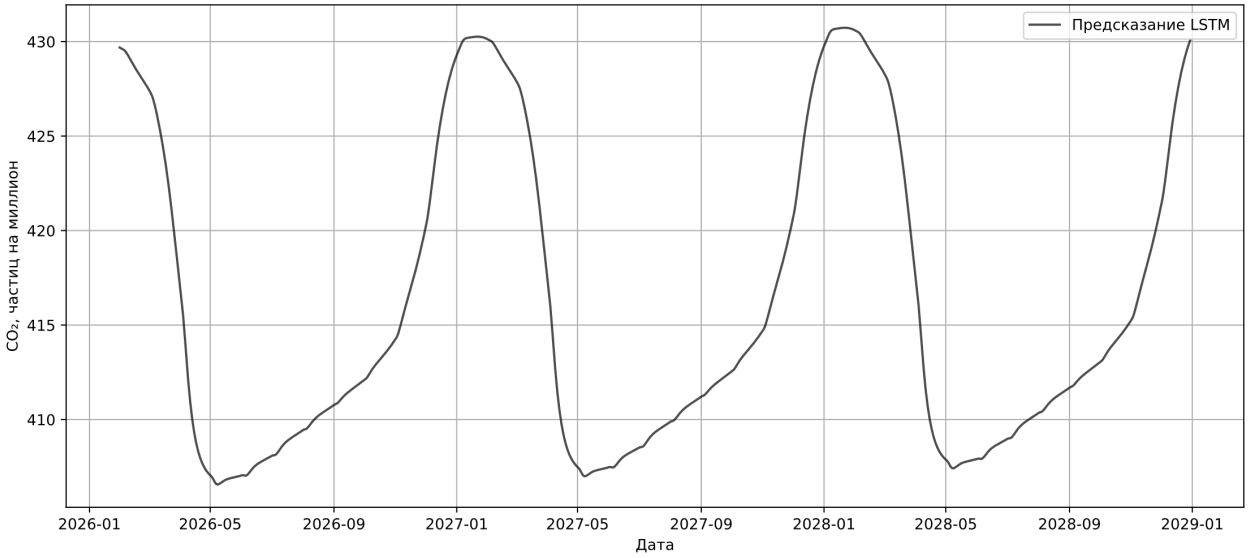


Рис. 4. *Прогноз ежедневной величины концентрации CO_2 в атмосфере Центральной Сибири нейросетевой моделью долгой краткосрочной памяти на три года вперед: с 2026 по 2029 год*

ЛИТЕРАТУРА

1. Timokhina A. V., Prokushkin A. S., Panov A. V., Kolosov R. A., Sidenko N. V., Lavric J., Heimann M. Interannual Variability of Atmospheric CO_2 Concentrations over Central Siberia from ZOTTO Data for 2009–2015. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2018;43(5):288-294. DOI: 10.3103/S1068373918050023.
2. Liu W., Niu Z., Feng X., Zhou W., Liang D., Wang G., Liu L. Determining the Key Meteorological Factors Affecting Atmospheric CO_2 and CH_4 Using Machine Learning Algorithms at a Suburban

Site in China. *Urban Climate*. 2025;59:102312. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102312.
3. Rezaei Z., Samghabadi S. S., Amini M. A., Shi D., Banad Y. M. Predicting Climate Change: A Comparative Analysis of Time Series Models for CO_2 Concentrations and Temperature Anomalies. *Environmental Modelling & Software*. 2025;192:106533. DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106533.
4. Dieu Anh T., Gerbig C., Rödenbeck C., Panov A., Prokushkin A., Winderlich J., Lavrič J., Heimann M., Seifert T., Schultz U., Schmidt S., Zaehle S. Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) Hourly CO_2 Measurement Dataset. *Edmond*. Режим доступа: https://doi.org/doi:10.17617/3.YBPFG2.
5. *NASA FIRMS: Fire Information for Resource Management System*. Режим доступа: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/.
6. *NASA POWER: Prediction of Worldwide Energy Resources*. Режим доступа: https://power.larc.nasa.gov/.
7. Biau G., Scornet E. A Random Forest Guided Tour. *Test*. 2016;25(2):197–227. DOI: 10.1007/s11749-016-0481-7.
8. Xie Y., Tummala S. P. Machine Learning for Sensor Analytics: A Comprehensive Review and Benchmark of Boosting Algorithms in Healthcare, Environmental, and Energy Applications. *Sensors*. 2025;25(23):7294. DOI: 10.3390/s25237294.
9. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997;9(8):1735-1780.
10. Старовойтов В. В., Голуб Ю. И. Нормализация данных в машинном обучении. *Информатика*. 2021;18(3):83–96. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96.
11. Brassington G. Mean Absolute Error and Root Mean Square Error: Which Is the Better Metric for Assessing Model Performance? *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2017;19:3574.
12. Pearson K. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1901;2(11):559–572. DOI: 10.1080/14786440109462720.
13. Hauke J., Kossowski T. Comparison of Values of Pearson's and Spearman's Correlation Coefficients on the Same Sets of Data. *Quaestiones Geographicae*. 2011;30(2):87–93. DOI: 10.2478/v10117-011-0021-1.

МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ АКТИВНОСТИ В УМНОМ ДОМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ (WSN) И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ (IOT)

Н. В. Замятин[а], **Г. В. Смирнов**[б]

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация

[а] ✍ *zamnv47@gmail.com*, [б] *smirnov@main.tusur.ru*

Аннотация: в последнее время развитие умного дома определяется новыми возможностями благодаря быстрому развитию беспроводных сенсорных сетей (WSN) и Интернета вещей (IoT). Эти приложения в режиме реального времени позволяет расширить объем услуг для пользователей умного дома, повысить эффективность использования ресурсов. Для этого требуется структурированный подход к интеграции WSN и IoT. Несмотря на наличие устоявшихся технологий, не хватает методологии для создания аппаратных и программных платформ и их эффективного взаимодействия. Поэтому в данной статье представлена трехэтапная методика, позволяющая сначала спроектировать архитектуру системы, затем определить критерии, сформулировать требования и обосновать выбор каждого компонента системы.

Ключевые слова: Интернет вещей, беспроводные сенсорные сети, окружающая среда, умный дом.

Для цитирования: Замятин Н. В., Смирнов Г. В. Методика распознавания активности в умном доме с использованием беспроводных сенсорных сетей (WSN) и Интернета вещей (IoT). *Успехи кибернетики*. 2026;7(2):109–118.

Поступила в редакцию: 02.03.2026. *В окончательном варианте: 16.06.2026.*

HUMAN ACTIVITY RECOGNITION IN SMART HOMES USING WSN AND IOT

N. V. Zamyatin[a], **G. V. Smirnov**[b]

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

[a] ✍ *zamnv47@gmail.com*, [b] *smirnov@main.tusur.ru*

Abstract: we studied the recent development of smart homes, which is driven by advances in wireless sensor networks (WSN) and the Internet of Things (IoT). These technologies enable real-time applications that expand the range of smart home services and improve resource efficiency. Smart home systems require a structured approach to the integration of WSN and IoT components. Despite the availability of technologies, a methodology for the design and integration of hardware and software components in smart home system is still insufficiently developed. We proposed a three-stage methodology for the development of smart home systems based on WSN and IoT. We designed the system architecture, defined evaluation criteria, formulated system requirements, and provided a rationale for the selection of individual system components. The proposed approach provides a structured framework for the systematic integration of heterogeneous devices and services in smart home environments.

Keywords: Internet of Things, wireless sensor networks, environment, smart home.

Cite this article: Zamyatin N. V., Smirnov G. V. Human Activity Recognition in Smart Homes Using WSN and IoT. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):109–118.

Original article submitted: 02.03.2026. *Revision submitted: 16.06.2026.*

Введение

Достижения цифровых технологий направлены на удовлетворение потребностей общества, при этом обеспечивается эффективный контроль и управление различными аспектами жизнедеятельности. Ключевыми элементами стали датчики и беспроводные сенсорные сети (БСС). Такой прогресс достигнут благодаря развитию беспроводной связи, датчиков и исполнительных устройств, при этом снижаются расходы на установку большого количества датчиков в жилых помещениях. Автоматизация жилья и мониторинг — основные сферы, где применяются БСС с набором датчиков для отслеживания действий жильцов. Беспроводные датчики могут питаться

от батарей или электросети, а выбор зависит от условий использования и доступности источников питания. Срок службы батарей зависит от мощности передачи и частоты сбора данных.

Понятие умного дома

Умные дома уже стали реальностью, положительно влияя на жизнь людей. Умный дом — это жилое пространство, оснащенное интеллектуальными технологиями для мониторинга и контроля действий обитателей, а также для улучшения качества жизни за счет прогнозирования состояния здоровья на основе анализа поведения. Системы умного дома взаимодействуют друг с другом через контроллер, по заданным схемам или режимам работы. Такие системы, или «системы с учетом контекста», определяют местоположение и действия человека и решают, какие процедуры необходимо предпринять. Эти системы используются для улучшения повседневной жизни, особенно для людей с ограниченными возможностями.

Активность в умном доме

В контексте распознавания активности основные характеристики «умного дома» включают: повышенный комфорт, независимую жизнь, эффективное использование ресурсов и безопасность. Активность в умном доме – это совокупность физических действий человека, представленных в иерархической структуре и состоящих из последовательности простых операций. Действие «выпить кофе» может быть разделено («войти в кухню», «взять кофе») на операции, которые являются элементарными шагами (например, «включить кофейник», «повернуть ручку»).

Обнаружение и распознавание активности в умном доме (HAR — Human Activity Recognition) — динамично развивающаяся область, и цель HAR заключается в идентификации действий жильцов на основе последовательности наблюдаемых событий с использованием различных датчиков, таких как RFID-метки, датчики запаха, датчики движения, датчики давления, PIR-датчики и т.д. Процесс HAR состоит из нескольких этапов:

- предварительная обработка: сбор данных от датчиков, удаление шума и избыточности, нормализация и маркировка данных;
- извлечение признаков: получение признаков из данных для использования в машинном обучении;
- отбор признаков: уменьшение количества признаков для повышения качества и снижения вычислительных затрат;
- классификация: определение вида деятельности с использованием машинного обучения и логических рассуждений.

Поэтому HAR — замена человеческих действий путем прогнозирования этих действий и их реализации или удовлетворения потребностей, заранее определенных человеком. В том числе с помощью датчиков система HAR может отслеживать состояние здоровья людей и сообщать о нем медицинскому персоналу в случае необходимости.

Перспективным в области «умных домов» на базе WSN является появление IoT (Интернета вещей). Повсеместная связь и распределенный интеллект Интернета вещей с помощью беспроводных технологий становятся определяющими для дистанционного контроля и управления. Интернет вещей в контексте «умного дома» можно представить как подключение бытовых объектов, особенно электронных, электрических приборов, датчиков и исполнительных механизмов к сервисам Всемирной сети. Объекты и устройства становятся интеллектуальными и связывают человека с вещами, а также осуществляют связь между самими вещами. Эти отношения и взаимопонимание создают возможность для устройств, находящихся в среде «умного дома», начать взаимодействие и создавать совершенно иную среду. Поэтому окружающая среда, изучающая повседневную деятельность, должна реагировать на поведение жителей, улучшая их здоровье и благосостояние.

Уже существуют системы «умного дома», основанные на технологии беспроводной связи, но интеграция беспроводной связи с IoT обладает большими возможностями в приложениях для «умного дома». Большинство исследований «умных домов» на базе IoT находятся на стадии разработки, и лишь немногие из них имеют практическую реализацию [1]. Интеллектуальные системы на базе IoT хотя и реализуют удаленный доступ и быстрый анализ домашней обстановки, но при этом нужно динамическое управление базами данных [2]. Также большинство проектов «умного

дома» реализуется в лабораторных условиях или на испытательном стенде, отличающихся от реальной среды, где обитатель живет обычной жизнью.

Среда «умного дома» обнаруживает активность на основе необработанных сенсорных данных, и эти необработанные наборы данных сложны и нерегулярны для кодирования в соответствии с заранее определенными сценариями. Даже после кодирования этих необработанных данных очень сложно идентифицировать отклоняющееся поведение, поскольку эти наборы данных имеют разные временные показатели (частоту дискретизации) и способы восприятия. Эти различия во времени и датчиках создают проблемы при распознавании активности. Можно использовать поведенческие модели на основе наборов данных об отдельных событиях, но это может вызвать ложную тревогу. Целесообразно применение для формирования поведенческих моделей недавно полученных данных и данных обратной связи, чтобы отделить обычные данные от неожиданных, ставящих под угрозу здоровье и благосостояние жителей.

Модель умного дома включает 4 уровня:

уровень интерфейсов — категории и пользователи интерфейсов;

уровень подготовки данных — машинное обучение, онтологии, сохранение данных и представление;

уровень коммуникаций — беспроводные сенсорные сети, Интернет вещей;

физический уровень — пользователи, окружающая среда.

В данной статье будет рассматриваться методика обнаружения активности в умном доме на уровне коммуникаций: с использованием беспроводных сенсорных сетей и Интернета вещей.

Беспроводные сенсорные сети (WSN) и их роль в Интернете вещей

Беспроводные сенсорные сети состоят из узлов, включающих датчики, контроллеры, исполнительные механизмы и радиочастотные модули для беспроводной связи на основе стандарта IEEE 802.15.4. Этот стандарт определяет радиочастотную связь только для уровней PHY и MAC, но не определяет сетевые технологии для верхних уровней. Поэтому лучше использовать ячеистую сеть Mesh вместе с IPv6, с протоколом IEEE 802.15 ZigBee. Эти свойства сети обеспечивают аутентификацию узлов, шифрование и эффективную маршрутизацию при функционировании ячеистых сетей. Стандарты IEEE 802.15.4 ZigBee работают в безлицензионном промышленном, научном и медицинском диапазоне частот (ISM) [3].

Система умного дома реализуется на двух уровнях: аппаратном и программном. На аппаратном уровне используются разнородные датчики для работы с несколькими активностями и событиями. Эти беспроводные сенсорные узлы лучше реализовывать с использованием ячеистой топологии ZigBee, а данные принимать центральным координирующим узлом и собирать локальным компьютером домашнего шлюза.

Программные модули подразделяются на разные уровни, такие, как регистрация данных, извлечение и хранение данных; но их конечная задача — прогнозировать изменения в активности и соотносить их с состоянием здоровья жителей в режиме реального времени или близкого к нему.

Типичная сеть WSN состоит из множества маломощных сенсорных узлов и базовых станций, объединенных беспроводным способом, и такая сетевая система позволяет обмениваться данными между сенсорными узлами. Беспроводные сенсорные сети (WSN) представляют сетевой уровень узлов и датчиков, обеспечивающих в совокупности мониторинг конкретной среды умного дома, и это является необходимым компонентом Интернета вещей [4]. Сенсорные узлы измеряют аналоговые сигналы, используя аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и передают эти значения с помощью радиочастотных сигналов через базовые станции.

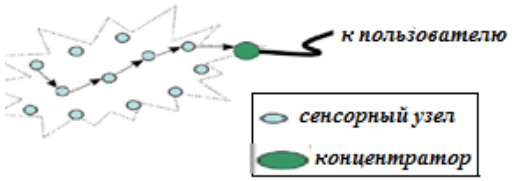


Рис. 1. *Беспроводные сенсорные сети*

Существуют различные типы топологий для построения WSN, такие как «звезда», ячеистая топология и гибрид «звезда-сетка» [4]. Ряд проблем возникает при разработке WSN:

- множество сенсоров WSN обычно расположено в пространстве, что приводит к большим объемам входящих и исходящих данных. При этом нужна синхронизация передачи данных, поскольку одновременная передача нескольких пакетов данных может вызвать проблемы у получателей [5];
- для обеспечения надежной связи такой большой сети нужно ее резервирование, что увеличивает затраты;
- сенсорные узлы обычно работают от батарей, требующих замены и подзарядки, поэтому энергоэффективность узлов имеет решающее значение для широкого использования.

Быстрое развитие связи, сетей и других смежных технологий привело к появлению различных сенсорных узлов, включающих распределенные датчики для измерения температуры, запаха, звука, вибрации, давления, движения, концентрации загрязняющих веществ. Они способны выполнять управление, передачу данных и вычисления, позволяя получать и измерять данные более эффективно и точно независимо от подключения к сети [6].

Каждый сенсорный узел выполняет небольшой объем обработки, но при взаимодействии с другими узлами сети происходит обмен данными и приводятся в действие исполнительные активаторы. Сенсорные сети надежны, точны, экономичны, более просты в установке и обеспечивают широкие возможности обнаружения активности в умном доме.

Интернет вещей (IoT) и его взаимодействие с беспроводными сенсорными сетями

Технологии Wi-Fi, Ethernet или сотовые сети, поддерживающие доступ в Интернет и функциональные для Интернет-коммуникаций, могут применяться и для Интернета вещей. Однако требования для Интернета вещей отличаются от требований к устройствам, подключенным к Интернету.

Во-первых, для потокового мультимедиа, облачных хранилищ и удаленных приложений Интернета высокая пропускная способность является определяющей. В то же время для Интернета вещей пропускная способность невысока, поскольку эти устройства только собирают и отправляют сенсорные данные или получают управляющие сигналы [7].

Во-вторых, устройствам Интернета вещей не нужен пользовательский интерфейс, и они функционируют и принимают решения без вмешательства человека. Устройства собирают данные, которые обрабатываются каким-либо приложением, и затем нужное действие выполняется в соответствии с каким-либо алгоритмом.

Третьим фактором является то, что масштабы Интернета вещей намного больше, чем у периферийных устройств Интернета. Для этого требуется магистраль Интернета вещей, способная обслуживать большое количество устройств с использованием протокола IPv6.

Протоколы в соответствии с обобщенной моделью Интернет-технологий приведены в [3], а система прямого доступа сенсоров к Интернету, показанная на рис. 2, — в [8].

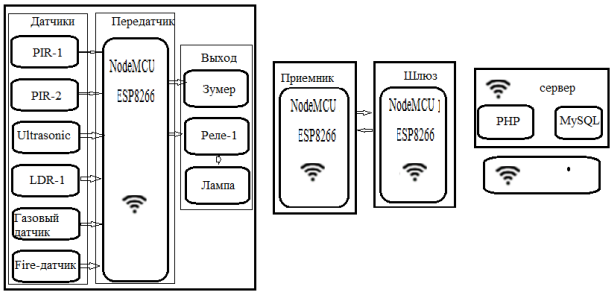


Рис. 2. *Прямой доступ сенсоров к Интернету*

Представлена трехэтапная структура, позволяющая спроектировать архитектуру системы, определить критерии и обосновать выбор каждого компонента.

Первый этап — проектирование архитектуры системы. На этом этапе разрабатывается концептуальная и независимая от технологий архитектура для создания WSN, включающей IoT, с целью обнаружения активности в умном доме. Эта архитектура должна быть универсальной, и ее можно легко адаптировать в каждом конкретном случае. Предлагаемая обобщенная архитектура, содержащая четыре уровня, показана на рис. 3.

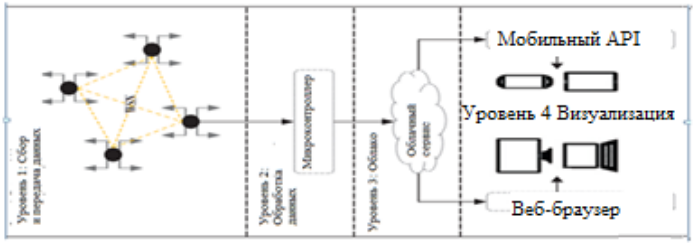


Рис. 3. *Обобщенная архитектура системы распознавания активности*

Уровень 1: сбор данных осуществляется на WSN. Для сохранения гибкости архитектуры на этом уровне не нужно определять топологию сети. Поэтому выбор сетевого протокола станет критерием выбора на шаге 2.

Уровень 2: WSN взаимодействует с микроконтроллером для передачи данных с соответствующими протоколами. Обработка данных, а также взаимодействие с онлайн-системами будут осуществляться этим устройством.

Уровень 3: веб-сервер или облачное решение по подписке предпочтительнее статического сервера по сравнению с 4-уровневой платформой, предложенной [9]. Программное обеспечение по подписке не только выполняет простое хранение данных. Аналитика данных и уведомления могут обрабатываться на стороне сервера, что упрощает и рационализирует всю архитектуру.

Уровень 4: рекомендуется использовать мобильное приложение, чтобы сделать данные более доступными.

Архитектура локальной беспроводной сенсорной сети в умном доме

Систему нужно реализовать на протоколах, имеющих такую важную характеристику, как низкое энергопотребление [10]. Схема архитектуры локальной системы, показанная на рисунке 4, содержит беспроводную сеть, локальный домашний шлюз, беспроводные маршрутизаторы.

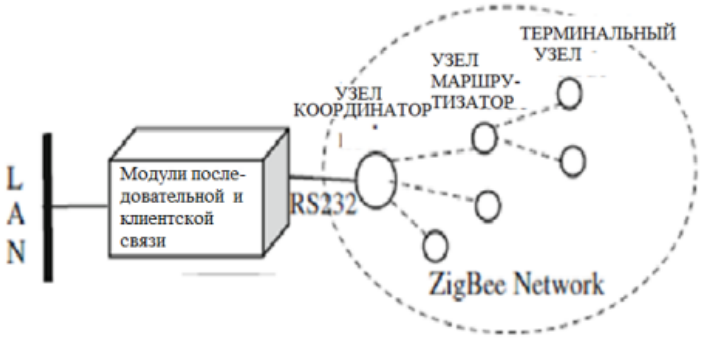


Рис. 4. *Архитектура системы*

Архитектура удаленной сетевой системы с доступом в Интернет

Архитектура удаленной системы WSN и IoT (рис. 5) представлена на основе локальной системы и позволяет работать пользователям с локальной системой через Интернет.

Конкретные аппаратные и программные продукты не указаны в архитектуре на рис. 3. Поэтому на втором этапе необходимо предоставить обоснованные рекомендации по выбору компонентов для каждого уровня, как показано в таблице 1, которые можно использовать при сравнении различных систем.

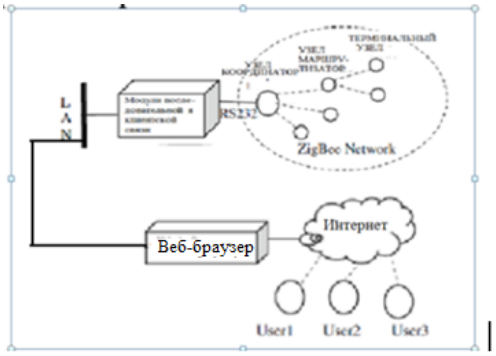


Рис. 5. *Архитектура удаленной сетевой системы с доступом в Интернет*

Таблица 1

Краткое описание критериев выбора компонентов

Подсистемы	Элементы системы	Критерии выбора
Уровень 1. Сбор и передача данных	Выбор топологии сети	Работа с несколькими топологиями. Встроенный АЦП
	Передающий радиочастотный модуль	Минимальные возможности программирования
	Выбор сенсоров	Аналоговый преобразователь целесообразней цифрового
Уровень 2. Обработка данных	Приемный радиочастотный модуль	Возможность синхронизации данных ручным способом
	Выбор микропроцессора	Простое программирование. Взаимодействие с выбранными радиочастотными модулями. Возможность подключения к Интернету
Уровень 3. Работа в облаке	Облачная платформа подписки или веб-сервер	Представленный API для работы. Вычисления на стороне сервера
Уровень 4. Визуализация	Выбор мобильной операционной системы для разработки	Простые графические и аналитические библиотеки. Поддержка уведомлений в режиме реального времени
RF-радиочастота; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; API-интерфейс прикладного моделирования; OS-операционная система		

В частности, на уровне 1 необходимо принять три решения:

1. Выбор топологии сенсорной сети: топология сети зависит от варианта использования, и поэтому ее трудно стандартизировать, не зная спецификаций потенциальных приложений, но в узлах нужно быстро переключать топологии, чтобы сохранять энергоэффективность. Топология может сильно отличаться в зависимости от масштаба приложения, требований к резервированию и доступной мощности датчика. Предпочтительна ячеистая топология.

2. Выбор радиочастотного модуля (приемопередатчика) узла беспроводной сети: в качестве альтернативы рекомендуется использовать встроенный радиочастотный модуль с ограниченной функциональностью обработки. Как минимум, модуль должен быть способен преобразовывать аналоговые сигналы в цифровые (для измерений датчиками), обрабатывать множество топологий и иметь ограниченные возможности программирования. Выбирая программируемый датчик, можно легко управлять такими факторами, как частота дискретизации, время ожидания и пакетирование данных, без необходимости создания сложной схемы. Обязательным является наличие радиочастотного модуля с современными стандартами шифрования.

3. Выбор датчиков: датчики выбираются под конкретную задачу, для выполнения которой настроена сеть, и поэтому сложно определить конкретные критерии выбора. В качестве общей рекомендации следует использовать аналоговые датчики, а не цифровые по соображениям стоимости. Кроме того, наличие встроенного АЦП в радиочастотном модуле приводит к избыточности цифрового датчика.

На уровне 2 необходимо принять два решения:

- приемный радиочастотный модуль: для приемных модулей желательны те же характеристики радиочастотного модуля, которые описаны на уровне 1. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность синхронизации передачи данных;
- выбор микропроцессора: поскольку радиочастотный модуль был определен, основное внимание следует уделить выбору микропроцессоров. Микропроцессор не должен быть слишком сложным для тестируемого случая, и нужно наличие API-интерфейсов. Также целесообразно использовать модули, построенные на базе ESP-12E.

Выбранный микропроцессор должен быть легко программируемым, а также недорогим и способным работать от аккумулятора. Важно, чтобы микропроцессор имел готовые компоненты для взаимодействия благодаря выбранным радиочастотным модулям, это экономит время оператора и упрощает работу. Микропроцессор также должен иметь сетевые возможности для взаимодействия с Интернет-системами.

На уровне 3 платформа поддержки подписки должна обрабатывать прием и отправление больших объемов данных. Облачная платформа с API необходима, поскольку без использования API процедуры аутентификации занимают много времени. С другой стороны, использование просто веб-сервера экономически выгоднее из-за возможности обработки больших объемов данных, что характерно для работы с датчиками независимо от Интернета при получении данных с датчиков.

В качестве дополнительного требования нужно учесть возможность анализа данных и уведомление на стороне сервера вне зависимости от выбора платформы пользователем.

На уровне 4 выбор мобильной операционной системы для разработки в большей степени зависит от требований или предпочтений пользователя.

При разработке необходимо учесть возможность просмотра данных в режиме реального времени и визуализацию исторических данных. Также предпочтительны простая обработка уведомлений и последовательное подключение в режиме реального времени для просмотра данных на ПК.

Пример выбора модулей для системы распознавания в умном доме

В данном разделе показан пример выбора ключевых компонентов в соответствии с рекомендациями, представленными в предыдущем разделе.

Уровень 1. Сбор и передача данных

В соответствии с таблицей 1 сравниваются радиочастотные модули, как показано в таблице 2. После оценки была выбрана серия Digi Xbee®.

Серия Ciseco® XRF RF Digi Xbee® для встроенного ПО. При этом структура и выбор сохраняются даже при добавлении большего количества модулей или другой топологии WSN.

Уровень 2. Обработка данных. Выбор микропроцессора (таблица 3)

Raspberry Pi® слишком сложен для тестируемого случая. Поэтому лучше отдать предпочтение Arduino®, в основном, благодаря наличию API-интерфейсов Xbee®. Также целесообразно использовать модуль NodeMCU, построенный на базе ESP-12E, оснащенный процессором L106 с частотой 80 МГц и 224 КБАЙТ оперативной памяти.

Уровень 3. Выбор облачной среды или статического сервера

В связи с относительно простыми требованиями в данном случае Data.SparkFun® был выбран за его простоту и широкий спектр обучающих ресурсов. В то же время в сложных приложениях WSN с большими объемами данных такие сервисы, как машинное обучение и искусственный интеллект, могут принести значительную пользу.

Таблица 2

Выбор радиочастотных модулей

Критерии оценки	Ciseco® и XRF RF	Digi Xbee®	Радиомодуль CC1101
Поддержка АЦП	До 4 входов	До 6 входов	МГц с SMA антенной. Реально до 180 м
Возможность работы с несколькими топологиями	Необходимо программировать вручную	С помощью встроенного ПО можно построить любую топологию	Приемопередатчик для Arduino/ESP32-/STV32. Частота 433 МГц
Программирование	Удобного программного обеспечения не существует	С помощью программного обеспечения X-CTU	
Шифрование	128-разрядный стандарт AES		

Таблица 3

Выбор микропроцессора

Критерии	Arduino®	Raspberry Pi®	NodeMCU ESP8266
Описание	маленький микропроцессор с открытым исходным кодом	миниатюрный компьютер типа «Система на кристалле» (SoC)	Система на кристалле (SoC), подключенная к Wi-Fi
Сложность программирования	Программируется через последовательный интерфейс на ПК; использует язык программирования на основе C; доступны учебные ресурсы в Интернете	Способен работать с полноценной операционной системой, такой как Windows 10; но имеются сложности с дизайном	Работает под управлением полноценной операционной системы, такой как Windows 10, 11
Возможность взаимодействия с модулями Xbee	Устройства для сопряжения и API-интерфейсы существуют	Устройства для сопряжения есть, но не существует конкретных API-интерфейсов	Устройства для сопряжения и API-интерфейсы имеются
Подключение к Интернету	Необходимо использовать внешний адаптер	Встроенный Ethernet и Wi-Fi	Встроенный Ethernet и Wi-Fi

Уровень 4. Визуализация

В данном случае визуализация может быть упрощена за счет последовательного подключения к компьютеру, где есть возможность сохранять и просматривать данные, и это естественно для аналоговых компонентов с переходными процессами в компонентах схемы. Мгновенные значения могут меняться, поэтому лучше использовать среднее значение из нескольких отчетов, а для сглаживания данных целесообразно применить различные фильтры, например, фильтр скользящего среднего.

Заключение

В данной статье предложена обобщенная методика проектирования системы обнаружения активности в умном доме, использующая интеграцию WSN и Интернета вещей. Следуя трехэтапной схеме, пользователь может создавать решения, соответствующие его потребностям.

Таблица 4

Выбор облачных систем

Критерии	BM BlueMix	SparkFun®	Веб-сервер
Простота использования	Требуется опыт разработчика	Простой в использовании	Промежуточный уровень с несколькими руководствами
API (интерфейс прикладного программирования)	Представлены API-интерфейсы, но ограничена пользовательская документация	API-интерфейсы с функциями для начинающих и учебные пособия для получения доступа к Ардуино	Широкий спектр API-интерфейсов
Вычисления на стороне сервера	Обширный выбор серверных возможностей	На базовом уровне можно просматривать только конвейеры передачи данных	Обширный выбор серверных возможностей, включая машинное обучение и аналитику

Использование WSN и Интернета вещей позволяет создать совершенно новую среду с расширенным функциональными возможностями и преодолеть трудности с физическими и логическими подключениями. Преимущества этого заключаются не только в обеспечении качества жизни в умном доме и в снижении затрат с экономической точки зрения, но и в сокращении энергопотребления и связанного с этим воздействия на окружающую среду. Чтобы реализовать эти преимущества, Интернет вещей потребует дальнейших исследований для решения проблем больших данных, безопасности данных и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ronao C. A., Cho S.-B. Human Activity Recognition Using Smartphone Sensors with Two-Stage Continuous Hidden Markov Models. *Proceedings of the 10th International Conference on Natural Computation (ICNC)*. Xiamen, China; 2014:681–686.
2. Ye J., Dobson S., McKeever S. Situation Identification Techniques in Pervasive Computing: A Review. *Pervasive and Mobile Computing*. 2012;8(1):36–66.
3. Najmeddine H., El Khamlichi Drissi K., Pasquier M. et al. State of Art on Load Monitoring Methods. *IEEE 2nd International Power and Energy Conference (PECon 2008)*. Johor Bahru, Malaysia; 2008:1256–1258.
4. Buratti C., Conti A., Dardari D., Verdone R. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*. 2009;9(9):6869–6896. DOI: 10.3390/s90906869.
5. Fortin-Simard D., Bilodeau J.-S., Bouchard K., Gaboury S., Bouchard B., Bouzouane A. Exploiting Passive RFID Technology for Activity Recognition in Smart Homes. *IEEE Intelligent Systems*. 2015;30(4):7–15. DOI: 10.1109/MIS.2014.74.
6. Liu L., Stroulia E., Nikolaidis I., Miguel-Cruz A., Rios Rincon A. Smart Homes and Home Health Monitoring Technologies for Older Adults: A Systematic Review. *International Journal of Medical Informatics*. 2016;91:44–59. DOI: 10.1016/j.ijmedinf.2016.04.007.
7. Wilson J. S. *Sensor Technology Handbook*. Amsterdam: Elsevier; 2004. 704 p. ISBN: 9780750677295.
8. Wicaksono M. F., Rahmatya M. D. IoT for Residential Monitoring Using ESP8266 and ESP-NOW Protocol. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*. 2022;8(1):93–106.
9. Zhang Q., Wang Y., Cheng G., Wang Z., Shi D. Research on Warehouse Environment Monitoring System Based on Wireless Sensor Network. *9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2014)*. Hangzhou, China; 2014:1639–1644. DOI: 10.1109/ICIEA.2014.6931385.

10. Yashiro T., Kobayashi S., Koshizuka N., Sakamura K. An Internet of Things (IoT) Architecture for Embedded Appliances. *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*. Sendai, Japan; 2013:314–319. DOI: 10.1109/R10-HTC.2013.6669068.

АНСАМБЛЕВЫЙ МЕТОД ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫМ ПОРТФЕЛЕМ НА РОССИЙСКОМ ФОНДОВОМ РЫНКЕ

А. А. Кобзев[а], **О. Н. Крахмалев**[б]

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

[а] *ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2369-1741,* ✍ *artem.kobzev.2001@mail.ru*

[б] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9388-4137, onkrakhmalev@fa.ru*

Аннотация: в статье исследуется ансамблевый подход к управлению инвестиционным портфелем на российском фондовом рынке на основе глубокого обучения с подкреплением. Цель работы состоит в воспроизведении базовой ансамблевой архитектуры на данных российского рынка, в проверке ее переносимости и в выявлении тех модификаций, которые, действительно, улучшают качество торговли на длительный период. В качестве исходного решения рассматривается ансамбль из трех алгоритмов принятия решений, для которого последовательно анализируются расширение набора признаков, добавление макроэкономических переменных, штрафов за риск и механизма непрерывной адаптации одного из агентов в процессе торговли. Эксперименты проведены на данных 2015–2025 годов по ликвидным российским акциям, а итоговое сравнение выполнено на периоде 2023–2025 годов. Показано, что наибольший вклад в результат дает механизм непрерывного обучения, при котором агент дообучается на сделках любого активного участника ансамбля. Лучшая конфигурация обеспечивает суммарную доходность 61,7 процента и превосходит пассивные ориентиры по абсолютной доходности, однако не решает проблему защиты капитала на затяжном падающем рынке при высокой ключевой ставке.

Ключевые слова: глубокое обучение с подкреплением, управление инвестиционным портфелем, ансамблевые торговые стратегии, непрерывная адаптация, управление риском, российский фондовый рынок.

Для цитирования: Кобзев А. А., Крахмалев О. Н. Ансамблевый метод глубокого обучения с подкреплением для управления инвестиционным портфелем на российском фондовом рынке. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):119–125.

Поступила в редакцию: 06.04.2026. *В окончательном варианте: 14.05.2026.*

ENSEMBLE DEEP REINFORCEMENT LEARNING APPROACH FOR PORTFOLIO MANAGEMENT IN THE RUSSIAN EQUITY MARKET

A. A. Kobzev[a] , **O. N. Krakhmalev**[b]

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

[a] *ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2369-1741,* ✍ *artem.kobzev.2001@mail.ru*

[b] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9388-4137, onkrakhmalev@fa.ru*

Abstract: we studied an ensemble-based deep reinforcement learning approach to portfolio management in the Russian stock market. The study aimed to reproduce a baseline ensemble architecture using Russian equity market data, evaluate its transferability, and identify modifications that improve trading performance over a long investment horizon. We implemented an initial model consisting of three decision-making agents and then extended the analysis by incorporating a broader set of features, macroeconomic indicators, risk-adjusted reward functions, and a mechanism for continuous adaptation of one agent during live trading. We trained and evaluated the models on data from 2015 to 2025 for liquid Russian equities, and we conducted the final performance comparison on the out-of-sample period from 2023 to 2025. The results show that the main driver of performance improvement is continuous off-policy training, where one agent is updated using trading data generated by any active agent in the ensemble. The best-performing configuration achieves a cumulative return of 61.7 percent and outperforms passive benchmark strategies in absolute return. However, the results also reveal a structural limitation: a long-only ensemble without an explicit allocation mechanism to low-risk assets does not provide sufficient capital protection during prolonged bear market conditions combined with high interest rates.

Keywords: deep reinforcement learning, portfolio management, ensemble trading strategies, continuous adaptation, risk-aware optimization, Russian stock market.

Cite this article: Kobzev A. A., Krakhmalev O. N. Ensemble Deep Reinforcement Learning Approach for Portfolio Management in the Russian Equity Market. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):119–125.

Original article submitted: 06.04.2026. *Revision submitted: 14.05.2026.*

Введение

Задача управления инвестиционным портфелем традиционно решается методами среднедисперсионной оптимизации и ее байесовских расширений [1, 2]. Однако для российского рынка 2023–2025 годов такие подходы ограничены из-за выраженных режимных переходов: восстановительный рост 2023 года сменился длительным снижением в 2024 году на фоне ключевой ставки 21 %, после чего последовало частичное восстановление.

В качестве базового ориентира в работе используется ансамблевая архитектура FinRL [3]. Цель исследования состоит в проверке ее переносимости на данные Московской биржи и в выделении того компонента, который, действительно, повышает качество торговли вне обучающей выборки. Основная рабочая гипотеза: решающим фактором является не усложнение ансамбля, а непрерывная адаптация off-policy-агента на совокупном опыте системы.

Обзор литературы

Применение глубокого обучения с подкреплением к торговле развивалось от дискретных алгоритмов семейства DQN [4] к методам непрерывного действия, таким как DDPG [5], PPO [6] и SAC [7]. Для портфельных задач именно ансамбли и унифицированные среды FinRL-Meta [8] сделали возможным сопоставление нескольких политик в едином экспериментальном протоколе. Вместе с тем результаты на развитых рынках не гарантируют переносимости на рынок с высокой волатильностью и жесткими макроэкономическими шоками.

Для финансовых приложений особенно важны две линии работ: исследования практической применимости DRL в торговле [9] и работы по continual RL [10]. Они дополняются подходами к риск-чувствительной оптимизации, в которых используются когерентные меры риска и штрафы, связанные с рисками в хвостах распределений доходностей [11, 12]. В настоящей статье эти идеи сведены к минималистичной схеме: ансамбль из трех агентов, selection по качеству валидационного окна и непрерывное обновление SAC.

Методы

Эксперименты проведены на данных по 20 ликвидным акциям Московской биржи за 2015–2025 годы. Состояние агента включает долю денежных средств, веса текущего портфеля, 11 технических признаков на каждый актив, а также две макроэкономические переменные: ключевую ставку и курс рубля к доллару. Данные признаки чаще всего используются в торговых алгоритмах, в многочисленных работах, связанных с биржевым делом. Состав признаков приведен в таблице 1.

Формально наблюдаемое состояние системы в момент t задается формулой (1). Оно объединяет денежную позицию, текущие веса портфеля, технические признаки по каждому активу и макроэкономические переменные. Вектор действия агента интерпретируется как целевые веса портфеля и нормируется по формуле (2), что исключает отрицательные веса и обеспечивает сумму долей, равную единице.

$$s_t = \left[r_t^{\text{cash}},\, w_{1,t},\, \ldots,\, w_{N,t},\, f_{1,t},\, \ldots,\, f_{11N,t},\, k_t,\, u_t \right]^{\top}. \tag{1}$$

В формуле (1) r_t^{cash} обозначает долю капитала в денежной позиции, $w_{i,t}$ — вес i-го актива, $f_{i,t}$ — технические признаки, а k_t и u_t соответствуют ключевой ставке Банка России и курсу USD/RUB.

$$w_{i,t} = \frac{\max(0,\, a_{i,t})}{\max\left(1,\, \sum_{j=1}^{N} \max(0,\, a_{j,t})\right)}. \tag{2}$$

Таблица 1

Технические признаки, используемые в наблюдаемом пространстве состояний

№	**Признак**	**Обозначение**	**Описание**
1	Цена закрытия	close_z	Нормированная цена закрытия тикера
2	Логдоходность	close_ret	$\log(P_t/P_{t-1})$
3	Объем	value_log	Логарифм денежного оборота
4	MACD	macd	Разность экспоненциальных средних
5	RSI	rsi	Индекс относительной силы
6	CCI	cci	Commodity Channel Index
7	ADX	adx	Индекс направленного движения
8	ATR	atr	Мера текущей волатильности
9	Bollinger %B	boll_b	Позиция цены в полосе Боллинджера
10	OBV	obv_z	Нормированный балансовый объем
11	Относительная сила	rel_strength	Доходность бумаги к рынку

Формула (2) переводит непрерывное действие $a_{i,t}$ в допустимый набор портфельных весов: отрицательные компоненты отсекаются, после чего оставшиеся веса нормируются на их сумму.

Функция вознаграждения задается формулой (3). Она сочетает логарифмическую доходность портфеля со штрафами за текущую просадку, хвостовой риск CVaR и избыточный оборот, поэтому обучение ориентировано не только на рост капитала, но и на устойчивость результата.

$$r_t = 100 \cdot \log \frac{V_t}{V_{t-1}} - \lambda_{dd} DD_t - \lambda_{cvar} \mathrm{CVaR}_{5\%}(t) - \lambda_{turn} TO_t. \tag{3}$$

В формуле (3) V_t — стоимость портфеля, DD_t — текущая относительная просадка, $\mathrm{CVaR}_{5\%}(t)$ — условная стоимость под риском на уровне 5 %, а TO_t — оборот портфеля.

Штрафной член CVaR в формуле (3) раскрывается формулой (4). Он оценивает средний убыток в левом хвосте распределения недавних доходностей и тем самым усиливает чувствительность агента к экстремальным неблагоприятным сценариям.

$$\mathrm{CVaR}_{\alpha}(t) = -\mathbb{E}\left[r \le q_{\alpha}(r_{[t-20,\ t]})\right]. \tag{4}$$

В формуле (4) q_α задает α-квантиль доходностей на скользящем окне, а математическое ожидание берется только по наблюдениям, лежащим ниже этого порога.

Ансамбль состоит из PPO, A2C и SAC. В конфигурации v3 межагентное непрерывное обучение реализуется через сочетание on-policy и off-policy обновлений. Базовая целевая функция PPO задается формулой (5) и отражает клиппированное обновление политики; A2C использует ту же логику, но без PPO-клиппинга. Межагентное обновление критика SAC задается формулой (6). Для каждого валидационного окна длиной 63 торговых дня качество агента дополнительно оценивается коэффициентом Sortino по формуле (7), составным показателем по формуле (8), а правило выбора активного агента на следующее окно задается формулой (9).

$$L^{PPO}(\theta) = \mathbb{E}_t\left[\min\left(\rho_t(\theta)\hat{A}_t,\ \mathrm{clip}(\rho_t(\theta),\, 1-\epsilon,\, 1+\epsilon)\hat{A}_t\right)\right]. \tag{5}$$

В формуле (5) $\rho_t(\theta)$ обозначает отношение правдоподобий новой и старой политик, $\hat{A}_t$ — оценку преимущества, а оператор clip ограничивает слишком агрессивное изменение политики между итерациями.

$$L^{SAC}(\theta) = \mathbb{E}_{(s,a,r,s')\sim\mathcal{D}}\left[\left(Q_\theta(s,a) - y\right)^2\right], \qquad y = r + \gamma \bar{V}(s'). \tag{6}$$

В формуле (6) $\mathcal{D}$ — буфер повтора, содержащий переходы от любой политики ансамбля, а целевое значение y опирается на целевую функцию ценности следующего состояния. Именно этот шаг обеспечивает адаптацию SAC во время торговли.

$$\text{Sortino}_k^{(i)} = \frac{\bar{r}_k^{(i)}}{\sigma_{down,k}^{(i)} + \epsilon}. \tag{7}$$

В формуле (7) средняя дневная доходность агента на валидационном окне сопоставляется с нисходящим стандартным отклонением, а ϵ выступает малой стабилизирующей добавкой в знаменателе.

$$\text{score}_k^{(i)} = \text{Sortino}_k^{(i)} \cdot \exp\left(-\frac{\left|\text{MaxDD}_k^{(i)}\right|}{\sigma_{dd}}\right). \tag{8}$$

Формула (8) вводит штраф за глубокую просадку $\left|\text{MaxDD}_k^{(i)}\right|$, поэтому высокое значение Sortino само по себе не гарантирует выбор агента. Параметр σ_{dd} задает чувствительность штрафа и в экспериментах принимается равным 0,2.

$$i_k^* = \arg \max_{i \in \{PPO,\ A2C,\ SAC\}} \text{score}_k^{(i)}. \tag{9}$$

Формула (9) фиксирует правило выбора политики с максимальным значением score на очередном окне и замыкает контур принятия решений ансамбля.

Сопоставление конфигураций выполняется по суммарной доходности, годовой доходности, коэффициентам Sharpe и Sortino, а также по максимальной просадке. Как видно на рисунке 1, SAC быстрее других агентов выходит на высокие валидационные значения доходности и Sortino, поэтому именно он выбран в качестве адаптивного компонента ансамбля.

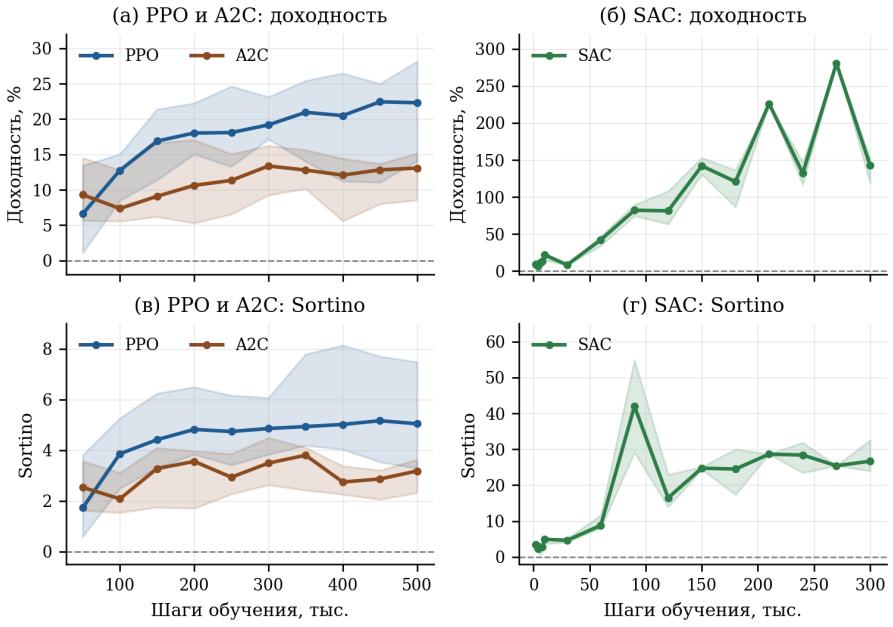


Рис. 1. *Динамика валидационных метрик PPO, A2C и SAC в ходе обучения*

Результаты

Ключевые воспроизводимые конфигурации сведены в таблицу 2. Базовая архитектура v1 практически не создает избыточной доходности на тесте, тогда как замена DDPG на SAC и расширение пространства признаков уже в v2 дают заметный прирост качества. Наилучший результат по абсолютной доходности получен в конфигурации v3: +61,7 % при Sharpe 0,590 и Sortino 0,730.

Таблица 2

Сводная таблица ключевых конфигураций и бенчмарков

Сводная таблица ключевых конфигураций и бенчмарков						
Конфигурация	Ключевые особенности	Total, %	Annual, %	Sharpe	Sortino	MaxDD, %
v1 — Базовая архитектура	PPO + A2C + DDPG; 7 признаков; log-return без риск-штрафов	+2,8	∼1,0	<0,30	—	−44,8
v2 — расширенная архитектура	SAC вместо DDPG; 11 признаков; макрофакторы; CVaR; адаптивная нормализация	+57,4	+15,1	0,547	0,703	−39,3
v3 — межагентное непрерывное обучение SAC	SAC обновляется на опыте любого активного агента после каждого торгового дня	+61,7	+16,1	0,590	0,730	−33,4
v4 — подтверждающая конфигурация	Обучение с нуля; online SAC; без дополнительных модулей рыночного режима	+51,4	+13,7	0,571	0,739	−32,1
v5 — резервный переход в кэш	При отрицательных score всех агентов портфель удерживается без торговли	+58,7	+15,3	0,500	1,020	−68,2
Buy&Hold IMOEX	Пассивный бенчмарк по индексу MOEX	+27,3	+8,3	0,499	0,739	−32,1
Равновзвешенный портфель	Пассивный бенчмарк по 20 бумагам	+40,8	+11,0	0,627	0,952	−29,8

Из рисунка 2 можно понять, что между суммарной доходностью, коэффициентом Sortino и глубиной просадки сохраняется выраженный компромисс. Конфигурация v4 подтверждает устойчивость вывода при обучении с нуля: она уступает v3 по абсолютной доходности, но практически совпадает с индексом IMOEX по максимальной просадке. Конфигурация v5 повышает Sortino до 1,020, однако достигает этого ценой неприемлемого роста максимальной просадки.

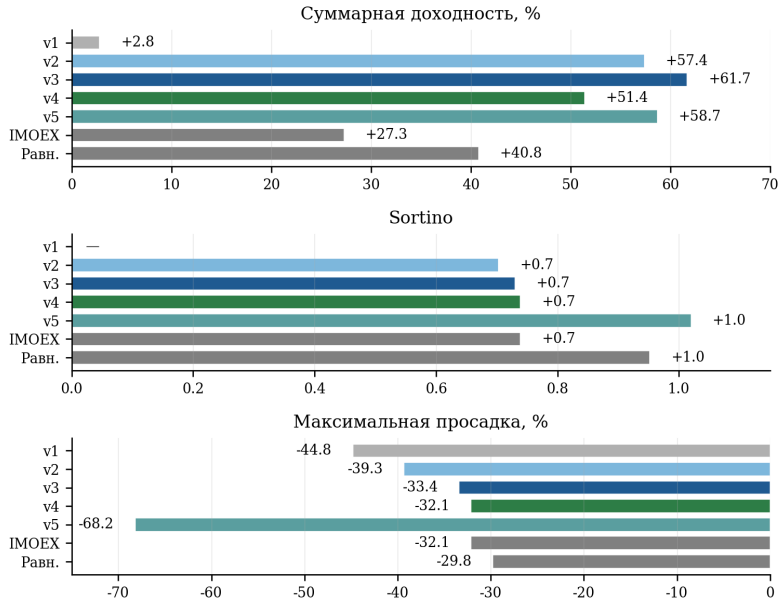


Рис. 2. *Сопоставление ключевых конфигураций по доходности, Sortino и просадке*

На рисунке 3 эффект непрерывного обучения SAC проявляется на ряде окон с отрицательным качеством у всех агентов базовой архитектуры, обновляемый SAC сохраняет положительное преимущество или быстрее восстанавливается на следующих окнах. Это подтверждает, что основной вклад в результат дает именно межагентное накопление опыта, а не увеличение числа эвристических модулей.

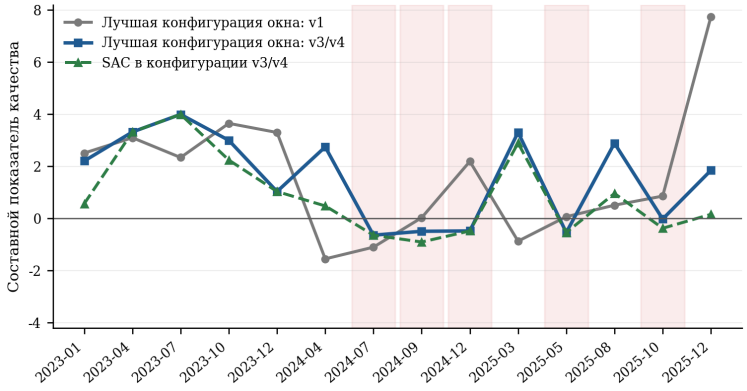


Рис. 3. *Влияние непрерывного межагентного обучения SAC на качество агентов*

При этом структурная проблема остается нерешенной. Все исследованные конфигурации являются long-only, а денежная позиция в среде не несет явной безрисковой доходности. Поэтому в режиме одновременного падения рынка и высокой ключевой ставки ансамбль не получает корректного сигнала в пользу защитного поведения. Это объясняет, почему задача защиты капитала остается открытой даже при заметном росте абсолютной доходности.

Заключение

Исследование показывает, что ансамбль PPO, A2C и SAC может быть перенесен на российский фондовый рынок, если критический компонент системы выполнен как непрерывно обновляемый off-policy агент. На данных 2023–2025 годов конфигурация v3 устойчиво превосходит пассивные ориентиры по абсолютной доходности, а подтверждающая конфигурация v4 воспроизводит основной вывод без дополнительных модулей. Следующий этап развития метода должен быть связан не с дальнейшим усложнением ансамбля, а с явным моделированием безрискового актива и режимов защиты капитала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Markowitz H. M. Portfolio Selection. *The Journal of Finance*. 1952;7(1):77–91. DOI: 10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x.
2. Black F., Litterman R. Global Portfolio Optimization. *Financial Analysts Journal*. 1992;48(5):28–43. DOI: 10.2469/faj.v48.n5.28.
3. Yang Z., Zhu Y., Guo J., Liu X.-Y., Zhong S., Walid A. Deep Reinforcement Learning for Automated Stock Trading: An Ensemble Strategy. *ICAIF '20*. 2020:1–8. DOI: 10.1145/3383455.3422540.
4. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D. et al. Human-Level Control through Deep Reinforcement Learning. *Nature*. 2015;518:529–533. DOI: 10.1038/nature14236.
5. Lillicrap T. P., Hunt J. J., Pritzel A. et al. Continuous Control with Deep Reinforcement Learning. arXiv:1509.02971. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1509.02971.
6. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal Policy Optimization Algorithms. arXiv:1707.06347. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1707.06347.
7. Haarnoja T., Zhou A., Abbeel P., Levine S. Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor. *Proceedings of ICML*. 2018:1861–1870.
8. Liu S., Rui J., Gao J. et al. FinRL-Meta: Market Environments and Benchmarks for Data-Driven Financial Reinforcement Learning. *36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022)*.

9. Theate T., Ernst D. An Application of Deep Reinforcement Learning to Algorithmic Trading. *Expert Systems with Applications*. 2021;173:114632. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114632.
10. Khetarpal K., Riemer M., Rish I., Precup D. Towards Continual Reinforcement Learning: A Review and Perspectives. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2022;75:1401–1476. DOI: 10.1613/jair.1.13673.
11. Artzner P., Delbaen F., Eber J.-M., Heath D. Coherent Measures of Risk. *Mathematical Finance*. 1999;9(3):203–228. DOI: 10.1111/1467-9965.00068.
12. Rockafellar R. T., Uryasev S. Conditional Value-at-Risk for General Loss Distributions. *Journal of Banking & Finance*. 2002;26(7):1443–1471. DOI: 10.1016/S0378-4266(02)00271-6.

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РЕСУРСОВ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

А. В. Макаров
Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7987-1842, ✍ *brad-pit1999@mail.ru*

Аннотация: в статье рассматривается комплексный подход к оценке ресурсов газовых месторождений, основанный на интеграции статистических методов и динамического моделирования. Предложена математическая модель, учитывающая геолого-физические особенности пласта и фильтрационные характеристики. Разработан алгоритм, позволяющий производить оценку с учетом неопределенностей исходных данных. Приведены результаты апробации метода на реальных месторождениях, показавшие его эффективность по сравнению с традиционными подходами.

Ключевые слова: газовые месторождения, оценка ресурсов, математическая модель, алгоритм, фильтрационные характеристики, неопределенность данных, стохастическое моделирование.

Для цитирования: Макаров А. В. Стохастический подход к оценке ресурсов газовых месторождений в условиях неопределенности исходных данных. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):126–131.

Поступила в редакцию: 20.01.2026. *В окончательном варианте: 18.02.2026.*

A STOCHASTIC APPROACH TO ESTIMATING GAS FIELD RESOURCES UNDER INPUT DATA UNCERTAINTY

A. V. Makarov
Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7987-1842, ✍ *brad-pit1999@mail.ru*

Abstract: we studied an integrated approach to estimating gas field resources by combining statistical methods with dynamic reservoir simulation. We developed a simulation model that accounts for geological and physical properties of the reservoir, as well as fluid flow characteristics. We proposed an algorithm that enables resource estimation under input data uncertainty. We tested the method on real gas fields and compared it with conventional approaches. The results show that the proposed approach improves estimation reliability and performance.

Keywords: gas fields, resource assessment, simulation model, algorithm, filtration characteristics, data uncertainty, stochastic modeling.

Cite this article: Makarov A. V. A Stochastic Approach to Estimating Gas Field Resources under Input Data Uncertainty. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):126–131.

Original article submitted: 20.01.2026. *Revision submitted: 18.02.2026.*

Введение

Оценка ресурсов газовых месторождений представляет собой фундаментальную задачу в области нефтегазовой геологии и проектирования разработки месторождений [1–3]. Основная цель — определение потенциального количества углеводородов, которое может быть извлечено из недр с достаточной степенью экономической эффективности. Точность такой оценки напрямую влияет на стратегические решения: от обоснования инвестиций в разведку и обустройство до проектирования систем добычи и транспортировки газа [4]. Таким образом, ошибки на этапе оценки ресурсов могут привести к значительным финансовым потерям и нерациональному использованию недр.

Развитие стохастического подхода к оценке ресурсов газовых месторождений в условиях неопределенности исходных данных стало перспективным благодаря развитию информационных

и вычислительных технологий в самых различных сферах деятельности [5–9], а не только в газонефтяной отрасли [10–12].

Актуальность разработки совершенных методов оценки обусловлена возрастающей сложностью вводимых в разработку объектов. Новые месторождения часто характеризуются сложным геологическим строением, неоднородностью коллекторов, низкой проницаемостью и наличием зон с трудноизвлекаемыми запасами. Традиционные детерминистические подходы, такие как объемный метод, опирающиеся на усредненные значения параметров пласта, не способны адекватно учесть присущую этим параметрам природную изменчивость и стохастическую неопределенность. Использование единого «усредненного» набора данных маскирует реальные риски, что может привести как к излишнему оптимизму, так и к необоснованному пессимизму в оценках.

В связи с этим возникает необходимость в методах, которые не просто дают точечную оценку ресурсов, а позволяют количественно определить диапазон возможных значений и связанные с ними вероятности. Такой вероятностный подход обеспечивает более надежную основу для принятия управленческих решений в условиях риска. Данное исследование направлено на разработку именно такого метода, интегрирующего математическое моделирование фильтрационных процессов с алгоритмами статистического анализа для комплексной оценки ресурсов газовых месторождений с явным учетом неопределенностей [13].

В основе предлагаемого подхода лежит математическая модель фильтрации газа в пористой среде, базирующаяся на фундаментальных законах сохранения массы и состояния вещества. Для адекватного описания поведения реального газа в условиях изменяющихся пластовых давлений используется модифицированное уравнение фильтрации, учитывающее зависимость ключевых параметров от давления.

Основное дифференциальное уравнение [14], описывающее нестационарное распределение давления P в трехмерном пласте, может быть записано в следующем виде:

$$\operatorname{div}\left[\left(k\left(r\right)/\mu\left(P\right)\right)*\rho\left(P\right)*\operatorname{grad}\left(P\right)\right]=\partial/\partial t\left[\varphi\left(r\right)*\rho\left(P\right)\right]+Q\left(r,t\right),$$

где r — пространственная координата; t — время; $k\left(r\right)$ — абсолютная проницаемость пласта, являющаяся случайным полем, отражающим природную неоднородность коллектора; $\mu\left(P\right)$ — вязкость газа, зависящая от давления; $\rho\left(P\right)$ — плотность газа, рассчитываемая через уравнение состояния реального газа; $\varphi\left(r\right)$ — пористость, также представляемая как случайное поле; $Q\left(r,t\right)$ — функция источник/сток, моделирующая отбор или закачку газа через скважины.

Для учета неопределенностей геологического строения параметры $k\left(r\right)$ и $\varphi\left(r\right)$ задаются не едиными значениями, а своими статистическими характеристиками: математическими ожиданиями $M\left[k\right]$, $M\left[\varphi\right]$, дисперсиями $D\left[k\right]$, $D\left[\varphi\right]$ и пространственными корреляционными функциями. Это позволяет трансформировать детерминистическую модель в стохастическую.

Метод оценки ресурсов, построенный на данной модели, реализуется посредством специализированного алгоритма, который можно представить в виде последовательности вычислительных этапов.

Алгоритм оценки ресурсов:

1) Генерация ансамбля геологических реализаций представлена на рис. 1. На основе данных геофизических исследований скважин и сейсморазведки генерируется множество (ансамбль) равновероятных моделей пласта. Каждая модель представляет собой одну статистическую реализацию полей проницаемости $k\left(r\right)$ и пористости $\varphi\left(r\right)$, удовлетворяющую заданным статистическим характеристикам. Этот этап часто визуализируется как создание множества альтернативных «срезов» или «томограмм» пласта.

2) Динамическое моделирование. Для каждой сгенерированной геологической реализации производится численное решение уравнения фильтрации. В результате рассчитывается динамика изменения пластового давления и дебитов скважин во времени, что позволяет определить величину начальных извлекаемых ресурсов (G) для данной конкретной реализации модели.

3) Статистический анализ результатов. После обработки всего ансамбля моделей (несколько сотен или тысяч запусков) формируется итоговое распределение вероятностей для величины G. Анализируются его основные статистические моменты: математическое ожидание $M\left[G\right]$, дисперсия $D\left[G\right]$, а также строится доверительный интервал, например, $P10-P50-P90$. Значение $P90$

представляет собой консервативную оценку, указывающую, что с вероятностью 90% фактический результат окажется выше этой величины. Медианное значение $P50$ делит распределение пополам, означая равную вероятность как большего, так и меньшего итога. Оптимистичный сценарий $P10$ показывает, что с вероятностью 90% результат может оказаться ниже этого уровня, но с 10%-ной вероятностью его превысит. Таким образом, интервал от $P90$ до $P10$ наглядно отображает спектр геологической неопределенности, предоставляя специалистам не единое число, а обоснованный коридор для принятия решений, где $P90$ часто служит основой для подсчета запасов, а $P10$ отражает потенциальный ресурсный подъем. Этот вероятностный подход дает исчерпывающее представление как о базовом сценарии, так и о возможных отклонениях в обе стороны.

4) Анализ чувствительности. На данном этапе идентифицируются входные параметры модели (например, эффективная мощность пласта, проницаемость, начальное давление), которые вносят наибольший вклад в общую дисперсию $D[G]$ результата. Это позволяет оптимизировать программы дополнительных исследований, сфокусировавшись на сборе данных по наиболее влиятельным параметрам.

Критерием остановки вычислительного процесса является стабилизация статистических характеристик выходного распределения G при увеличении количества реализаций.

Апробация и результаты

Предложенный метод был апробирован на данных одного из месторождений Восточной Сибири [15]. Сравнение с традиционным объемным методом показало, что учет неопределенности приводит к расширению диапазона возможных значений извлекаемых ресурсов на 20-25%. В то время как объемный метод дал единственную оценку, стохастический подход позволил построить всю кривую распределения вероятностей. Это дало возможность количественно оценить риски: например, определить, что с вероятностью 90% ресурсы месторождения превышают значение $P90$ и с вероятностью 10% — значение $P10$. Значение $P90$ представляет собой консервативную оценку, указывающую, что с вероятностью 90% фактический результат окажется выше этой величины.

Анализ чувствительности выявил, что наибольшее влияние на конечный результат оказывает неопределенность в оценке эффективной мощности пласта и его проницаемости, в то время как влияние вариаций начального пластового давления оказалось менее значимым. Этот вывод имеет практическую ценность, так как указывает на приоритетность уточнения именно геометрической модели залежи и фильтрационно-емкостных свойств при проведении дальнейших геологоразведочных работ.

Представленный график (рис. 2) служит наглядным инструментом для комплексного анализа, раскрывая суть примененного стохастического подхода. Он не только демонстрирует принципиальное отличие между единственной цифрой, полученной по традиционной методологии, и целым спектром вероятностных сценариев, но и проясняет источники этой неопределенности. Визуализация позволяет сразу оценить, насколько шире становится диапазон возможных значений ресурсов при учете геологических рисков, а сопутствующий анализ чувствительности указывает на ключевые параметры, требующие первоочередного внимания в ходе дальнейших исследований. Такой объединенный формат презентации данных эффективно подчеркивает практическую ценность метода, трансформируя абстрактную статистику в конкретные ориентиры для принятия управленческих решений.

Визуализация объединяет ключевые выводы исследования в целостную картину. Левая часть графика демонстрирует принципиальное преимущество стохастического подхода над классическим объемным методом. Вместо единственной точечной оценки в 85 млн тонн новый метод раскрывает целый спектр вероятных сценариев — от консервативных 70 млн тонн ($P90$) до оптимистичных 105 млн тонн ($P10$). Ширина этого «коридора неопределенности», на 20–25% превышающего исходную оценку, количественно характеризует риск, присущий геологической модели месторождения. Правая часть диаграммы прямо указывает на источники этой неопределенности, ранжируя влияющие факторы: наибольший вклад вносят эффективная мощность пласта (45%) и его проницаемость (40%), тогда как начальное пластовое давление играет второстепенную роль (15%). Таким образом, график не только подтверждает, что вероятностная оценка дает более полное представление о ресурсах, но и определяет стратегические приоритеты для дальнейшего изучения недр, фокусируя внимание на уточнении геометрии залежи и фильтрационных свойств.

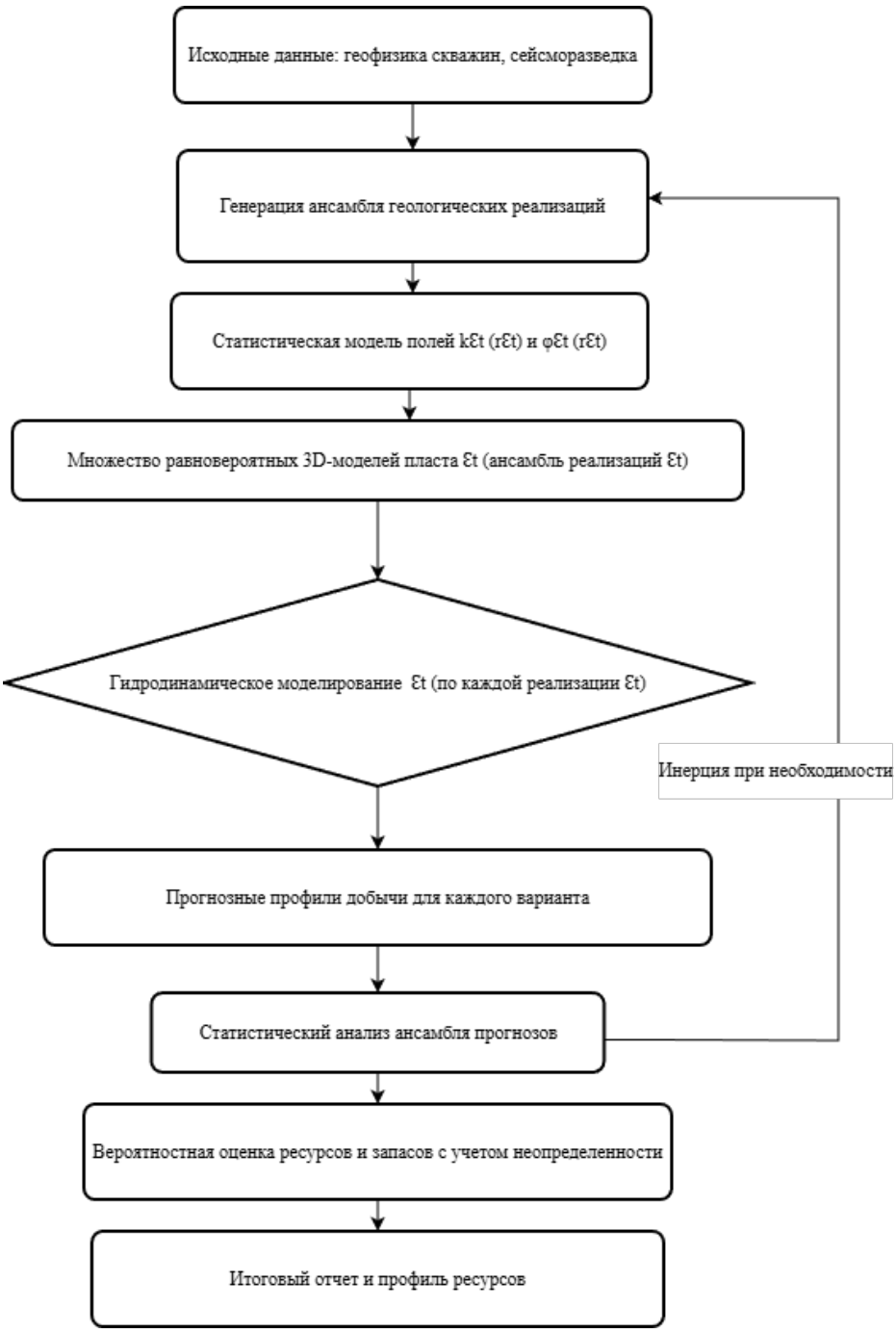


Рис. 1. *Блок-схема алгоритма оценки ресурсов*

Заключение

Разработанный подход предоставляет инструмент для более обоснованной и надежной оценки ресурсов газовых месторождений, явным образом учитывающий неопределенность исходной геологической и физической информации. Использование стохастического подхода позволяет перейти от точечных оценок к вероятностным, что критически важно для управления рисками при проектировании разработки и обосновании инвестиций. Полученные результаты демонстрируют практическую значимость предложенного подхода. Перспективы дальнейших исследований видятся в интеграции данного метода с алгоритмами машинного обучения для автоматизации процесса построения и калибровки геологических моделей, а также для ускорения ресурсоемких вычислений при динамическом моделировании.



Рис. 2. *Сравнение методов оценки ресурсов и анализ влияния факторов*

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А. В. Выбор критериев для оценки ресурсов нефтегазовых месторождений. *Наука и практика — 2023*: материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции. 2024:467–470. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=65063957&pff=1.
2. Макаров А. В. Целенаправленность критериев для оценки ресурсов нефтегазовых месторождений. *Наука и практика — 2023*: материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции. 2024:471–473. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=65063961&pff=1.
3. Макаров А. В., Шуршев В. Ф. Методы оценки ресурсов газовых месторождений. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*: *научно-технический журнал*. 2024;1:110–114. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-110-114.
4. Колотилов Ю. В., Шуршев В. Ф., Квятковская И. Ю. *Формализация задачи системного анализа: оценка риска эксплуатации объектов добычи и транспорта углеводородов*. М.: Известия; 2019. 160 с.
5. Гайрабекова Т. И., Шуршев В. Ф. Разработка и последовательность реализации компонентов системы информационно-аналитического обеспечения. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2023;4:104–108. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-104-108.
6. Хоменко Т. В., Шуршев В. Ф. Система интеллектуальной поддержки принятия решений на основе сверточной нейронной сети. *Информационные системы и технологии*. 2025;5:113–121. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=83048668.
7. Шуршев Т. В. Выбор средств разработки и проектирование интеллектуальной информационной системы на основе искусственного интеллекта. *Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского моря*: материалы XV Международной научно-практической конференции. 2024:312–315. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=70154713&pff=1.
8. Шуршев Т. В. Гибридные рекомендательные методы. *России — творческую молодежъ:* материалы XVIII Всероссийской научно-практической студенческой конференции. 2025;3:186–189. Режим доступа: https://new.kti.ru/docs/konf/studkonf2025/%D1%82%D0%BE%D0%BC_3.pdf.
9. Шуршев Т. В. Холодный старт в информационных аналитических системах. *Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития:* материалы Международной научно-практической конференции, проводимой в рамках Международного научно-практического форума «Инженерия 4.0 — 2025», посвященного 35-летию Российской инженерной академии. 2025:113–115. Режим доступа: https://iti.khsu.ru/files/science/IT-2025/inzhenernyie_texnologii_(2025).pdf.

10. Афанаскин И. В., Вольпин С. Г., Еникеев Б. Н., Ипатов А. И., Кременецкий М. И., Смирнов О. А., Федоров В. Н., Шагиев Р. Г., Шагиев Р. Р. Современное состояние исследований скважин и пластов нефтегазовых месторождений в России. *Актуальные проблемы нефти и газа.* 2022;2:45–86. DOI: https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art5.
11. Шуршев Т. В. Интеллектуальная поддержка принятия решений при распознавании дефектов сварных швов нефтяных трубопроводов. *Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2023):* материалы VII Международной научной конференции. 2023:178–179.
12. Chen Z. Reservoir Simulation: Mathematical Techniques in Oil Recovery. SIAM; 2008. 250 p.
13. Popov P. A. et al. Multiscale Modeling and Simulations of Flows in Naturally Fractured Karst Reservoirs. *Communications in Computational Physics.* 2009;6(1):162–184.
14. Lie K. A. *An Introduction to Reservoir Simulation Using MATLAB.* Cambridge University Press; 2019. 318 p. DOI: 10.1017/9781108591416.
15. Андронов С. А., Горенкова Е. А., Гомонов А. А., Максименко И. А. Подходы к выбору реализаций при вероятностном моделировании геологической модели и анализ влияния на прогнозный профиль добычи. *PROНЕФТЬ: Профессионально о нефти.* 2023;8(4):25–32.

СРАВНЕНИЕ АНСАМБЛЕВЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОКОНЧАНИЯ ПЕРИОДА ЗАМОРОЗКОВ

В. А. Солозобов[а], С. А. Лысенкова[б]
Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
[а] ✍ *solo.val.al@yandex.ru*
[б] *lsa1108@mail.ru*

Аннотация: в статье приводится сравнение результатов применения ансамблевых методов машинного обучения для решения задачи прогнозирования завершения периода заморозков. Дано краткое описание ансамблевых методов. Представлены результаты исследования зависимости влияния различных наборов гиперпараметров и входных данных на обучение оптимальной модели. Сделаны выводы о качестве получаемых моделей с помощью различных вариаций градиентного бустинга, случайного леса и линейной модели. В работе приведены результаты применения библиотек, реализующих методы машинного обучения: XGBoost, LightGBM, CatBoost, Random Forest (scikit-learn), логистическая регрессия.

Ключевые слова: ансамблевые методы машинного обучения, градиентный бустинг, период заморозков, прогноз заморозков, временные ряды.

Для цитирования: Солозобов В. А., Лысенкова С. А. Сравнение ансамблевых методов машинного обучения при решении задачи прогнозирования окончания периода заморозков. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):132–138.

Поступила в редакцию: 05.03.2026. *В окончательном варианте: 22.03.2026.*

COMPARISON OF ENSEMBLE MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING THE END OF THE FROST PERIOD

V. A. Solozobov[a], S. A. Lysenkova[b]
Surgut State University, Surgut, Russian Federation
[а] ✍ *solo.val.al@yandex.ru*
[б] *lsa1108@mail.ru*

Abstract: we studied the performance of ensemble machine learning methods for predicting the end of the frost period. We provided a brief overview of the considered ensemble approaches and investigated how different hyperparameter settings and input data configurations affect model training. We applied several tools, including gradient boosting methods (XGBoost, LightGBM, and CatBoost), random forest (scikit-learn), and logistic regression (scikit-learn), compared the resulting models, and assessed their predictive quality. The results show differences in performance across methods and highlight the impact of hyperparameter tuning and input data selection on prediction accuracy.

Keywords: ensemble machine learning methods, gradient boosting, frost period, frost prediction, time series.

Cite this article: Solozobov V. A., Lysenkova S. A. Comparison of Ensemble Machine Learning Methods for Predicting the End of the Frost Period. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):132–138.

Original article submitted: 05.03.2026. *Revision submitted: 22.03.2026.*

Постановка решаемой задачи

Решаемая в данной работе задача была описана ранее [1]. В кратком изложении она заключается в прогнозировании дня, после которого наступает устойчивая положительная температура в весенне-летний период. Сам прогноз планируется осуществлять каждый день, и тот день, когда модель выдаст высокую прогнозную вероятность окончания периода заморозков, будет означать, что наступил период стабильно положительной температуры и понижение ее ниже нуля не ожидается вплоть до осени. При этом модель будет решать задачу бинарной классификации временных рядов метеопараметров, где метка класса «1» относится к случаю, когда заморозки еще возможны, а «0» — к случаю, когда заморозков не ожидается вплоть до осени. Расчет прогноза модель

будет осуществлять на временных рядах различных метеопараметров. Ранее данная задача была решена с помощью логистической регрессии, в данном случае планируется использовать ансамблевые методы машинного обучения (МО) для того, чтобы увеличить точность прогнозирования. Также остаются вопросы выбора оптимального набора входных данных, то есть того, какие метеопараметры и какой длины временное окно требуются, чтобы получить наилучшую точность при обучении модели.

Целью исследования является решение задачи ансамблевыми методами машинного обучения и сравнение эффективности и качества получаемых моделей между собой, а также с теми, что получаются при использовании методов логистической регрессии.

В рамках исследования рассматривается использование библиотек, реализующих ансамблевые методы МО: XGBoost, LightGBM, CatBoost, Random Forest (scikit-learn). А также анализируется влияние признаков и их количества на метрики качества получаемых моделей.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучить особенности ансамблевых методов машинного обучения. Рассмотреть основные, широко используемые библиотеки, реализующие построение ансамблей, проанализировать отличительные характеристики, достоинства и недостатки.
2. Определить критерии качества, по которым будет происходить сравнение полученных моделей, подготовить варианты группировки входных данных, провести обучение моделей.
3. Провести сравнение полученных моделей, определить закономерности и влияние набора входных данных, выделить особенности. Сделать общий вывод по результатам исследования и определить дальнейшее направление по улучшению качества модели прогнозирования окончания периода заморозков.

Модель будет обучаться на метеорологических данных Сургутского района [2]. Данная задача весьма актуальна для данного региона из-за нестабильного весеннего периода и довольно сильного разброса дат последнего морозного дня весной от года к году. Для обучения модели были выбраны следующие метеопараметры [3]:

температура воздуха (градусы Цельсия) на высоте 2 метра над поверхностью земли (T);

атмосферное давление на уровне станции (миллиметры ртутного столба) (P);

относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли (H);

направление ветра (румбы) на высоте 10–12 метров над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период (Wd);

скорость ветра на высоте 10–12 метров над земной поверхностью, осредненная за 10-минутный период (метры в секунду) (Ws);

общая облачность (%) (Cp);

температура точки росы на высоте 2 метра над поверхностью земли (градусы Цельсия) (Dw).

Данные метеопараметры будут включены в обучающие выборки как отдельно, так и в различных комбинациях. Также обучающие выборки будут различаться по длине временного окна от 1 до 120 суток.

Одной из главных проблем при решении поставленной задачи является выбор признаков. Он определяется как метеопараметрами, которые включаются в обучающую выборку, так и длиной временного ряда. При этом увеличение количества признаков не всегда ведет к повышению качества прогноза. В зависимости от применяемых алгоритмов МО, часто выбор большого числа признаков приводит к нестабильным результатам прогнозирования, даже при учете переобучения моделей. Также происходит увеличение времени на обучение модели.

В данном исследовании поставлена задача изучить влияние длины временных рядов (временного окна) и участвующих метеопараметров на результативность обучения следующего ряда ансамблевых методов МО: XGBoost, LightGBM, CatBoost, Random Forest. Также в сравнении с ними будут участвовать модели, построенные методом логистической регрессии. Результативность обучения моделей будет оцениваться метрикой качества, определенной в работе [1]. Эта метрика показывает среднее количество общих ошибок модели, приходящихся на один год. Отбор моделей и гиперпараметров, таких как глубина деревьев, коэффициент скорости обучения модели и другие, будет проводиться по валидационной выборке. При этом будет происходить калибровка

порогового значения, разделяющего объекты на классы, таким образом, чтобы ложноотрицательная ошибка на обучающей и валидационной выборках была равна нулю. Это делается по причине критичности ошибки неверного прогноза наступления теплой погоды: ее следует привести к нулю. И уже по тестовой выборке будет происходить окончательная оценка откалиброванных моделей.

Описание ансамблевых методов машинного обучения

Одним из направлений развития методов машинного обучения (МО) можно назвать ансамблирование моделей, полученных методами МО. Ансамбль моделей подразумевает наличие некоторого множества базовых моделей (БМ), каждая из которых выдает свое решение по поводу поставленной общей задачи, после чего на основе полученного множества решений высчитывается конечный результат работы данного ансамбля. Важно отметить, что для получения ансамбля с высокими предсказательными качествами требуется сильное разнообразие базовых моделей [4]. Под разнообразием понимается различие признаков и зависимостей, которые описывают базовые модели.

Методы построения базовых моделей можно классифицировать по зависимости построения базовых моделей друг от друга [5]. Зависимое обучение базовых моделей обусловлено тем, что для получения новой БМ требуется получить результат обучения предыдущей БМ, то есть ансамбль приходится строить последовательно. При независимом обучении БМ возможно параллельное построение ансамбля, что позволяет ускорить данный процесс.

Основным методом, реализующим параллельный подход, является алгоритм случайного леса (Random Forest) [6]. В этом алгоритме при построении базовых деревьев, из которых состоит случайный лес, вводится случайный выбор набора признаков, по которым идет разделение в узле решающего дерева. За счет этого удается сильно увеличить разнообразие получаемых БМ. Следует выделить следующие преимущества алгоритма случайного леса: благодаря методу обучения сборки, случайные леса могут уменьшить дисперсию и повысить стабильность прогнозов по сравнению с моделями индивидуальной классификации, использование метода построения деревьев на разных и независимых подмножествах снижает проблему переобучения и улучшает способность к обобщению [7]. Алгоритм случайного леса хорошо работает с различными большими и сложными данными и демонстрирует хорошую способность справляться с пропущенными данными и помехами. Предоставляет оценку значимости признаков, позволяя пользователям определить наиболее важные признаки модели и понять относительное влияние каждого признака на результаты [8]. И все это с высокой скоростью обучения ансамбля и возможностью распараллеливания процесса.

Ярким примером последовательного обучения является подход градиентного бустинга, основанный на том, что каждая последующая обучаемая БМ исправляет ошибку всех БМ до нее. За счет этого разрешается также и проблема расчета итогового результата [9, 10]. Одной из первых успешных реализаций градиентного бустинга в машинном обучении можно назвать алгоритмы библиотеки XGBoost. Она представляет собой масштабируемые алгоритмы, используемые для задач классификации и регрессии с применением регуляризации, которая предотвращает переобучение [11]. Стоит отметить следующие преимущества XGBoost: способность обрабатывать пропущенные значения, возможность минимальной обработки признаков, таких как нормализация данных и масштабирование признаков.

Следующей известной библиотекой, реализующей алгоритмы градиентного бустинга, можно назвать LightGBM [12]. Она использует в качестве базовых моделей деревья решений и применяется, в основном, для задач классификации, ранжирования. Библиотека LightGBM отличается повышенной скоростью обучения и меньшими требованиями к памяти при обучении по сравнению с другими реализациями градиентного бустинга. Это преимущество достигается за счет ряда алгоритмических решений в области подготовки данных к обучению. Происходит исключение данных, которые не вносят большой вклад в градиент ошибки, часть данных сжимается, где это возможно без потери информации и где признаки носят зачастую нулевые значения [13]. Также свою роль играют алгоритмы бинаризации непрерывных величин у признаков. В свою очередь, эти манипуляции с обучающим набором могут приводить к переобучению на небольших наборах данных [12].

Еще одна успешная библиотека, реализующая алгоритмы градиентного бустинга, — это

CatBoost. Одним из главных нововведений CatBoost является его способность выполнять несмещенную оценку градиента, что снижает переобучение, а также упрощает конечную ансамблевую модель и ускоряет расчеты обученного ансамбля. Достигается это за счет симметрии выстраиваемых деревьев в базовых моделях. Заметным преимуществом библиотеки CatBoost являются алгоритмы автоматического преобразования категориальных признаков [14].

Можно отметить следующие общие свойства, характерные для библиотек, реализующих алгоритмы градиентного бустинга. По результату их применения есть возможность определить значимость признаков, что может быть использовано для их отбора. Каждая рассмотренная реализация градиентного бустинга позволяет избежать переобучения [9]: за счет скорости обучения, возможности обучаться на небольших выборках и с неоднородными данными. Градиентный бустинг получил широкое применение при работе с табличными данными [15, 16]. Есть положительные результаты использования данного метода при обучении на многомерных временных рядах [16].В результате проведенного обзора решено использовать ансамбли градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM, CatBoost) и Random Forest как представителя параллельного ансамбля. Данные реализации выбраны как имеющие хорошие показатели точности получаемых моделей и широкие возможности настройки обучения. Предлагается сравнить их работу при решении поставленной ранее задачи как между собой, так и с классическим линейным классификатором.

Результаты

В первую очередь, были получены метрики качества на моделях, построенных на данных, которые включали временной ряд только одного из метеопараметров (рис. 1). По ним можно сделать вывод о том, что, используя такие параметры, как температура или точка росы, достаточно размера временного окна в 10 дней. При этом модели имеют значения среднегодовой ошибки на уровне 10 и потом она уже незначительно снижается по мере увеличения временного окна. Это можно объяснить тем, что период заморозков и его окончание имеют непосредственное отношение к температуре воздуха и по тому, какой температурный режим был в последние 10–30 дней, уже можно судить о вероятности окончания периода заморозков. При этом увеличение временного окна для температуры до 2–3 месяцев уже не приносит ощутимого увеличения точности в прогнозирование, а даже мешает прогнозированию, внося свою долю шума, на которую приходится обращать внимание обучающим алгоритмам. В отличие от температуры и точки росы, обучение на других метеопараметрах требует временного окна не менее 60 дней и наименьший уровень ошибок достигается при дальнейшем его увеличении (рис. 1). То есть 1–2 месяцев данных недостаточно для получения точной модели по этим метеопараметрам. Третьим метеопараметром после температуры и точки росы по влиянию на точность получаемых моделей является относительная влажность, но, как было отмечено, для этого требуется временное окно не менее 60 дней (рис. 1). На одиночных параметрах хорошо себя показывают библиотеки, реализующие градиентный бустинг. XGBoost и LightGBM показывают схожесть по точности получаемых моделей. CatBoost при этом обучает модели, схожие по качеству как с XGBoost, так и с Random Forest.

У Random Forest, в свою очередь, получаются более хорошие результаты, чем у других методов, на метеопараметрах: температура, сила ветра, направление ветра. Логистическая регрессия показывает себя хуже, особенно тяжело по сравнению с другими дается прогноз по давлению и проценту облачности.

Следующим этапом было сравнение моделей, обученных на полном наборе метеопараметров, с обученными на одном временном ряду температуры и добавление к нему других метеопараметров поочередно (рис. 2).

Линейная модель довольно ярко иллюстрирует, как добавление каждого нового параметра приводит к уменьшению ошибки, но это происходит только при временных окнах до 40 дней. При этом наилучшие показатели у небольшого набора из 4 метеопараметров. После отметки в 40 дней происходит рост средней ошибки, при этом наибольшее ухудшение у моделей с большим числом метеопараметров. Подобное наблюдается и у ансамбля Random Forest. Что касается ансамблей градиентного бустинга, то влияние количества метеопараметров незначительно сказывается на ошибке модели. Но важно отметить, что модели, обученные на среднем наборе метеопараметров (3–4), все же выше по точности, чем построенные на одном метеопараметре или на всех сразу. При

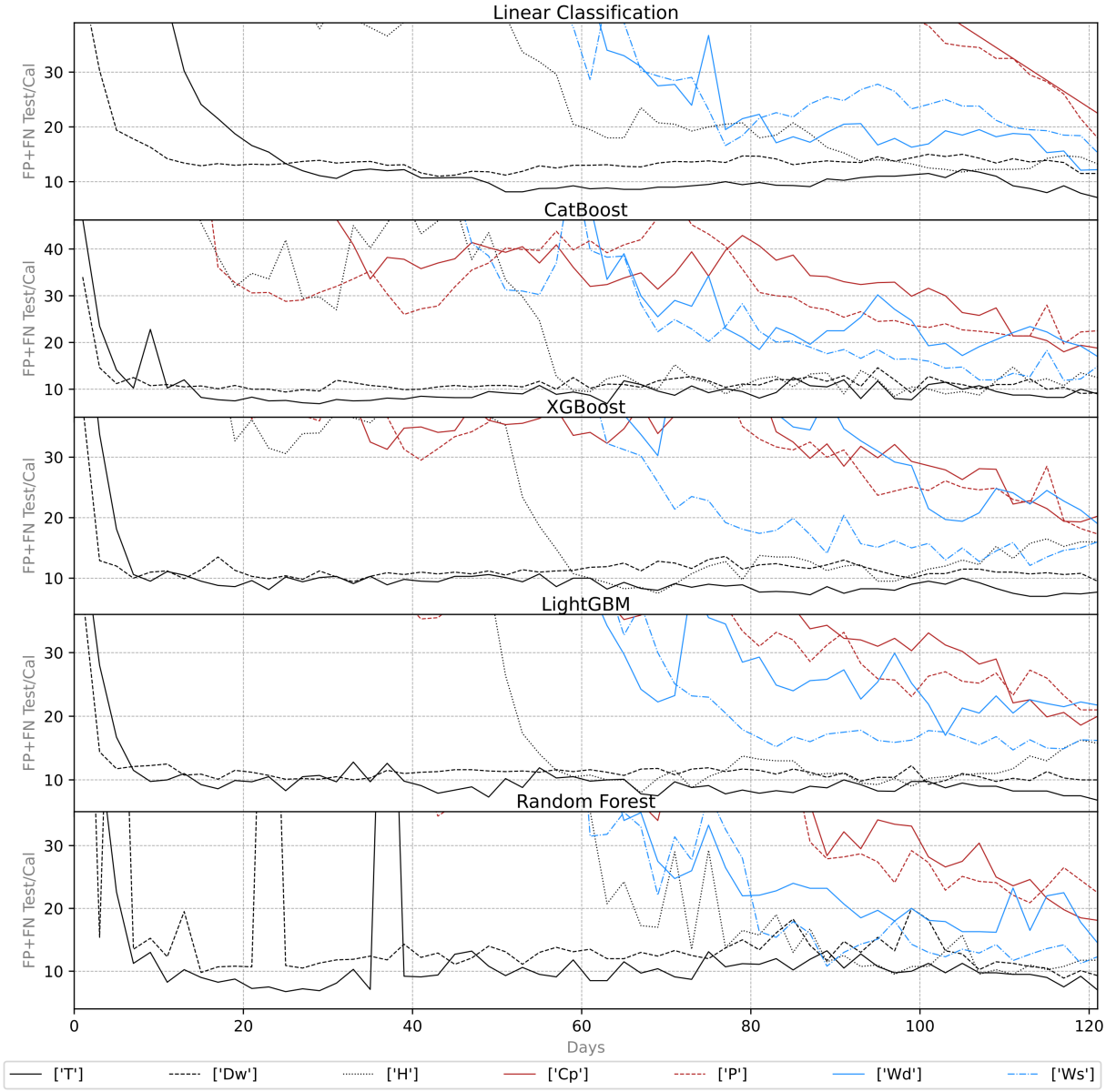


Рис. 1. *Сравнение графиков влияния одиночных признаков и величины временного окна на метрику качества моделей, получаемых различными МО. FP+FN Test/Cal — общая среднегодовая ошибка по тестовой выборке после калибровки порогового значения. T — температура воздуха; P — давление воздуха; Dw — точка росы; Cp — процент облачности; Ws — скорость ветра; Wd — направление и скорость ветра; H — относительная влажность воздуха*

этом линейная модель в итоге получается с самой низкой ошибкой (FN + FP = 4,5), за ней идет по результативности алгоритм Random Forest. То есть с помощью логистической регрессии удается получить наилучший результат. Но для этого результата требуются определенные условия: 30-40 дней временное окно и набор метеопараметров (T, Wd, Cp, H). При других конфигурациях обучающей выборки логистическая регрессия дает результаты хуже ансамблевых. Из ансамблевых методов можно отметить два: XGBoost и CatBoost. Они дают стабильные результаты и, в среднем, более низкую ошибку, чем другие.

Заключение

В результате работы была получена модель с прогнозной среднегодовой ошибкой, равной 4,5. Но получена она методами логистической регрессии. Наилучшие результаты по методам МО получились следующие: Random Forest — 5,25, CatBoost — 5,7, XGBoost — 5,9, LightGBM — 6,4.

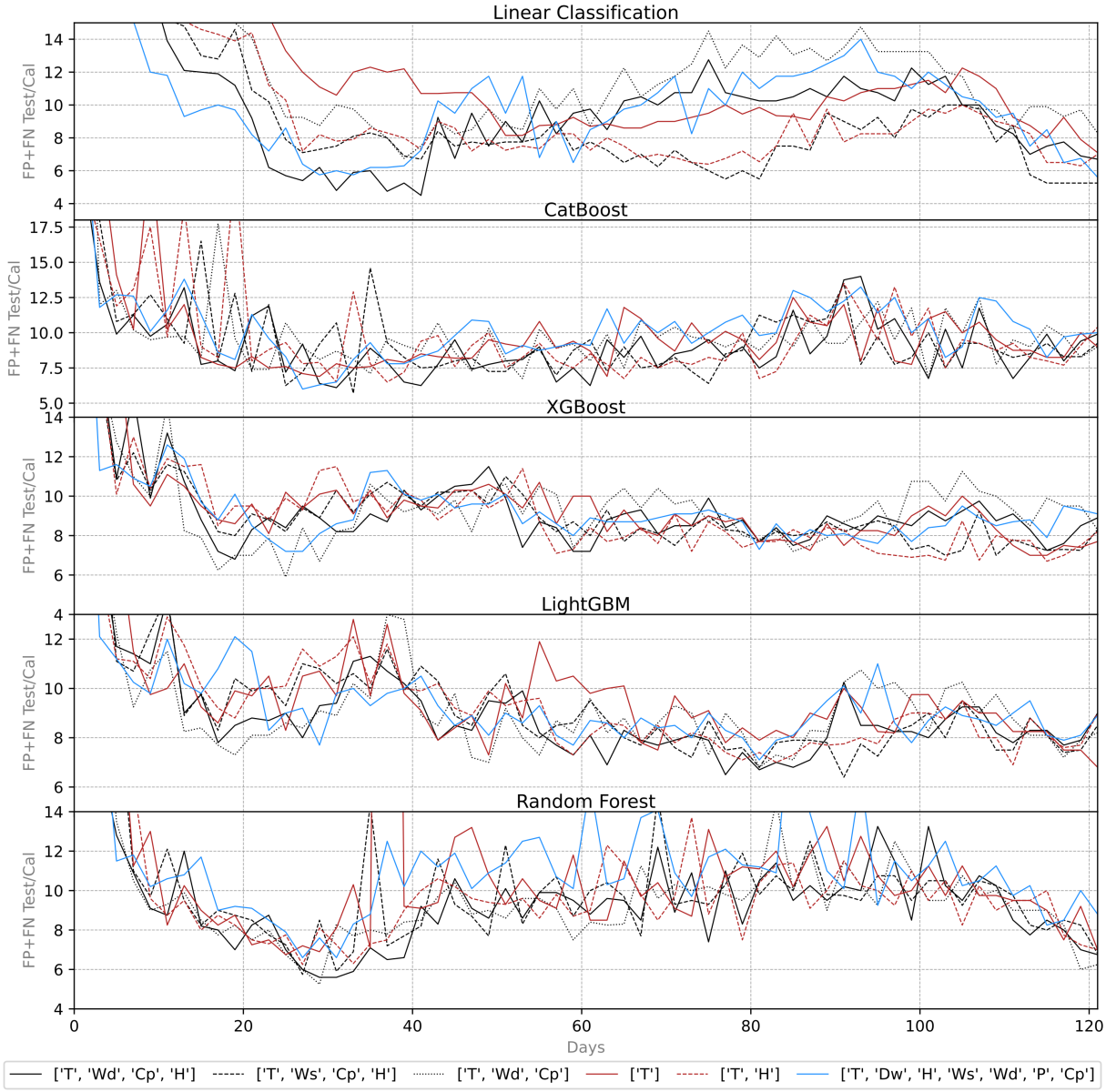


Рис. 2. *Сравнение графиков влияния различных наборов признаков и величины временного окна на метрику качества моделей, получаемых различными МО. FP+FN Test/Cal — общая среднегодовая ошибка по тестовой выборке после калибровки порогового значения. T — температура воздуха; P — давление воздуха; Dw — точка росы; Cp — процент облачности; Ws — скорость ветра; Wd — направление и скорость ветра; H — относительная влажность воздуха*

Это не значит, что ансамблевые методы хуже, они дают более стабильный результат на большем диапазоне возможных вариантов подготовки обучающей выборки, чем логистическая регрессия. Стоит также отметить закономерность для всех методов МО, используемых в данной работе: наиболее точные модели получаются при обучающей выборке, состоящей из следующих метеопараметров: T, Wd, Cp, H, и в диапазоне временного окна от 20 до 40 суток, также наблюдается качественное уменьшение ошибок моделей, полученных при временном окне в диапазоне 110–120 суток.

По данному результату можно сделать следующие выводы. Добавление новых метеопараметров в обучающую выборку приводит к серьезному увеличению объема входных данных, что приводит к некоторому роду зашумленности данных, и зависимости, которые выявлялись ранее, перестают определяться: они теряются на фоне других вероятных признаков. При этом добавление нового временного ряда, в котором явно есть признаки, по которым можно прогнозировать

окончание периода заморозков, не приносит уменьшения ошибки. Поэтому следует решить проблему избыточности данных. Для признаков температуры и точки росы можно, начиная с длины временного окна в 30 дней, уже использовать не все замеры, а усредненные по суткам, возможно, с учетом минимальных и максимальных значений. Другие метеопараметры, вероятно, совсем не требуют такого количества замеров, и усреднение может производиться за 5–10 дней. Также серьезное сокращение входных данных можно получить за счет приобретения новых признаков на основе имеющихся, заменяя их таким образом.

В районе значений временного окна, равных 120 дням, заметна тенденция к уменьшению ошибки. Возможно, следует в обучающую выборку добавить информацию за период прошлой осени – начала зимы, в ней могут быть признаки окончания периода заморозков.

Еще одним выходом из ситуации большого числа признаков может быть метод построения ансамбля из ансамблей. При этом каждый базовый ансамбль обучается на своем одном метеопараметре и со своим временным окном. Далее результаты работы этих ансамблей будут агрегироваться в простейшем варианте логистической регрессией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солозобов В. А., Лысенкова С. А. Методика оценки и выбора оптимальной модели, прогнозирующей окончание периода заморозков. *Успехи кибернетики.* 2025;6(2):100–107. EDN: WKIVRC.
2. *Архив метеоданных.* Режим доступа: https://rp5.ru/.
3. Рубан А. А., Белогубова А. А. Прогнозирование выручки предприятий общественного питания с использованием прогноза погоды. *Финансовый вестник.* 2025;1:20–25. EDN: VFGNRG.
4. Rokach L. Ensemble-Based Classifiers. *Artificial Intelligence Review.* 2010;33(1):1–39. DOI: 10.1007/s10462-009-9124-7.
5. Yang Y., Lv H., Chen N. A Survey on Ensemble Learning under the Era of Deep Learning. *Artificial Intelligence Review.* 2023;56:5545–5589. DOI: 10.1007/s10462-022-10283-5.
6. Schonlau M., Zou R. Y. The Random Forest Algorithm for Statistical Learning. *The Stata Journal.* 2020;20(1):3–29. DOI: 10.1177/1536867X20909688.
7. Biau G., Scornet E. A Random Forest Guided Tour. *Test.* 2016;25(2):197–227. DOI: 10.1007/s11749-016-0481-7.
8. Salman H. A., Kalakech A., Steiti A. Random Forest Algorithm Overview. *Babylonian Journal of Machine Learning.* 2024;2024:69–79. DOI: 10.58496/BJML/2024/007.
9. Natekin A., Knoll A. Gradient Boosting Machines, a Tutorial. *Frontiers in Neurorobotics.* 2013;7:21. DOI: 10.3389/fnbot.2013.00021.
10. Bentéjac C., Csörgő A., Martínez-Muñoz G. A Comparative Analysis of Gradient Boosting Algorithms. *Artificial Intelligence Review.* 2021;54(3):1937–1967. DOI: 10.1007/s10462-020-09896-5.
11. Chen T., Guestrin C. Xgboost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIKGDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.* 2016:785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
12. Ke G. et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. *Advances in Neural Information Processing Systems.* 2017:30.
13. Zhang Y., Liu J., Shen W. A Review of Ensemble Learning Algorithms Used in Remote Sensing Applications. *Applied Sciences.* 2022;12(17):8654. DOI: 10.3390/app12178654.
14. Prokhorenkova L. et al. CatBoost: Unbiased Boosting with Categorical Features. *Advances in Neural Information Processing Systems.* 2018:31.
15. Hancock J. T., Khoshgoftaar T. M. CatBoost for Big Data: an Interdisciplinary Review. *J Big Data.* 2020;7:94. DOI: 10.1186/s40537-020-00369-8.
16. Jiang J. et al. Boosting Tree-Assisted Multitask Deep Learning for Small Scientific Satasets. *Journal of Chemical Information and Modeling.* 2020;60(3):1235–1244. DOI: 10.1021/acs.jcim.9b01184.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Э. Г. Тунян[1,2,а], **Р. С. Сазиков**[1,2,3,б], **Т. В. Гавриленко**[1,3,в]

[1] *Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*

[2] *ООО «ЕДРО», г. Сургут, Российская Федерация*

[3] *Сургутский филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация*

[а] *ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3260-1310, ✍ tunyan@edro.su*

[б] *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0078-0013, sazikov@edro.su*

[в] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3243-2751, taras.gavrilenko@gmail.com*

Аннотация: работа посвящена задаче классификации временных рядов с использованием методов глубокого обучения, однако исходный сигнал здесь не обрабатывается напрямую. Сначала его переводят в двумерное представление — через рекуррентные диаграммы, которые фиксируют, когда система возвращается в схожие состояния и насколько часто это происходит. Такой шаг не всегда выглядит очевидным, но на практике упрощает дальнейшую обработку, после него ряд можно рассматривать как изображение и применять сверточные сети. Архитектура при этом остается достаточно стандартной: несколько сверточных слоев, затем подвыборка для уменьшения размерности и полносвязная часть, где формируется итоговое решение. Признаки заранее не задаются, они формируются в процессе обучения, хотя итог сильно зависит от того, насколько удачно выбрано само представление сигнала.

Ключевые слова: временные ряды, классификация, сверточные нейронные сети, глубокое обучение, рекуррентные диаграммы, преобразование данных, распознавание образов, извлечение признаков, машинное обучение.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Тунян Э. Г., Сазиков Р. С., Гавриленко Т. В. Классификация изображений временных рядов с использованием глубоких сверточных нейронных сетей. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):139–145.

Поступила в редакцию: 25.04.2026. *В окончательном варианте: 15.05.2026.*

TIME SERIES CLASSIFICATION USING RECURRENCE PLOTS AND DEEP CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

E. G. Tunyan[1,2,a], **R. S. Sazikov**[1,2,3,b], **T. V. Gavrilenko**[1,3,c]

[1] *Surgut State University, Surgut, Russian Federation*

[2] *EDRO, OOO, Surgut, Russian Federation*

[3] *Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre "Kurchatov Institute", Surgut, Russian Federation*

[a] *ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3260-1310, ✍ tunyan@edro.su*

[b] *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0078-0013, sazikov@edro.su*

[c] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3243-2751, taras.gavrilenko@gmail.com*

Abstract: we addressed the problem of time series classification using deep learning methods, where the raw signal is not processed directly. We first transformed the one-dimensional signal into a two-dimensional representation using recurrence plots, which capture when the system revisits similar states and how frequently these returns occur. This transformation is not always intuitive, but it simplifies subsequent processing, since the resulting representation can be treated as an image and processed using convolutional neural networks. We used a standard convolutional architecture consisting of several convolutional layers, followed by pooling layers for dimensionality reduction and a fully

connected layer that produces the final prediction. The model does not rely on manually designed features, as features are learned during training. However, the final performance strongly depends on how well the chosen signal representation preserves the relevant structure of the original time series.

Keywords: time series, classification, convolutional neural networks, deep learning, recurrent diagrams, data transformation, pattern recognition, feature extraction, machine learning.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the NRC "Kurchatov Institute" – SRISA, project No. 1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Tunyan E. G., Sazikov R. S., Gavrilenko T. V. Time Series Classification Using Recurrence Plots and Deep Convolutional Neural Networks. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):139–145.

Original article submitted: 25.04.2026. *Revision submitted: 15.05.2026.*

Введение

Временной ряд обычно понимается как упорядоченная во времени последовательность наблюдений, где сама временная структура играет определяющую роль, а не просто служит фоном. Подобные данные встречаются в самых разных прикладных областях – от биомедицинских сигналов (ЭЭГ, ЭКГ) до финансовых показателей, промышленных сенсоров и биометрии. Сюда же можно отнести анализ видео, музыки и задачи прогноза, включая погодные. Соответственно, спектр задач достаточно широк: аппроксимация, прогнозирование, сегментация, классификация и кластеризация. В простейшем случае классификации каждой последовательности фиксированной длины сопоставляется метка класса, хотя используемые методы нередко переносятся и на смежные задачи – не всегда без дополнительных оговорок [1].

Подходы к классификации временных рядов обычно различают либо по типу признаков (временная или частотная область), либо по стратегии работы с данными. В последнем случае выделяют методы, основанные на сравнении с примерами из обучающей выборки (например, метод k-ближайших соседей или Dynamic Time Warping), и методы, использующие предварительное извлечение признаков с последующей классификацией. Первые просты и интуитивны, но могут страдать от проблем масштабируемости, вторые – более гибкие, хотя требуют аккуратного выбора представления. В последние годы усилился интерес к глубокому обучению, где признаки формируются автоматически. Особенно это касается сверточных нейронных сетей. Их успешность в задачах компьютерного зрения известна, однако при работе с временными рядами такие модели требуют более осторожного применения и, по сути, все еще находятся в стадии активного осмысления [2].

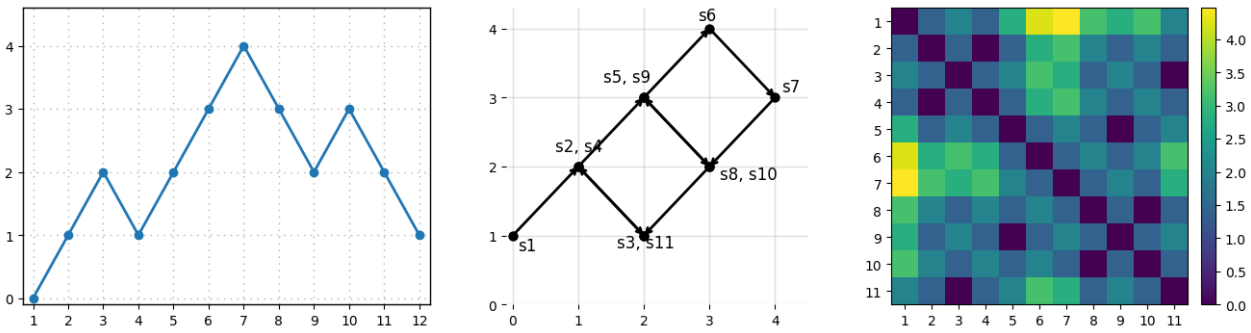


Рис. 1. *Преобразование временного ряда в рекуррентную диаграмму (исходный сигнал, фазовое пространство, матрица расстояний) (составлено авторами на основе экспериментальных данных*

На рисунке 1 фактически показан весь переход от исходного временного ряда к его рекуррентной форме, хотя читается это не сразу. Слева – простой сигнал xxx из 12 точек. На первый взгляд, он выглядит почти тривиально, но, если присмотреться, там уже есть повторяющиеся фрагменты, просто они «размазаны» по оси времени. Дальше ряд начинают развора-

чивать в фазовое пространство с задержкой ($\tau = 1$), берутся пары соседних значений, то есть $s_1 = (x_1,x_2)$, $s_2 = (x_2,x_3)$, … , $s_{11} = (x_{11},x_{12})$. В итоге получается набор точек на плоскости – траектория, пусть и в самой простой размерности, но она уже ведет себя иначе, чем исходный график. После этого вводится матрица R, размером 11×11: берутся все полученные состояния и просто сравниваются попарно через расстояние $R_{ij} = dist(s_i,s_j)$. Сначала это выглядит довольно формально – таблица и таблица, ничего особенного. Но потом начинает проявляться структура: похожие состояния оказываются рядом, и за счет этого видны повторения, которые в исходном ряду как-то терялись. Причем сам сигнал при этом не меняется, только способ записи – но этого оказывается достаточно, чтобы картина воспринималась иначе [3].

Сверточные сети здесь появляются не случайно, с ними обычно не приходится отдельно разбираться, какие признаки вытаскивать из данных. В случае CNN все это смешано в одном процессе, и сеть сама постепенно подстраивается под вход. Архитектура при этом собирается из повторяющихся частей – свертка, затем уменьшение размерности, дальше нелинейность. Нормализация добавляется не всегда и зависит от конкретной реализации. Часто на первых слоях сеть ловит более простые зависимости, а дальше – более сложные, но в реальной модели это не так четко разделено, и граница между ними скорее угадывается, чем действительно фиксируется [4].

В рамках данного исследования рассматривается сочетание рекуррентных диаграмм (RP) и CNN для классификации временных рядов. RP позволяет отразить повторяемость состояний траектории в фазовом пространстве в виде двумерного представления. Несмотря на неочевидность такого преобразования, оно оказывается полезным: временные ряды переводятся в изображения, и задача сводится к распознаванию текстур. Для этого используется CNN с двумя скрытыми слоями и последующим полносвязным слоем – конфигурация, выбранная как разумный баланс между сложностью модели и ее выразительностью [5].

Материалы и методы

В разделе кратко рассматриваются работы по применению глубокого обучения к классификации временных рядов. Еще недавно такие подходы оставались на периферии, но интерес к ним заметно вырос, хотя единых решений пока нет. Можно выделить два направления: либо CNN адаптируют под одномерные сигналы, либо временные ряды сначала переводят в изображения и затем обрабатывают привычными методами компьютерного зрения. Первый вариант реализуется, например, в моделях типа TDNN, но их глубины часто недостаточно для извлечения сложных зависимостей. Во втором случае применяются более мощные архитектуры, иногда даже с обучением в частотной области – решение, которое не всегда выглядит очевидным [6].

Существуют и промежуточные подходы: многоканальные сети для многомерных данных, предварительный отбор признаков, переход к представлению «время–частота», а также многомасштабные модели, где признаки извлекаются на разных уровнях. В задачах анализа активности данные нередко разбиваются на сегменты и подаются как изображения – при всей условности такой схемы она работает. В предлагаемом подходе это разделение снимается: признаки и классификация обучаются совместно, что, по имеющимся результатам, дает более устойчивое качество [7].



Рис. 2. *Архитектура сверточной нейронной сети для классификации временных рядов (преобразование сигнала в изображение и последовательность слоев CNN) (составлено авторами на основе разработанной модели)*

На рисунке 2 представлена используемая двухэтапная архитектура CNN для классификации временных рядов. Рекуррентные диаграммы предварительно масштабируются до размеров 28×28, 56×56 или 64×64 (в зависимости от конкретного набора данных) и подаются на вход сети. Архитектура, обозначаемая как 32(5)-2-32(5)-2-125-c, включает два сверточных слоя, два слоя подвыборки и два полносвязных слоя. Подобная конфигурация, несмотря на свою относительную компактность, демонстрирует достаточную выразительную способность, хотя вопрос о ее оптимальности остается открытым [8].

Для временных рядов довольно типична ситуация, когда одни и те же состояния со временем повторяются. Часто встречаются более сложные, нерегулярные циклы, которые по самому ряду уловить непросто. Такая повторяемость обычно связывается с поведением динамических, в том числе нелинейных, систем или стохастических процессов, из которых и формируются наблюдаемые сигналы. Рекуррентные диаграммы (Recurrence Plots, RP) используют именно эту особенность: траектория, заданная в фазовом пространстве размерности m, отображается на плоскость, и за счет этого становятся заметны возвраты в близкие состояния. Идея здесь достаточно прямая: фиксируются моменты, когда система оказывается рядом с уже пройденными точками, – хотя в явном виде это задается формально следующим образом [9]:

$$R_{ij} = \theta(\varepsilon - ||s_i - s_j||,\ s(\cdot)\ \varepsilon\ R^m,\ i,j = 1,\ \ldots,K$$

где:

K обозначает число рассматриваемых состояний;

$||\cdot||$ – порог расстояния;

$\theta(\cdot)$ – выбранная норма;

R – функция Хевисайда.

На этом этапе уже начинает сказываться выбор параметров, причем не всегда понятно сразу, в какую сторону. Та же матрица R может выглядеть по-разному: иногда проступают линии, иногда почти ничего, кроме отдельных точек. По таким рисункам обычно пытаются что-то сказать о поведении системы, но это не всегда работает одинаково. Ослабление структуры к краям часто принимают за признак тренда, вертикальные или горизонтальные участки – за медленное изменение состояния. Хотя это зависит от настроек сильнее, чем хотелось бы: при небольшом сдвиге параметров картина меняется, и прежнее объяснение уже не выглядит таким очевидным [10].

На рисунке 1 показан простой пример. Сначала ряд разворачивается в фазовое пространство при $m = 2$, затем для полученных состояний считается матрица R – фактически попарные расстояния между точками. Если вводить порог, она становится бинарной (0 и 1), что удобно, но часть информации при этом теряется: различия между близкими состояниями сглаживаются, и это иногда сказывается на дальнейшей обработке [11]. В рамках метода классификации временных рядов с использованием CNN от жесткой бинаризации отказываются, переходя к полутоновым текстурным изображениям на основе R. Эти изображения используются как вход для модели: исходные одномерные ряды x_n преобразуются в двумерные рекуррентные структуры, после чего признаки и классификатор обучаются совместно в рамках CNN [12].

На рисунке 3 иллюстрируется применение рекуррентных диаграмм с параметрами ($m = 3$, $\tau = 4$) для кодирования временных рядов в виде изображений на примере пяти наборов данных из архива UCR Time Series Archive (50words, TwoPatterns, FaceAll, OliveOil и Yoga). Уже на уровне визуального анализа можно заметить различия в текстурных характеристиках, хотя их формализация требует более строгих методов [13].

Операция подвыборки (pooling) используется для уменьшения размерности карт признаков, но этим ее роль не ограничивается. При агрегации значений в локальных областях часть деталей неизбежно теряется, зато представление становится более устойчивым к небольшим изменениям во входных данных – сдвигам, шуму, локальным искажениям. Визуально это часто выглядит как некоторое «сглаживание» структуры: резкие различия ослабляются, остаются более крупные элементы. В ряде задач это оказывается полезным, хотя при слишком агрессивной подвыборке можно, наоборот, потерять значимую информацию [14].

После завершения двух этапов извлечения признаков полученные карты уже не обрабатываются как двумерные структуры – их разворачивают в вектор и передают дальше. На этом

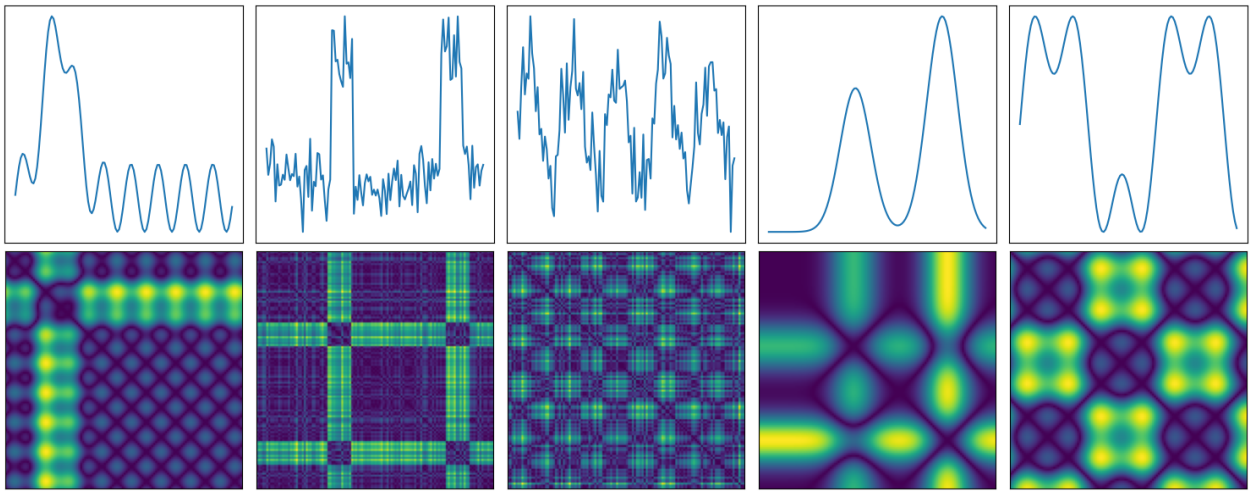


Рис. 3. *Преобразование временных рядов в рекуррентные диаграммы для различных наборов данных (составлено авторами на основе экспериментальных данных)*

этапе в работу вступает полносвязный слой, где каждый нейрон связан со всеми входами. Такая схема во многом напоминает классический многослойный перцептрон, но здесь она играет скорее завершающую роль: именно здесь происходит разделение по классам.

Обучение модели велось итерационно. Сначала для текущих данных считается выход сети (feedforward – то есть обычный проход от входа к выходу), затем по разнице между предсказанием и правильным ответом корректируются веса [15]. Ошибка не просто фиксируется, а распространяется обратно через слои (backpropagation), из-за чего становится понятно, какие параметры сильнее влияют на итог. На практике эти шаги идут один за другим и не всегда ощущаются как строго разделенные этапы [16].

Результаты

Для оценки эффективности предложенного подхода использован архив UCR Time Series Archive, который часто применяется при сравнении методов классификации временных рядов. Он включает 85 наборов данных, заметно различающихся по размеру и по типу сигналов – от относительно простых до более сложных и шумных. За счет этого можно проверить поведение метода на разных задачах, хотя итоговые результаты, естественно, зависят от того, какие именно наборы выбраны для экспериментов. В данной работе использована выборка из 20 датасетов. Такой набор встречается в ряде работ и позволяет сопоставлять полученные результаты без дополнительных преобразований [17].

В архиве обучающие и тестовые выборки заданы заранее, что упрощает сопоставление результатов с другими работами.

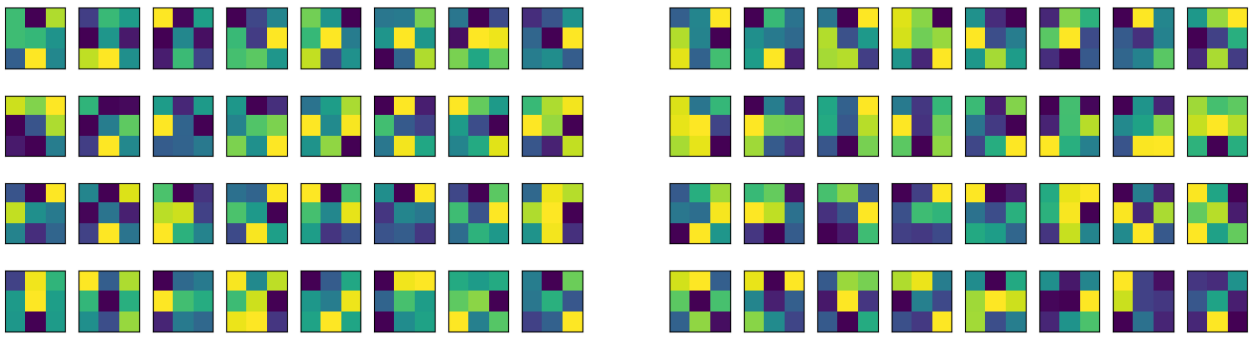


Рис. 4. *Визуализация фильтров сверточных слоев CNN для набора данных TwoPattern(составлено авторами на основании результатов обучения модели)*

Экспериментальная часть реализована на языке Python с использованием библиотек

Keras, Theano и TensorFlow. Вычисления проводились на системе с процессором 2.4 GHz × 32 и объемом оперативной памяти 32 ГБ. Архитектура CNN требует фиксированного размера входных данных, в связи с чем изображения масштабируются до 28×28, 56×56 или 64×64 пикселей – в зависимости от конкретного набора. Каждая из двух сверточных стадий включает 32 карты признаков с ядрами 3×3, операцию подвыборки 2×2 и Dropout с коэффициентом 0.25. Полносвязный слой содержит 128 скрытых нейронов и C выходных, при $Dropout = 0.5$. В стандартной нотации архитектура может быть записана как $C_1(size) - S_1 - C_2(size) - S_2 - H - O$ [18].

В качестве функции потерь используется categorical cross-entropy, оптимизация осуществляется с помощью алгоритма Adam. Размеры пакетов и число эпох подбираются из дискретных множеств {5, 20} и {50, 250, 1000, 2000} соответственно, исходя из поведения на валидационной выборке. Параметрическая настройка сети, как известно, остается задачей с открытым финалом. В рассматриваемом случае выбор значений опирается, скорее, на эмпирические соображения, чем на строгую процедуру оптимизации. Визуализация фильтров первых двух слоев для набора TwoPattern приведена на рисунке 4 – и здесь можно наблюдать формирование характерных текстурных паттернов, хотя их интерпретация не всегда однозначна.

Заключение

В основе рассматриваемого подхода лежит использование рекуррентных диаграмм совместно со сверточными нейронными сетями. Временные ряды при этом не анализируются напрямую: исходный сигнал представляется в виде изображения (RP), где становятся различимы повторяющиеся участки и особенности взаимного расположения состояний. Такое представление отличается от исходной формы сигнала и по-другому отражает его структуру. Полученные изображения далее обрабатываются глубокой CNN, которая выделяет характерные визуальные элементы и использует их при решении задачи классификации.

Ключевых моментов здесь, по сути, два. С одной стороны, RP-представление фиксирует свойства траектории в m-мерном фазовом пространстве в удобной двумерной форме. С другой – CNN объединяет извлечение признаков и классификацию в рамках одной модели, причем сами представления формируются автоматически и под задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fu T.-C. A Review on Time Series Data Mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2011;24(1):164–181. DOI: 10.1016/j.engappai.2010.09.007.
2. Ismail Fawaz H., Forestier G., Weber J., Idoumghar L., Muller P.-A. Deep Learning for Time Series Classification: A Review. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2019;33:917–963. DOI: 10.1007/s10618-019-00619-1.
3. Takens F. Detecting Strange Attractors in Turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*. Berlin: Springer; 1981;898:366–381. DOI: 10.1007/BFb0091924.
4. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning. *Nature*. 2015;521(7553):436–444. DOI: 10.1038/nature14539.
5. Mathunjwa B. M., Lin Y.-T., Lin C.-H. et al. ECG Arrhythmia Classification by Using a Recurrence Plot and Convolutional Neural Network. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2021;64:102262. DOI: 10.1016/j.bspc.2020.102262.
6. Waibel A., Hanazawa T., Hinton G., Shikano K., Lang K. J. Phoneme Recognition Using Time-Delay Neural Networks. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1989;37(3):328–339. DOI: 10.1109/29.21701.
7. Wang Z., Oates T. Encoding Time Series as Images for Visual Inspection and Classification Using Tiled Convolutional Neural Networks. *AAAI Workshop on Artificial Intelligence for Data Science*. 2015.
8. Hatami N., Gavet Y., Debayle J. Classification of Time-Series Images Using Deep Convolutional Neural Networks. 2017. arXiv:1710.00886. DOI: 10.48550/arXiv.1710.00886.
9. Marwan N., Romano M. C., Thiel M., Kurths J. Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems. *Physics Reports*. 2007;438(5–6):237–329. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.11.001.

10. Webber C. L., Zbilut J. P. Dynamical Assessment of Physiological Systems and States Using Recurrence Plot Strategies. *Journal of Applied Physiology*. 1994;76(2):965–973. DOI: 10.1152/jappl.1994.76.2.965.
11. Eckmann J.-P., Kamphorst S. O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters*. 1987;4(9):973–977. DOI: 10.1209/0295-5075/4/9/004.
12. Sipers A., Borm P., Peeters R. Robust Reconstruction of a Signal from Its Unthresholded Recurrence Plot Subject to Disturbances. *Physics Letters A*. 2017;381(6):604–615. DOI: 10.1016/j.physleta.2016.12.028.
13. Dau H. A., Bagnall A., Kamgar K. et al. The UCR Time Series Archive. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2019;6(6):1293–1305. DOI: 10.1109/JAS.2019.1911747.
14. Scherer D., Muller A., Behnke S. Evaluation of Pooling Operations in Convolutional Architectures for Object Recognition. *Artificial Neural Networks – ICANN 2010*. Berlin: Springer; 2010:92–101. DOI: 10.1007/978-3-642-15825-4_10.
15. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning Representations by Back-Propagating Errors. *Nature*. 1986;323(6088):533–536. DOI: 10.1038/323533a0.
16. Werbos P. J. *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences:* PhD thesis. Cambridge: Harvard University; 1974.
17. Chen Y., Keogh E., Hu B. et al. *The UCR Time Series Classification Archive*. Riverside: University of California; 2015. Режим доступа: https://www.cs.ucr.edu/∼eamonn/time_series_data/.
18. Chollet F. Keras. *GitHub*. 2015. Режим доступа: https://github.com/keras-team/keras.

КЛАССИФИКАЦИЯ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОЛНОТЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СУРГУТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА В КОНТЕКСТЕ ПОЛИТИКИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Т. Г. Бурдыко[а], К. И. Бушмелева[б]
Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
[а] ✍ *burdyko_tg@surgu.ru,* [б] *bushmeleva_ki@surgu.ru*

Аннотация: актуальность исследования обусловлена необходимостью системного перехода университетов на отечественное программное обеспечение в условиях санкционного давления и требований технологической независимости. Существующие подходы к классификации программного обеспечения носят фрагментарный характер и не учитывают специфику функциональной полноты применительно к задачам вуза. Сургутский государственный университет — опорный вуз ХМАО-Югры, осуществляющий подготовку кадров для нефтегазовой отрасли — ключевого субъекта критической информационной инфраструктуры РФ. Направление 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» является системообразующим для цифровой трансформации региона.

Ключевые слова: импортозамещение, программное обеспечение, функциональная полнота, качество ПО, классификация ПО, критерии оценки, Сургутский государственный университет, цифровой суверенитет, направление 09.03.01.

Для цитирования: Бурдыко Т. Г., Бушмелева К. И. Классификация и критерии оценки функциональной полноты программного обеспечения Сургутского государственного университета в контексте политики импортозамещения. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):146–150.

Поступила в редакцию: 17.04.2026. *В окончательном варианте: 25.05.2026.*

CATEGORIZATION AND EVALUATION OF SOFTWARE USED AT SURGUT STATE UNIVERSITY UNDER THE IMPORT SUBSTITUTION POLICY

T. G. Burdyko[a], K. I. Bushmeleva[b]
Surgut State University, Surgut, Russian Federation
[a] ✍ *burdyko_tg@surgu.ru,* [b] *bushmeleva_ki@surgu.ru*

Abstract: this study addresses the need to ensure the technological independence of Russian universities in the context of sanctions and the implementation of the national import substitution policy. We examined the problem of assessing the functional completeness of software used at Surgut State University. The study aims to develop a software classification framework and a set of assessment criteria that account for the requirements of critical information infrastructure. We analyzed the ISO/IEC 25000 and GOST R ISO/IEC 25010-2015 standards, as well as current approaches to software classification, and developed an assessment methodology that combines quantitative and qualitative metrics. We applied the proposed methodology to the R7-Office software suite and evaluated its functional completeness. The results demonstrate the applicability of the proposed approach to software assessment. The proposed assessment criteria can support decision-making during the transition to domestic software at higher education institutions.

Keywords: import substitution, software, functionality, software quality, software categorization, evaluation criteria, Surgut State University, digital sovereignty, IT education.

Cite this article: Burdyko T. G., Bushmeleva K. I. Categorization and Evaluation of Software Used at Surgut State University under the Import Substitution Policy. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):146–150.

Original article submitted: 17.04.2026. *Revision submitted: 25.05.2026.*

После 2014 года в России начали постепенно переходить на отечественное программное обеспечение. Но если раньше это были просто рекомендации, то с 2022 года по настоящее время переход стал обязательным по закону. Теперь объекты критической информационной инфраструктуры, включая государственные вузы, обязаны работать преимущественно на российском

софте. Для Сургутского государственного университета (СурГУ) это двойная задача: нужно заменить все иностранные программы на отечественные, но при этом нельзя допустить сбоев в учебе или управлении — все должно работать так же качественно, как и раньше.

Что касается качества программного обеспечения, важную роль играет его способность эффективно решать поставленные задачи, то есть функциональная полнота (functional completeness). Согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 функциональная полнота определяется как достаточность набора функций для выполнения всех целей, ради которых продукт был приобретен. Однако до сих пор существует неопределенность в подходах к категоризации программного обеспечения вузов и оценке его достаточности, особенно когда речь идет об импортозамещении.

Цель данной статьи — разобраться, какие программы используются в СурГУ, и предложить правила (критерии) оценки достаточности их функций. При этом нужно учесть требования импортозамещения к ПО и специфику деятельности университета по направлению подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника».

Теоретические основы оценки функциональной полноты ПО

Понятие функциональной полноты в системе качества ПО

Во всем мире качество программ оценивают по единым международным стандартам (семейство ISO/IEC 25000). В России тоже есть свои ГОСТы, которые полностью соответствуют мировым. Например, ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 указывает, что одна из самых важных характеристик хорошей программы — это ее функциональная пригодность (то есть насколько хорошо она выполняет то, что требует пользователь).

Согласно стандарту модель качества продукта включает восемь характеристик:

- функциональная пригодность;
- надежность;
- уровень производительности;
- удобство использования;
- защищенность;
- совместимость;
- сопровождаемость;
- переносимость.

Функциональная пригодность, в свою очередь, подразделяется на три подхарактеристики:

- функциональная полнота — степень покрытия совокупностью функций всех определенных задач и целей пользователя;
- функциональная корректность — степень обеспечения продуктом или системой необходимой точности корректных результатов;
- функциональная целесообразность — степень функционального упрощения выполнения определенных задач и достижения целей.

В контексте импортозамещения оценка функциональной полноты становится жизненно важной: внедряемое отечественное ПО должно полностью заменить импортное. Также важной является проверка функционала, чтобы обеспечить непрерывность образовательного и управленческого процессов.

Нормативно-правовая база импортозамещения в сфере ПО для образовательных организаций

Правовое поле импортозамещения в Российской Федерации формируется указами Президента РФ, постановлениями Правительства, регулирующими запрет на допуск иностранного ПО для государственных нужд, а также требованиями к объектам критической информационной инфраструктуры [1].

Критерии отнесения ПО к отечественному включают:

- наличие исключительных прав на территории РФ;
- основную коммерческую и техническую деятельность компании-разработчика в России;
- наличие записи в Едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных.

Практическая реализация перехода учебных заведений на отечественные IT-решения показывает примеры комплексного подхода к созданию собственной цифровой среды. Так, в Амурской области реализован масштабный проект по переводу 339 школ и 16 колледжей на российскую операционную систему РЕД ОС с обучением более 300 педагогов [2]. Это подтверждает, что разработка методик оценки функциональной полноты для образовательной сферы является актуальным вопросом.

Классификация программного обеспечения Сургутского государственного университета

Общие подходы к классификации ПО

Программное обеспечение по назначению подразделяется на системное, прикладное и инструментальное [3, 4]. Системное ПО обеспечивает работу компьютера и сетей, прикладное предназначено для решения задач конкретной предметной области, инструментальное используется при разработке программ.

По способу распространения и использования выделяют:

- несвободное/закрытое (проприетарное) ПО;
- открытое ПО (open source) с доступным исходным кодом;
- свободное ПО, которое может устанавливаться и использоваться без ограничений [4].

Для целей импортозамещения важно также классифицировать программное обеспечение по происхождению (отечественное/иностранное) и по критичности для деятельности вуза.

Таблица 1

Классификация ПО СурГУ для целей оценки при импортозамещении [3,4,5]

Категория	Подкатегория	Примеры ПО (иностранное/отечественное)	Критичность	Направления использования
Базовое инфраструктурное ПО	Операционные системы	Windows, Debian Linux / РЕД ОС	Высокая	Все подразделения
	Системы управления базами данных	Microsoft SQL Server / Postgres Pro	Высокая	Управление, ИТ-направления
Офисное и коммуникационное ПО	Офисные пакеты	Microsoft Office / LibreOffice	Высокая	Все подразделения
	Средства видеоконференцсвязи	Zoom / Телемост, VK Звонки	Средняя	Образовательный процесс
Прикладное академическое ПО	Математические пакеты	MathCAD, Freemat / Engee	Высокая	Инженерные направления, информатика
	Средства разработки ПО	Visual Studio, PyCharm, Android Studio, VS Code	Высокая	Направление 09.03.01
	Специализированное ПО по направлениям	AutoCAD, SolidWorks / nanoCAD	Средняя	Инженерные направления
	Системы компьютерной алгебры	Maxima	Средняя	Математика, информатика
Управленческое ПО	Электронный документооборот	1С:Документооборот	Высокая	Управление
Инструментальное ПО	Средства разработки	Visual Studio / Eclipse, VS Code	Высокая	Направление 09.03.01
	Системы контроля версий	GitHub / GitLab Self-hosted	Средняя	Разработка ПО

Многоуровневая классификация ПО СурГУ

На основе анализа деятельности СурГУ и специфики направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» предлагается следующая многоуровневая классификация ПО, ориентированная на контекст импортозамещения (таблица 1).

Классификация программ позволяет дифференцированно оценивать их в зависимости от целей использования и роли в деятельности университета. Это связано с тем, что разные программы решают различные задачи, выполняют специфические функции и влияют на разные аспекты работы учебного заведения.

Разработка системы критериев оценки функциональной полноты

Методологические основы оценки

С учетом требований стандартов ISO/IEC 25000, ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 предлагается использовать следующие группы методов оценки функциональной полноты:

1. Экспертные методы — оценка на основе опыта специалистов предметной области.
2. Инструментальные методы — тестирование с использованием специальных средств.
3. Сравнительные методы — сопоставление с эталонным (замещаемым) ПО.
4. Методы сценарного тестирования — проверка выполнения типовых пользовательских сценариев.

Метрики функциональной полноты

Для количественной оценки функциональной полноты предлагается использовать коэффициент функциональной полноты:

$$K_{full} = \frac{F_{impl}}{F_{req}},$$

где F_{impl} — количество успешно реализованных функций в отечественном ПО;

F_{req} — общее количество требуемых функций, выполнявшихся ранее в иностранном ПО.

Однако данная метрика является недостаточной, так как не учитывает качество реализации и важность отдельных функций. В соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 и рекомендациями из источника [5] целесообразно применять многокритериальную систему оценки (таблица 2).

Таблица 2

Критерии и показатели функциональной полноты ПО

Критерий	Характеристика	Метод проверки	Показатели оценки
1. Полнота покрытия функциональных требований	Соответствие набора функций потребностям пользователей	Анализ спецификаций, сценарное тестирование	Процент покрытых функций; целевое значение — не менее 90% для критических функций
2. Корректность реализации функций	Правильность выполнения функций, точность результатов	Тестирование на контрольных примерах, сравнение с эталоном	Отсутствие ошибок выполнения и отклонений результатов; допустимая погрешность определяется предметной областью
3. Совместимость с форматами данных	Возможность обмена данными с другими системами, чтения и записи файлов замещаемого ПО	Тестирование импорта, экспорта и конвертации данных	Процент корректно конвертируемых элементов, сохранение структуры и форматирования
4. Функциональная приспособляемость	Соответствие функций контексту использования, отсутствие избыточности или недостаточности	Экспертная оценка пользователей	Степень удовлетворенности по шкале Ликерта; целевое значение — не менее 4 из 5
5. Полнота реализации бизнес-процессов	Способность ПО поддерживать специфические для вуза процессы	Моделирование процессов, сценарное тестирование	Процент поддерживаемых процессов, время выполнения операций

Критерий	Характеристика	Метод проверки	Показатели оценки
6. Соответствие требованиям импортозамещения	Наличие сертификатов, включение в реестр отечественного ПО	Аудит документации	Наличие действующих сертификатов соответствия, записи в реестре отечественного ПО
7. Возможность интеграции с существующей инфраструктурой	Совместимость с используемым оборудованием и ПО	Тестирование в рабочей среде	Отсутствие конфликтов, сохранение производительности

Учет специфики направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

Для направления 09.03.01 особое значение приобретает оценка инструментального ПО, используемого в учебном процессе при подготовке специалистов в области информатики и вычислительной техники. При оценке функциональной полноты необходимо учитывать:

1. Полноту поддержки языков программирования — соответствие современным стандартам языков, используемых в учебном процессе.
2. Наличие средств отладки и профилирования — возможность анализа производительности и поиска ошибок.
3. Интеграцию с системами контроля версий — поддержка коллективной разработки.
4. Совместимость с учебными материалами — возможность работы с примерами кода из учебников и методических пособий.
5. Поддержку современных парадигм программирования — объектно-ориентированное, функциональное, параллельное программирование [6].

Предложенный набор критериев пригодится вузам, когда они будут решать, как переходить на российские программы. Это особенно актуально для учебных курсов, где учат оценивать качество программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В АРПП представили обзор нормативной базы импортозамещения ПО в России. Режим доступа: https://arppsoft.ru/news/arpp/21088/.
2. Образование Амурской области переходит на отечественную ОС. ComNews.ru. Режим доступа: https://www.comnews.ru/content/243635/2026-02-03/2026-w06/1011/obrazovanie-amurskoy-oblasti-perekhodit-otechestvennuyu-os.
3. Классификация программного обеспечения. Введение в программные системы и их разработку. *Национальный открытый университет «ИНТУИТ»*. Режим доступа: https://intuit.ru/studies/courses/3632/874/lecture/14291.
4. Классификация программного обеспечения. Информатика: учебник для студентов всех направлений и специальностей подготовки. *Новосибирский государственный технический университет.* Режим доступа: http://optic.cs.nstu.ru/files/Lit/Informatica/info/chapter122.html.
5. Программные платформы электронного обучения. *Новосибирский государственный технический университет.* Режим доступа: https://ido-test.edu.nstu.ru/publications/программные-платформы-электронного/.
6. Технологии программирования (факультатив). *Поле цифровой дидактики.* Режим доступа: https://digida.mgpu.ru/index.php?title=Технологии_программирования_(факультатив).

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ТРАЕКТОРИИ ОБУЧЕНИЯ ШКОЛЬНИКОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ИХ УСПЕВАЕМОСТИ В ЦЕНТРЕ ПОДГОТОВКИ К ЕГЭ И ОГЭ

А. А. Драган[а], **А. В. Гавриленко**[б]

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

[а] *ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9589-9808,* ✍ *dragan.alexandr.902@gmail.com*

[б] *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1837-5698, gavrilenko.anna.v@gmail.com*

Аннотация: персонализированное обучение в центрах подготовки к ЕГЭ и ОГЭ позволяет с помощью современных технологий адаптировать учебный процесс под каждого ученика. Разработан алгоритм формирования адаптивной траектории обучения на основе данных об успеваемости учеников. Для сбора данных при анализе успеваемости ученика использовалась IRT-модель. Для оценки образовательных возможностей ученика применялся расчет вероятности правильного ответа с помощью трехпараметрической модели Бирнбаума. Полученное значение использовалось при расчете уровня знаний учащегося с применением метода максимального правдоподобия. Для распределения учеников по группам успеваемости использовался метод кластеризации K-means.

Ключевые слова: IRT-модель для сбора данных, метод кластеризации K-means, метод максимального правдоподобия, трехпараметрическая модель Бирнбаума, адаптивная образовательная траектория.

Для цитирования: Драган А. А., Гавриленко А. В. Алгоритм формирования адаптивной траектории обучения школьников на основе данных об их успеваемости в центре подготовки к ЕГЭ и ОГЭ. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):151–156.

Поступила в редакцию: 03.02.2026. *В окончательном варианте: 27.04.2026.*

A METHOD FOR BUILDING ADAPTIVE LEARNING PATHS FOR SCHOOL STUDENTS BASED ON ACADEMIC PERFORMANCE IN STANDARDIZED SCHOOL EXAMS

A. A. Dragan[a], **A. V. Gavrilenko**[b]

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

[a] *ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9589-9808,* ✍ *dragan.alexandr.902@gmail.com*

[b] *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1837-5698, gavrilenko.anna.v@gmail.com*

Abstract: we studied personalized learning in school exam preparation settings and developed a method for constructing adaptive learning paths based on student performance in standardized school exams. The approach targets individual learning needs and uses modern data-driven techniques to support instructional planning.

We collected student performance data and applied Item Response Theory (IRT) to model test responses. We estimated the probability of a correct answer using a three-parameter logistic model. We then inferred student ability levels using maximum likelihood estimation.

We grouped students according to their estimated ability using the K-means clustering method. The resulting clusters provided a basis for adapting learning trajectories to different performance levels.

Keywords: Item Response Theory (IRT), K-means, maximum likelihood estimation, three-parameter logistic model, adaptive learning path.

Cite this article: Dragan A. A., Gavrilenko A. V. A Method for Building Adaptive Learning Paths for School Students Based on Academic Performance in Standardized School Exams. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):151–156.

Original article submitted: 03.02.2026. *Revision submitted: 27.04.2026.*

Введение

В образовательном процессе индивидуализация обучения является ключевым фактором для успешного повышения уровня знаний учеников. Актуальной задачей представляется внедрение современных информационных технологий с использованием алгоритмов формирования адаптивных траекторий обучения на основе анализа данных об успеваемости в центрах подготовки к ЕГЭ и ОГЭ. Применение индивидуальной образовательной траектории позволяет интенсифицировать и индивидуализировать образовательную деятельность обучающихся за счет повышения уровня их субъектности, стимулируя, таким образом, их становление активными участниками системы непрерывного образования [1].

В настоящей работе описывается метод сбора и анализа данных с использованием IRT-модели, расчет уровня знаний учащихся на основе трехпараметрической модели Бирнбаума и метода максимального правдоподобия, а также последующая обработка данных посредством кластеризации методом K-means.

Сбор данных и оценка уровня знаний учащихся

В целях сбора данных ученикам предлагаются задания фиксированной сложности, чтобы провести стартовое тестирование с использованием IRT-модели для определения вероятности правильного ответа на задания. Получившееся значение используется для расчета уровня знаний ученика (θ) на основе метода максимального правдоподобия с оценкой по шкале от -1 до 1 со следующей градацией:

1. Уровень «Низкий», диапазон [-1; -0.5]. На данном уровне знаний ученик справляется с решением легких заданий, с заданиями средней сложности периодически возникают трудности.

2. Уровень «Средний», диапазон [-0.5; 0.5]. На данном уровне знаний ученик может решать легкие задания и задания средней сложности с периодическими ошибками, а также изредка решает сложные задания.

3. Уровень «Высокий», диапазон [0.5; 1]. На данном уровне ученик выполняет задания вне зависимости от уровня сложности с периодическими ошибками.

IRT (Item Response Theory) — это модель, которая показывает, что вероятность правильного ответа на задание j у хорошо подготовленного испытуемого должна быть больше вероятности правильного ответа у слабо подготовленного испытуемого: чем выше подготовка испытуемого, тем выше может быть вероятность правильного ответа на задание данного уровня сложности [2]. При использовании данной модели необходимо выделить основные параметры для дальнейшего определения уровня знаний учеников:

1) A (дискриминативность). Параметр дискриминативности в диапазоне от -1 до 1 помогает определить, насколько задание различает учеников с разным уровнем знаний.

2) B (сложность). Данный параметр отражает сложность заданий в диапазоне от 0 до 2.

3) C (угадывание). Данный параметр отражает вероятность угадывания учеником правильного ответа на задания в диапазоне от 0 до 0.99.

Для расчета вероятности правильного ответа необходимо найти параметр дискриминативности:

1) нужно определить группы учеников: выделить группу «сильных» испытуемых и группу «слабых» испытуемых;

2) посчитать для каждого задания количество правильных ответов у «сильной» и «слабой» группы;

3) рассчитать разницу между количеством правильных ответов в «слабой» группе и количеством правильных ответов в «сильной» группе;

4) разделить полученную разницу на количество учеников в обеих группах.

Также необходимо определить уровень сложности заданий по следующей шкале:

1) уровень «0»: легкое задание;

2) уровень «1»: задание средней сложности;

3) уровень «2»: задание повышенной сложности.

Кроме того, необходимо найти вероятность угадывания правильного ответа, для этого необходимо выполнить следующие действия:

1) определить параметр n — количество возможных вариантов ответа;

2) определить параметр m — количество правильных ответов;
3) рассчитать вероятность по формуле (1):

$$P(C) = \frac{m}{n}, \tag{1}$$

где C — это параметр угадывания.

Также в заданиях могут присутствовать текстовые ответы, для которых необходимо зафиксировать значения с учетом сложности заданий со следующей градацией:

1) для заданий низкой сложности определить вероятность угадывания как 0.4;
2) для заданий средней сложности определить вероятность угадывания как 0.2;
3) для заданий высокой сложности определить вероятность угадывания как 0.05.

Следующим этапом является расчет вероятности правильного ответа с помощью трехпараметрической модели Бирнбаума [3]:

$$P(x) = c + (1 - c) * \frac{1}{1 + e^{-a(\theta - b)}}, \tag{2}$$

где P(x) — вероятность правильного ответа, θ — уровень знаний ученика, a — параметр дискриминативности, b — параметр сложности, c — параметр угадывания.

Метод максимального правдоподобия — это метод оценивания неизвестного параметра путем максимизации функции правдоподобия. Основан на предположении о том, что вся информация о статистической выборке содержится в функции правдоподобия [4]. Для определения уровня знаний учеников используем метод максимального правдоподобия для одного ученика:

$$L(\theta) = \prod_{j=1}^{M} P_j(\theta)^{x_j} \left(1 - P_j(\theta)\right)^{1 - x_j}, \tag{3}$$

где $P_j(\theta)$ — вероятность правильного ответа на задание j, рассчитанная по трехпараметрической модели Бирнбаума, x_j — ответ ученика на задание j (1 — правильно, 0 — неправильно).

Для составления адаптивной траектории обучения, кроме уровня знаний ученика, необходимо учитывать предмет и скорость обучения. Предмет определяется на основе содержания тестовых заданий с учетом измеренных параметров (дискриминативность, сложность, угадывание). Для определения скорости обучения используется лонгитюдный метод сбора данных — длительное и систематическое изучение одного и того же объекта для выявления динамики его существования и прогнозирования его дальнейшего развития [5]. Для получения параметра скорости обучения необходимо следовать следующему плану:

1. Проведение тестирования в одинаковых интервалах времени, например раз в неделю.
2. Сбор результатов.
3. Расчет уровня знаний.
4. Построение графика:
   - необходимо построить график с осями X (время) и Y (уровень знаний ученика);
   - следует рассчитать значения переменных m и b для построения линии регрессии, используя метод наименьших квадратов [6]:

$$m = \frac{N * \sum xy - \sum x * \sum y}{N * \sum x^2 - \left(\sum x\right)^2}, \tag{4}$$

$$b = \frac{\sum y - m * \sum x}{N}, \tag{5}$$

где m — наклон линии регрессии, что будет являться скоростью обучения;
b — пересечение с осью Y;
N — количество точек данных;
x — значение времени;
y — значение параметра знаний ученика (θ).

После расчета значений переменных m и b необходимо построить линию регрессии [5]:

$$y = mx + b. \tag{6}$$

Линия регрессии будет показывать динамику скорости обучения ученика.

Результатом сбора данных и их оценки будет являться определение уровня знаний, скорости и предмета обучения каждого ученика.

Анализ данных и кластеризация учеников

На этапе анализа необходимо учитывать параметры уровня знаний (θ), предмета и скорости обучения, полученные на предыдущем этапе, для кластеризации учеников [7]:

1. Для начального определения группы учеников необходимо задать центры кластеров.
2. Определить для каждого ученика ближайший кластер с использованием вычисления ближайшего расстояния евклидовой метрикой:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \tag{7}$$

где x — уровень знаний ученика (θ), а y — скорость обучения.

3. Пересчитать центры кластеров на основании параметров учеников, распределенных по группам:

$$K_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} x_j}{n}, \frac{\sum_{j=1}^{n} y_j}{n} \right), \tag{8}$$

где x — уровень знаний ученика (θ), а y — скорость обучения;
i — порядковый номер кластера (K_1 — низкий уровень, K_2 — средний уровень, K_3– высокий уровень);
n — количество учеников в кластере;
K — значение центра кластера.

В результате получения значения кластеризации формируются три типовые группы учеников с низким, средним и высоким уровнем знаний.

Формирование адаптивной траектории обучения

При формировании адаптивной траектории обучения используются данные о текущем уровне знаний учеников, предмете и скорости обучения, а также кластер, в котором ученик находится, для выполнения заданий, находящихся в диапазоне сложности $\theta \pm 0.5$. В случае если вероятность успешного выполнения заданий превышает 80% для текущего уровня, сложность повышается; если она ниже 50%, то сложность понижается. После выполнения заданий на основе их результатов необходимо пересчитать значения уровня знаний ученика, скорости обучения и определить новый кластер для каждого ученика.

Пример использования алгоритма формирования адаптивной траектории обучения

В центре подготовки к ЕГЭ и ОГЭ существует группа из 6 человек по обществознанию. Для оценки уровня знаний ученикам предлагается тест, состоящий из 10 заданий различной сложности.

Для подсчета вероятности правильного ответа на задание необходимо определить значение дискриминативности, сложность задания и вероятность угадывания. Для определения значения дискриминативности разделим группу на сильных и слабых учеников следующим образом:

- «сильные ученики»: ученик 1, ученик 3, ученик 4;
- «слабые ученики»: ученик 2, ученик 5, ученик 6.

Для каждого задания следует определить уровень дискриминативности исходя из ответов всех учеников на конкретное задание. Например, расчет уровня дискриминативности для задания Q1:

1. Подсчет правильных ответов по группам:
   - «сильные ученики»: $[1, 1, 0]$;
   - «слабые ученики»: $[1, 0, 0]$.

2. Подсчет разницы между количеством правильных ответов в группах, равной 1.
3. Нормализация:
   - общее количество учеников в обеих группах: 6;
   - A (параметр дискриминативности) для $Q_1 = 1/6 \approx 0{,}17$.

Таким образом необходимо просчитать значение дискриминативности для каждого задания теста.

Таблица 1

Параметры заданий теста

Задание	Дискриминативность (A)	Сложность (B)	Угадывание (C)
Q_1	0.17	1	0.05
Q_2	0.66	2	0.40
Q_3	-0.58	0	0.05
Q_4	-0.64	1	0.05
Q_5	-0.63	1	0.40
Q_6	-0.39	2	0.40
Q_7	0.05	1	0.05
Q_8	-0.14	1	0.20
Q_9	-0.42	2	0.05
Q_{10}	0.22	2	0.05

Для каждого ученика необходимо высчитать вероятность правильного ответа с использованием трехпараметрической модели Бирнбаума исходя из ответов на задания и их параметров (таблица 1). Расчет вероятности для ученика 1 из «сильной» группы:

1. Результат теста: [1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0];
2. Расчет вероятности правильного ответа с использованием трехпараметрической модели Бирнбаума.

Для Q1: A = 0.17, B = 1, C = 0.05, $\theta = 0$ (при начальном тестировании используется значение по умолчанию).

Подставляем в формулу для расчета вероятности правильного ответа:

$$P\left(x=1\right) = 0.05 + (1 - 0.05) * \frac{1}{1 + e^{-0.17(0-1)}} \approx 0.4847.$$

Необходимо рассчитать вероятность правильного ответа для каждого задания ученика 1.

Подставляем данные из таблицы 2 для расчета уровня знаний ученика:

$$L(\theta) = P_1(\theta)^{x_1} * P_2(\theta)^{x_2} * \cdots * P_{10}(\theta)^{x_{10}} = 0.485 * 0.473 * 0.525 * 0.378 * 0.608 * 0.414 * 0.486 * 0.572 * 0.337 * 0.578 = 0.00062.$$

Рассчитываем скорость обучения с помощью лонгитюдного метода сбора данных с использованием метода наименьших квадратов:

x = 8 часов, y = 0.00062,

$$m = \frac{2 * (8 * 0.00062) - 8 * 0.00062}{2 * 8^2 - 0.00062^2} \approx 0.000039.$$

После нахождения скорости обучения и уровня знаний ученика необходимо определить кластер ученика:

- кластер 1 находится в диапазоне [-1; -0.5];
- кластер 2 находится в диапазоне [-0.5; 0.5];
- кластер 3 находится в диапазоне [0.5; 1].

Таблица 2

Вероятности правильного ответа на тест ученика 1

Задание	Вероятность правильного ответа
Q_1	0.485
Q_2	0.527
Q_3	0.525
Q_4	0.378
Q_5	0.608
Q_6	0.586
Q_7	0.514
Q_8	0.572
Q_9	0.337
Q_{10}	0.422

Рассчитываем расстояние до кластеров 1, 2 и 3:

$$d = \sqrt{(0.00062 - 0)^2 + (0.000039 - 0)^2} = 0.000615.$$

Делаем вывод, что ученик 1 относится к кластеру 2.

В дальнейшем подбор заданий необходимо осуществлять с учетом значения уровня знаний ученика.

Заключение

В ходе выполнения данной работы реализован алгоритм формирования адаптивных траекторий обучения с использованием IRT-модели для сбора данных и метода правдоподобия для оценки уровня знаний ученика. Исходя из полученных значений происходит подбор заданий для учеников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шеманаева М. А. Индивидуальная образовательная траектория как форма синхронно-асинхронной образовательной деятельности. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2017;9:43-47.
2. Аванесов В. С. Item Response Theory. Основные понятия и положения. *Педагогические измерения.* 2007;3:23-28.
3. Муратова Л. А. Модели Бирнбаума для оценки качества теста «Линейная алгебра, аналитическая геометрия». *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Психолого-педагогические науки.* 2017;3:83-91.
4. Клепиков Н. П., Соколов С. Н. *Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия:* практическое пособие. Москва: Наука; 1964. 190 с.
5. Корнилов С. А. Лонгитюдные исследования: теория и методы. *Экспериментальная психология.* 2011;4(4):101-116.
6. Линник Ю. В. *Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений.* Москва: Физматгиз; 1962. 90 с.
7. Кугаевских А. В., Муромцев Д. И., Кирсанова О. В. *Классические методы машинного обучения:* учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО; 2022. 14 с.
8. Чернова Н. И. *Математическая статистика:* учебное пособие. Новосибирск: СибГУТИ; 2009. 90 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Д. А. Яременко[а], К. И. Бушмелева[б]

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

[а] *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0623-7089,* ✍ *yaremenko_da@surgu.ru*

[б] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3038-6376, bushmeleva_ki@surgu.ru*

Аннотация: в статье предложено моделирование и оптимизация процесса эвакуации для многофункциональных комплексов с учетом распределения людей по этажам и адаптивного построения кратчайших маршрутов. Рассмотрены существующие подходы к подсчету численности людей, графовые и агент-ориентированные модели движения, а также принципы интеграции сенсорных данных в динамическую маршрутизацию. Проведено численное моделирование ряда сценариев эвакуации; показано, что адаптивная маршрутизация сокращает общее время эвакуации и снижает локальные перегрузки. Обсуждены практические аспекты внедрения: визуализация, отказоустойчивость системы и соответствие нормативам. Приведены рекомендации для проектирования и эксплуатации эвакуационных систем в современных объектах.

Ключевые слова: эвакуация, адаптивная маршрутизация, графовые модели, видеоаналитика, Wi-Fi sensing, агент-ориентированное моделирование, динамическая сигнализация, многозоновые комплексы.

Для цитирования: Яременко Д.А., Бушмелева К. И. Оптимизация процесса эвакуации в современных многофункциональных комплексах. *Успехи кибернетики.* 2026;7(2):157–163.

Поступила в редакцию: 11.03.2026. *В окончательном варианте: 18.06.2026.*

OPTIMIZATION OF EVACUATION SYSTEMS IN MODERN MULTIFUNCTIONAL BUILDINGS

D. A. Yaremenko[a] , K. I. Bushmeleva[b]

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

[a] *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0623-7089,* ✍ *yaremenko_da@surgu.ru*

[b] *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3038-6376, bushmeleva_ki@surgu.ru*

Abstract: we proposed a methodology for modeling and optimizing evacuation systems in modern multi-use buildings, taking into account how occupants are distributed across floors and how evacuation routes can be dynamically updated to reflect changing conditions. We reviewed existing approaches to occupant estimation, graph-based and agent-based movement models, and methods for integrating sensor data into dynamic route planning. We performed numerical simulations of several evacuation scenarios. The results show that adaptive routing reduces total evacuation time and helps prevent local crowding. We also discussed practical implementation issues, including system visualization, fault tolerance, and compliance with safety regulations. Finally, we provided recommendations for the design and operation of evacuation systems in modern buildings.

Keywords: evacuation, adaptive routing, graph models, video analytics, Wi-Fi sensing, agent-based modeling, dynamic signage, multi-zone buildings.

Cite this article: Yaremenko D. A., Bushmeleva K. I. Optimization of Evacuation Systems in Modern Multifunctional Buildings. *Russian Journal of Cybernetics.* 2026;7(2):157–163.

Original article submitted: 11.03.2026. *Revision submitted: 18.06.2026.*

Введение

Современные многофункциональные комплексы объединяют в одном здании торговые зоны, офисы, развлекательные площадки и инженерную инфраструктуру, что существенно усложняет задачи обеспечения быстрого и безопасного вывода людей при чрезвычайных ситуациях (ЧС). Современные подходы к анализу эвакуации опираются как на физико-статистические и агент-ориентированные модели движения пешеходов, так и на алгоритмические методы поиска кратчайших путей в графовых представлениях планировок; при этом практика проектирования также ориентируется на требования нормативов по обеспечению безопасности людей в зданиях.

В основе построения маршрутов часто лежат классические алгоритмы кратчайшего пути, проверенные теоретически и широко используемые в прикладных системах навигации.

Одновременно с развитием моделей растет доступность технологий учета и оценки численности людей: комбинированное применение датчиков, видеонаблюдения, сигналов беспроводных устройств и статистических методов позволяет получать релевантную информацию о распределении людей по зонам в почти реальном времени. Интеграция таких данных в адаптивные алгоритмы маршрутизации может значительно повысить эффективность эвакуации за счет оперативного перераспределения потоков и обхода «узких мест». На фоне этих возможностей цель настоящей статьи — разработать и верифицировать моделирование и оптимизацию процесса эвакуации с учетом количественного распределения людей по этажам и адаптивного построения кратчайших маршрутов — выглядит актуальной и практически применимой.

Обзор литературы и существующих методов моделирования эвакуации

За последние несколько десятилетий область моделирования эвакуации развивалась в нескольких параллельных направлениях: макроскопические модели потоков, микроскопические агент-ориентированные подходы, клеточные автоматы и физико-статистические модели, такие как «социальная сила». Классическая модель социальной силы, предложенная Хелбингом и Молнаром, остается одной из опорных в описании коллективных эффектов и самоорганизации пешеходных потоков, и ее идеи активно используются и в современных агент-ориентированных симуляциях [1].

Параллельно развивались алгоритмические методы построения маршрутов эвакуации, основанные на графовых представлениях планировок зданий: классические алгоритмы кратчайшего пути (Дейкстра, A*) и их модификации применяют для расчета оптимальных направлений движения, а также для поиска «коридоров» с минимальной загруженностью и максимальной безопасностью [2].

Отдельное внимание в литературе уделено методам учета и оценки численности людей в помещениях, поскольку точные входные данные существенно повышают достоверность моделей. Среди практических решений — системы на основе видеоаналитики и глубокого обучения для подсчета потоков людей, беспроводные методы на базе Wi-Fi/RSSI и Bluetooth, а также RFID-решения; сравнительные исследования показывают, что у каждого подхода есть свои преимущества и ограничения по точности, цене и защите приватности.

Важную роль играют и нормативно-правовые документы, задающие требования к эвакуационным путям и методам проектирования систем безопасности объектов. В российской практике релевантны современные своды правил и стандарты по организации эвакуации и обеспечению пожарной безопасности, которые регламентируют минимальные параметры путей эвакуации, маркировку и расчет пропускной способности выходов — эти требования служат базой при применении любых моделирующих и оптимизационных решений.

Расчет численности людей на этажах многофункциональных комплексов

Многофункциональный комплекс — это архитектурно-планировочное образование, в котором объединены несколько разных по назначению функций (торговля, офисы, жилье, развлечения, техпомещения и т.д.) в рамках одного здания или взаимосвязанного набора зданий. Такая концентрация функций дает объекту высокую функциональную плотность и делает его в некотором смысле «городом в миниатюре»: на одних и тех же площадях сосуществуют публичные зоны с большим притоком людей и более закрытые служебные или жилые зоны.

Точная оценка численности людей на каждом этаже — ключевой вход для любой модели эвакуации; без надежных данных о распределении людей по зонам любые расчеты маршрутов и пропускной способности будут носить лишь ориентировочный характер. На данный момент существует несколько подходов для решения подобной задачи, каждый их которых имеет свои особенности и определенные условия для реализации. Первый подход — визуальный, реализация которого осуществляется с помощью тепловых счетчиков и 2-3D видеоаналитики; второй подход — системы радиочастотный идентификации и RTLS; третий подход — применение бесконтактных сенсоров; четвертый подход реализуется за счет применения инфракрасных датчиков. С точки зрения создания и обеспечения самой простой является система инфракрасных датчиков, которая

предполагает использование датчиков перепада давления, ультразвука, а также инфракрасного барьера. Ввиду того, что для каждой из перечисленных технологий существуют определенные условия применения и ограничения, более эффективным будет комплексный подход, который включает одновременное использование нескольких решений [3].

Одной из наиболее значимых задач для оптимизации процесса эвакуации является создание такой модели, с помощью которой моделирование эвакуации будет отражать распределение людей по этажам в режиме реального времени, что возможно обеспечить за счет точных входных параметров, которые поступают от сенсоров или видеосчетчиков. При этом для более эффективного моделирования эвакуации важно учитывать возможные пиковые сценарии, при которых количество людей будет максимальным, а для этого при построении модели необходимо анализировать данные исторической ретроспективы.

Для практической реализации оптимальных эвакуационных маршрутов планировка комплекса переводится в графовую модель, где вершины соответствуют ключевым точкам (помещениям, перекресткам коридоров, выходам), а ребра — возможным путям между ними с присвоенными длинами или временем прохождения. На таком графе стандартные алгоритмы поиска кратчайшего пути — Дейкстра или A* — позволяют быстро получить базовые направления эвакуации от любой точки до безопасной зоны, при этом предрассчитанные пути удобно хранить и использовать при первичном планировании.

Практическая схема расчета маршрутов должна также соответствовать действующим нормативам: параметры путей эвакуации, минимальные ширины выходов и требования к числу независимых выходов задаются национальными сводами правил и стандартами проектирования; эти ограничения необходимо формализовать при построении графовой модели и учитывать при оптимизации, чтобы предложенные маршруты были реализуемы в реальной эксплуатации.

Адаптивная маршрутизация с интеграцией данных о численности людей

Адаптивная маршрутизация предполагает, что маршруты эвакуации не фиксированы заранее, а пересчитываются в реальном времени на основе текущей информации о распределении людей и состоянии путей. Практически это значит, что данные от видеосчетчиков, радиосенсоров, RFID и других источников служат входом для алгоритма, который обновляет веса графовой модели здания (пропускная способность, время прохождения, риск заторов) и предлагает альтернативные направления движения при обнаружении перегрузок или закрытия участков. Подобный подход описан в ряде работ по динамической оптимизации эвакуационных маршрутов и демонстрирует преимущество перед статическими схемами в условиях меняющейся ситуации.

Технически адаптация достигается сочетанием трех компонентов: 1) оперативный сбор и предобработка сенсорных данных (видеосчетчики, Wi-Fi/BLE sensing, датчики прохода и т.п.), 2) модель представления пространства в виде графа с динамическими весами и ограничениями емкости и 3) модуль пересчета маршрутов, который реализует поиск кратчайшего / наименее загруженного пути при обновленной информации. Исследования показывают, что именно такая архитектура: сенсоры + графовая модель + динамический маршрутный алгоритм — дает сбалансированный результат по точности и скорости принятия решений [4].

Визуализация и навигационные технологии

Внутреннее пространство многофункционального комплекса требует особого подхода к навигации: спутниковый GPS здесь не работает, поэтому для вывода понятных указаний и сопровождающей визуализации применяют совокупность локальных технологий: цифровые табло, BLE-маяки, Wi-Fi-позиционирование, мобильные приложения и интегрированные решения на базе BIM/ЦОД. Эти инструменты выполняют функцию «карты и навигатора» внутри здания, позволяя показывать направления движения, альтернативные пути и предупредительные обозначения в режиме, близком к дорожным навигаторам.

Цифровые табло и динамические эвакуационные указатели (dynamic signage) способны менять направление и информативность в зависимости от стадии ЧС; световые стрелки, красные кресты и текстовые сообщения быстрого реагирования привлекают внимание и направляют людей в обход опасных участков.

Для построения «виртуального GPS» внутри здания используют двухуровневую логику: на уровне инфраструктуры — картографирование поэтажных планов и установка маяков/датчиков; на уровне сервисов — алгоритмы локализации и маршрутизации, которые сопоставляют положение человека / кластера людей с графовой моделью плана и формируют рекомендации. Обзор методов indoor-позиционирования показывает, что комбинирование разных источников (BLE, Wi-Fi, инерциальные датчики, визуальная локализация) дает наилучший баланс между точностью и стоимостью внедрения [5]. Все визуальные решения необходимо согласовывать с действующими нормами по эвакуации и маркировке путей (в РФ — соответствующие требования сводов правил по противопожарной защите).

Численное моделирование процесса эвакуации

Численное моделирование эвакуации — это последовательность практических шагов, которые превращают архитектурные планы и сенсорные данные о людях в воспроизводимую цифровую экспериментальную среду. Рекомендуется опираться на обзоры и методические рекомендации при выборе парадигмы моделирования. Рассмотрим основные этапы численного моделирования процесса эвакуации людей из многофункциональных комплексов.

1. Выбор модели и платформы. Сначала определяют, какой класс модели наиболее уместен: макроскопические (потоковые), клеточные автоматы, агент-ориентированные или физико-стохастические (например, модели «социальной силы»). При выборе программного обеспечения ориентируются на доказанную практику: промышленные инструменты (Pathfinder, MassMotion, Simulex, AnyLogic и др.) и исследовательские симуляторы имеют свои сильные/слабые стороны по точности, скорости и возможностям валидации [6].

2. Подготовка входных данных (геометрия + население). Поэтажные планы переводят в цифровую модель (векторные планы, CAD/BIM) с явным указанием коридоров, дверных проемов, лестниц, зон ожидания и ограждений; на их основе строится граф или непрерывная сетка для симуляции.

3. Формализация поведения и параметризация. Определяют правила выбора выхода (ближайший, наименее загруженный, по указаниям), зависимости скорости от плотности, выполняют моделирование взаимодействий (обходы, замедления, очереди).

4. Проведение сценариев и чувствительный анализ. Запускают набор сценариев: базовый (штатный), аварийный с частичными закрытиями, пиковые загрузки (разные плотности на этажах), отказ сенсоров/указаний и сценарии с разной долей людей, не следующей указаниям.

5. Метрики и визуализация результатов. Основные количественные метрики — суммарное время эвакуации, распределение времени выхода по зонам (isochrones/time-to-exit), максимальная локальная плотность, средняя пропускная способность по выходам (pers/min/m), длительность очередей и локальные «узкие места». Визуализации — карты плотности, тепловые карты времени выхода, анимации потоков и графы загрузки выходов — помогают однозначно интерпретировать слабые места и сравнить варианты оптимизации.

6. Калибровка и валидация. Модель следует калибровать на доступных реальных данных: результаты тренировочных тревог, видеоархивы, данные учета входов/выходов и контролируемые эксперименты [7].

7. Отчетность и рекомендации. Результаты симуляций оформляют в виде набора сценариев с таблицами показателей, графиками чувствительности, картами плотности и анимациями ключевых эпизодов эвакуации; на основе этого дают инженерные рекомендации (изменить ширины проходов, добавить альтернативные выходы, переставить указатели, внедрить адаптивную маршрутизацию).

Результаты исследования

На основе анализа численного моделирования, сенсорных данных и оценки геометрии объекта были получены конкретные показатели, подтверждающие, что использование динамической маршрутизации, основанной на текущей численности людей, значительно сокращает общее время эвакуации и снижает риск образования «бутылочных горлышек».

В рамках моделирования рассматривались два сценария:

- базовый, с фиксированными маршрутами и традиционными указателями (рисунок 1);

• адаптивный, в котором система навигации перераспределяет потоки людей в реальном времени на основе данных с датчиков (рисунок 2).

По итогам симуляции было установлено, что в адаптивном режиме средняя плотность людей в критических зонах уменьшилась почти на 30%.

Построенные карты плотности показали, что без адаптации маршрутов основные заторы формировались у главных лестничных пролетов и центральных выходов. Система перераспределения почти вдвое сокращает время ожидания у дверных проемов, что обеспечивается за счет перенаправления людей из наиболее перегруженных зон в направление запасных путей эвакуации, а также в зоны боковых лестниц.

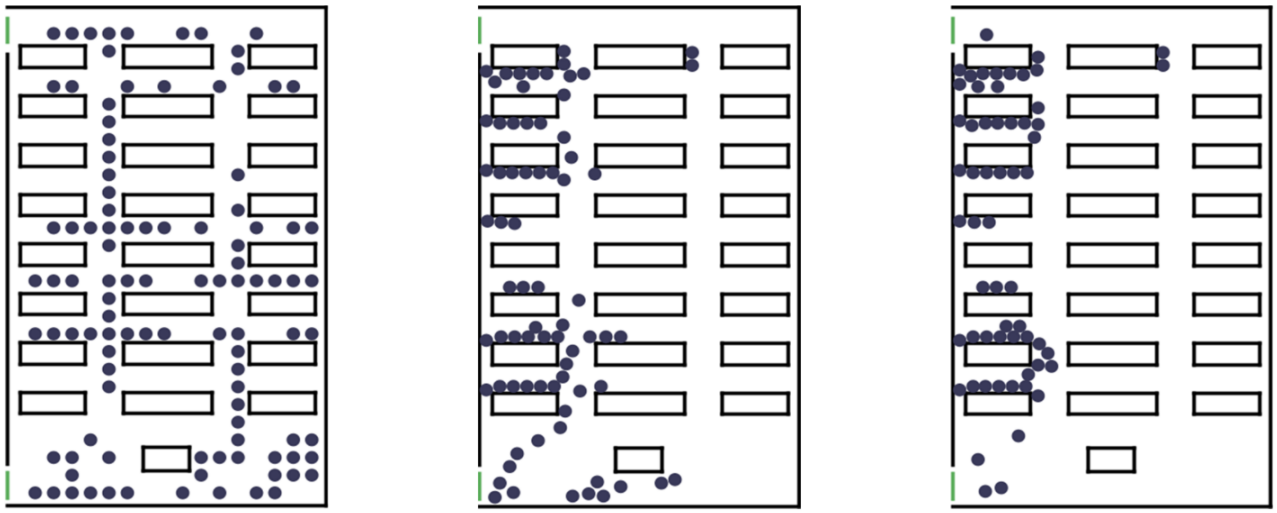


Рис. 1. *Моделирование эвакуации базовой модели*

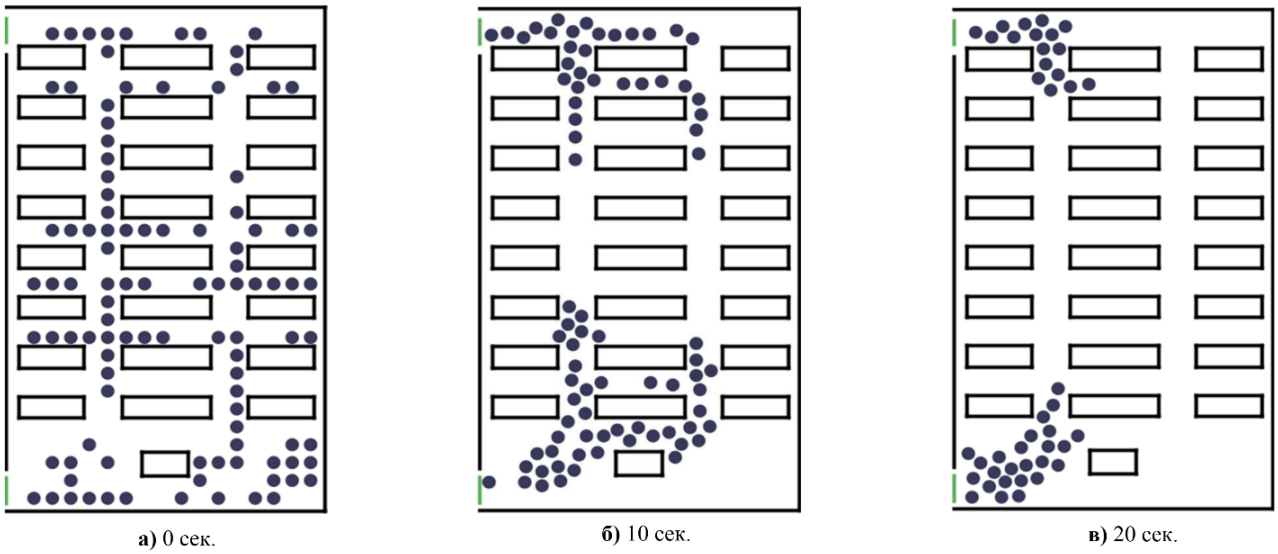


Рис. 2. *Моделирование эвакуации адаптивной модели*

Проведенный анализ и моделирование позволили выявить определенные закономерности, которые влияют на скорость потока: при симметричной планировке зданий и этажей с открытыми участками средняя скорость потока находится в пределах от 1,2 до 1,4 м/с, в то время как на участках, где есть какие-то перегородки, углы, тупики и другие преграды для движения, скорость потока снижается до показателя 0,7-0,8 м/с.

Верификация предложенной системы моделирования эвакуационного процесса была апробирована при учебных тревогах. Результаты наблюдений и последующего анализа позволили сде-

лать вывод, что ввиду незначительного расхождения по времени (8%) в моделируемом варианте и при реальной эвакуации система моделирования может считаться эффективной, а параметры оценки — релевантными.

Ниже представлены основные выводы по результатам проведенного исследования:

- во-первых, при организации процесса эвакуации переходы между этажами и лестничные пролеты являются наиболее проблемными и нуждаются в динамическом управлении;
- во-вторых, в зданиях, где присутствует сложная планировка и мало зон с открытым пространством, за счет адаптивных систем навигации можно примерно на 25% сократить время эвакуации;
- в-третьих, имитационное моделирование и цифровые двойники позволяют на начальном этапе проектирования определить проблемные участки в планировке и наиболее оптимальные варианты решения;
- в-четвертых, для повышения точности при построении алгоритмов маршрутизации и, как следствие, для улучшения самого эвакуационного процесса необходимо применять комплекс систем видеонаблюдения, RFID, а также тепловые карты.

Процесс организации эвакуации из многофункциональных центров и степень его безопасности определяется совокупностью факторов и параметров, которые необходимо учитывать при его моделировании, среди которых наиболее значимыми являются данные о текущей плотности людей на всех участках здания, план здания, индивидуальные особенности поведения людей в стрессовой ситуации и т.д. Применение адаптивных сценариев моделирования процесса эвакуации и последующей навигации позволяет наиболее оптимально перераспределить поток людей с учетом различных сценариев и имеющихся альтернативных маршрутов, что не только способствует сокращению времени самой эвакуации, но и снижает уровень потенциальных рисков.

Полученные результаты также показали значимость навигационных панелей и визуальных подсказок, ускоряя процесс эвакуации, что коррелирует с выводами авторов Ronchi E., Wahlqvist J., Ardinge A. [8], которые отмечают снижение уровня хаотичности движений людей и более точную реакцию на сигналы тревоги. При схожих условиях загрузки этажей визуальное сопровождение при организации процесса эвакуации обеспечивает более хорошие результаты, чем при их отсутствии.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что предложенный метод оптимизации процесса эвакуации на основе математического моделирования, анализа поведения людей, а также современных инструментов учета плотности людей в режиме реального времени повышает эффективность данного процесса и актуален для применения в крупных комплексах и торгово-развлекательных центрах, для которых характерна высокая плотность человеческих потоков в пики посещения.

Заключение

Рассмотренный метод моделирования процесса эвакуации, который реализуется с помощью математического алгоритма на основе данных, полученных с датчиков, определяющих плотность людей на различных участках зданий, обеспечивает, с одной стороны, ускорение эвакуационных процедур и повышение уровня безопасности, а с другой — возможность на этапе проектирования здания на основе полученных расчетов заранее устранить потенциально узкие места, снижающие проходимость.

Результаты исследования подтверждают целесообразность применения оптимизации маршрута эвакуации на основе динамических данных, полученных от различных датчиков, т.к. в сравнении с традиционными методами планирования процесса эвакуации способствуют сокращению времени на 20-25%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bai J., Lv X., Nie L., Fang M. Evacuation Route Determination in Indoor Architectural Environments Based on Dynamic Fire Risk Assessment. *Buildings.* 2025;15(10):1715. DOI: 10.3390/buildings15101715.

2. Duan P., Diao X., Cao Y., Zhang D., Zhang B., Kong J. A Comprehensive Survey on Wi-Fi Sensing for Human Identity Recognition. *Electronics*. 2023;12(23):4858. DOI: 10.3390/electronics12234858.
3. Helbing D., Molnár P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*. 1995;51(5):4282-4286. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
4. Lei M. et al. Modelling of Safe Evacuation Conditions at the Architectural/Space Scale: Methods and Case Studies. *Buildings*. 2023;13(8):2121. DOI: 10.3390/buildings13082121.
5. Yang L., Wei J., Tang Z., Hu J., Hu Z. A Study on Crowd Evacuation Model Considering Squeezing Equilibrium in Crowded Areas. *Applied Sciences*. 2023;13(1):544. DOI: 10.3390/app13010544.
6. Tsurushima A. Simulation Analysis of Evacuation Guidance Using Dynamic Distributed Signage. *TechRxiv*. 2023. DOI: 10.36227/techrxiv.23658051.v1.
7. Maranghides A., Link E. D. *WUI Fire Evacuation and Sheltering Considerations: Assessment, Planning, and Execution (ESCAPE): NIST Technical Note 2262*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2023. 122 p. DOI: 10.6028/NIST.TN.2262.
8. Ronchi E., Wahlqvist J., Ardinge A. et al. The Verification of Wildland-Urban Interface Fire Evacuation Models. *Natural Hazards*. 2023;117:1493-1519. DOI: 10.1007/s11069-023-05913-2.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jcyb.ru.

Адрес учредителя и издателя:
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»,
117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.

Дата выхода в свет 30.06.2026.
Формат 60 × 84/8.
Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 17,1.
Цена свободная.