

ISSN 2712-9942

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2025
T. 6 № 3

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

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 6
№ 3**

**Vol. 6
No. 3**

Москва
2025

Учредитель и издатель

Федеральное государственное автономное 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 развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а также перечню критических технологий РФ.

Журнал ориентирован на пропаганду передовых идей в области физики, математики, технических наук, участие в реализации задач, сформулированных Президентом РФ в Указе от 01.12.2016 № 642, по научно-технологическому развитию РФ, а также импортозамещению по приоритетным направлениям стратегического развития страны, соответствующим тематике журнала, 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

Власов Сергей Евгеньевич, д. т. н., директор, НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва

Павченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, вице-президент, Российская академия наук; заведующий кафедрой медицинской физики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, МСП — 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

Яковлевский 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 Рашид 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

Лаврентьев Михаил Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт автоматизации 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

Земло 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.

Технический редактор

Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент

Переводчик

Троицкий Дмитрий Игоревич, к. т. н., доцент

Художественное оформление обложки

© Горбунов Александр Сергеевич

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.

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 the national priority fields of research and development, and the critical technologies.

The Journal promotes advanced concepts in physics, mathematics, engineering, and facilitates the national research and technology development under the Russian President Decree No. 642 dated 01.12.2016, and phasing out strategic imports. 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. *Sergey E. Vlasov*, Doctor of Science (Engineering), Director, NRC “Kurchatov Institute” – SRISA, Moscow
- Prof. *Vladislav Ya. Panchenko*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Vice President, Russian Academy of Sciences (RAS), Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, 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. Iakovovski*, 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. Shagaliev*, 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. *Mikhail M. Lavrentiev*, 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 Editor

Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof.

Translator

Dmitry I. Troitsky, Ph.D. (Engineering), Assoc. Prof.

Cover Design

© Alexander S. Gorbunov

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, Nakhimovskiy pr., 36/1.
Tel.: +7(922)654-5788, fax: +7(495)719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Web: jcyb.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| М. Т. Гавриленко, В. А. Галкин, Т. В. Гавриленко | |
| Система моделирования процессов идентификации отражающих объектов и управления излучающими объектами | 6 |
| В. П. Кощев | |
| Интегралы движения на экстремалях уравнения Эйлера–Лагранжа | 17 |
| В. А. Востров, М. А. Гореликов, М. Е. Амелин | |
| Концепция модели прогнозирования признаков изменения цены акций, предназначенной для управления рисками нефинансовых организаций | 20 |
| М. П. Базилевский, А. А. Морозова | |
| Внедрение учетной информационной системы для повышения эффективности управления организацией, реализующей медикаменты по государственным контрактам | 27 |
| Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов | |
| Нейросетевая линеаризация NDIR газовых сенсоров | 36 |
| А. В. Курамшина, С. А. Лысенкова, А. А. Фахриева | |
| Разработка прототипа веб-приложения для обучения бережливому производству | 46 |
| А. Б. Рубин, В. М. Еськов, В. В. Еськов, Ю. В. Вохмина | |
| Проблемы прогнозирования будущего для биосистем в биокибернетике | 52 |
| Д. В. Белощенко, Т. В. Гавриленко | |
| Сравнительный анализ воздействия различных звуковых стимулов на физиологические и когнитивные процессы волейболистов | 62 |
| В. П. Кощев | |
| О нарушении инвариантности уравнения Эйлера–Лагранжа | 70 |
| С. Е. Засим, Р. Д. Гимранов | |
| Проблемы формирования и реализации логистических цепочек материальных ресурсов крупных и средних предприятий | 72 |
| Д. В. Горбунов, С. Г. Еловой | |
| Адекватность симуляционной модели биомеханической системы человека | 79 |
| Д. В. Белощенко, Р. А. Чирко, Т. В. Гавриленко | |
| Анализ данных о когнитивных способностях и физиологических реакциях человека на воздействие музыкальных композиций | 86 |
| В. А. Орлов, А. В. Гавриленко | |
| Интеллектуальные голосовые помощники для служб технической поддержки | 96 |
| Э. Г. Тунян, Р. С. Сазиков, С. А. Харламов | |
| Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в персонализированном питании на основе анализа состава продуктов | 105 |
| Р. Ф. Хаматнуров, Т. В. Гавриленко | |
| Алгоритм свертки 2D объектов в инвариантный и вероятностный «генетический код» | 112 |
| А. Д. Смородинов | |
| О представлении кулоновского потенциала в виде суперпозиции функций одной переменной и сложения | 123 |
| А. В. Мальцев | |
| Методы имитации оптических искажений в изображениях с виртуальных камер в трехмерных сценах | 127 |

CONTENTS

| | |
|---|-----|
| M. T. Gavrilenko, V. A. Galkin, T. V. Gavrilenko Simulation of Virus Detection and Immune Cell Behavior Control | 6 |
| V. P. Koshcheev Integrals of Motion on the Extrema of the Euler–Lagrange Equation | 17 |
| V. A. Vostrov, M. A. Gorelikov, M. E. Amelin A Concept of a Model for Forecasting Indicators of Share Price Changes to Manage Risk in Non-Financial Organizations | 20 |
| M. P. Bazilevskiy, A. A. Morozova Deployment of an Accounting System to Improve Management Efficiency in a Medicine Supplier under Government Contracts | 27 |
| N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov Neural Network-Based Linearization of the NDIR Gas Sensor Characteristic | 36 |
| A. V. Kuramshina, S. A. Lysenkova, A. A. Fahrieva Prototype Web Application for Lean Manufacturing Training | 46 |
| A. B. Rubin, V. M. Eskov, V. V. Eskov, Yu. V. Vokhmina Forecasting For Biosystems in Biocybernetics | 52 |
| D. V. Beloshchenko, T. V. Gavrilenko Comparative Analysis of the Effects of Sound Stimuli on Physiological and Cognitive Processes in Female Volleyball Players | 62 |
| V. P. Koshcheev Violation of the Invariance of the Euler–Lagrange Equation | 70 |
| S. E. Zasim, R. D. Gimranov Building and Operating Material Supply Chains for Large and Medium-sized Companies | 72 |
| D. V. Gorbunov, S. G. Elovoi Validity of the Simulation Model of the Human Biomechanical System | 79 |
| D. V. Beloshchenko, R. A. Chirko, T. V. Gavrilenko Analysis of Cognitive Abilities and Physiological Responses in Humans Listening to Music | 86 |
| V. A. Orlov, A. V. Gavrilenko Intelligent Voice Assistants for Technical Support Services | 96 |
| E. G. Tunyan, R. S. Sazikov, S. A. Kharlamov Intelligent Decision Support Systems for Personalized Nutrition Based on the Analysis of Food Composition | 105 |
| R. F. Khamaturov, T. V. Gavrilenko Convolution of 2D Objects into an Invariant and Probabilistic “Genetic Code” | 112 |
| A. D. Smorodinov Representation of the Coulomb Potential as a Superposition of Functions of One Variable and Addition | 123 |
| A. V. Maltsev Imitating Optical Distortions in 3D Scene Virtual Camera Images | 127 |

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ И УПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧАЮЩИМИ ОБЪЕКТАМИ

М. Т. Гавриленко^{1,2,a}, В. А. Галкин^{1,2,b}, Т. В. Гавриленко^{1,2,c}

¹ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4789-7376>, ✉ gavrilenko.michail.t@gmail.com

^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

Аннотация: изучение и моделирование новых подходов к идентификации, механизмов поиска на клеточном уровне имеет большое практическое значение для исследователей и специалистов в области биоинформатики. Особенностью работы является поиск механизмов взаимодействия клеточных объектов, основанных на простых и эффективных алгоритмах. В качестве моделируемых объектов выбраны вирусы (отражающие объекты) и иммунные клетки (излучающие объекты). Рассмотрена гипотеза о способности клеток организма взаимодействовать посредством электромагнитного излучения. Выработанные методы и подходы продемонстрировали высокую эффективность при моделировании процесса охоты. Точность нейросетевой модели классификатора составила 98%, погрешность нейросетевой модели для вектора направления составляет 8°, погрешность вычисляемого расстояния до вируса составляет 16%.

Ключевые слова: симуляционное моделирование, искусственная нейронная сеть, отражающие объекты, иммунные клетки, вирусы.

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: Гавриленко М. Т., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. Система моделирования процессов идентификации отражающих объектов и управления излучающими объектами. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):6–16.

Поступила в редакцию: 08.08.2025.

В окончательном варианте: 17.09.2025.

SIMULATION OF VIRUS DETECTION AND IMMUNE CELL BEHAVIOR CONTROL

M. T. Gavrilenko^{1,2,a}, V. A. Galkin^{1,2,b}, T. V. Gavrilenko^{1,2,c}

¹ Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4789-7376>, ✉ gavrilenko.michail.t@gmail.com

^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: research into new approaches and their simulation for identification and search mechanisms at the cellular level is of great practical importance for bioinformatics. We developed simple, efficient algorithms to simulate interactions among cells. We simulated viruses as targets (reflectors) and immune effector cells (searching cells) as emitters. We tested the hypothesis that body cells can interact via electromagnetic radiation. Our methods demonstrated high efficiency in simulating the searching (hunting) process. The neural network classifier achieved 98% accuracy. The mean angular error for predicted direction vectors was 8°, and the error in estimated distance to the virus was 16%. These results suggest that the proposed simulation approach is effective for modeling search-and-detect processes at the cellular level and support further investigation of non-chemical signaling hypotheses.

Keywords: simulation, artificial neural network, reflector, immune cells, viruses.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Gavrilenko M. T., Galkin V. A., Gavrilenko T. V. Simulation of Virus Detection and Immune Cell Behavior Control. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):6–16.

Original article submitted: 08.08.2025.

Revision submitted: 17.09.2025.

Введение

В окружающем мире проблема идентификации отражающих объектов связана с одним ключевым фактором — их способностью к маскировке. Это прослеживается в природе всюду — окрас насекомых или животных (пчелы, зебры), сложная геометрическая структура (еж). Идея проста и универсальна — скрыться от потенциально опасных объектов, от которых исходит угроза. Точно также опасные патогены при проникновении в организм человека пытаются остаться незамеченными иммунной системой. Наиболее ярким представителем патогенов является вирус, который скрывается от иммунных клеток организма.

Борьба организма с вредоносными патогенами на данный момент является наиболее актуальной проблемой, так как, в частности, вирусы окружают человека повсюду и преследуют его на протяжении всей истории человечества. Некоторые вирусы вплоть до настоящего момента остаются непобежденными, а механизмы обнаружения их в организме не до конца изучены. Актуальность темы усиливается современными вызовами, такими как пандемия COVID-19, где коронавирус продемонстрировал высокую способность к уклонению от иммунного ответа.

В рамках данной работы в качестве моделируемых объектов выбраны вирусы (отражающие объекты) и иммунные клетки (излучающие объекты). Рассмотрена гипотеза о способности клеток организма взаимодействовать посредством электромагнитного излучения. Необходимо также добавить, что на основании выдвинутой гипотезы предполагается, что высокая способность к маскировке некоторых вирусных патогенов вызывается их сложной геометрической структурой.

При рассмотрении классического биологического процесса нейтрализации очага заражения в организме исследования говорят о хемотаксисе [1]. Хемотаксис в иммунологии — это направленное движение иммунных клеток, в частности лейкоцитов, к источнику химического сигнала, например, к вирусам или бактериям. Это важный процесс для локализации иммунной реакции в очаге инфекции и нейтрализации патогенов. Ключевой фигурой хемотаксиса являются сигнальные белки хемокины, они выделяются клетками-источниками в очаге воспаления. Соответственно Т-киллеры следуют по сигнальным хемокинам до очага заражения, однако все же не изучен вопрос: по какому принципу Т-киллеры выбирают клетки, которые необходимо «просканировать». Иными словами, не ясен план дальнейших действий Т-киллеров по прибытии в очаг заражения.

В подкрепление выдвинутой гипотезы необходимо привести ряд исследований, связанных с взаимодействием клеток организма посредством различного вида излучения.

Советским ученым Александром Гурвичем проводилось изучение возможности общения клеток и стимуляции жизненных процессов посредством слабого ультрафиолетового излучения [2]. Исследование выполнялось с корнями лука. Гурвич сделал вывод, что слабый ультрафиолетовый свет, испускаемый одним корнем, стимулирует клеточное деление в другом.

Следующее исследование было посвящено измерению резонансных частот живых человеческих клеток [3]. Ученые впервые смогли зафиксировать вибрации отдельных клеток молочной железы человека. Было установлено, что клетки, действительно, имеют собственные резонансные частоты — то есть они способны вибрировать подобно камертону. Некоторые из этих частот находились на границе слышимого диапазона (10–30 кГц), а другие — в ультразвуковом диапазоне (150–180 кГц).

Проведенные исследования показывают, что клетки человеческого организма чувствительны к различным видам излучения.

Вирус

Вирус моделируется в данной работе как сфера, покрытая шипами по всей поверхности, то есть, по сути, покрытая угловатыми отражающими объектами. Учитывая также выдвинутую гипотезу,

можно провести параллель с работами Уфимцева Петра Яковлевича.

Петр Яковлевич активно занимался изучением дифракции на телах сложной формы. В 1962 была выпущена его монография — «Метод краевых волн в физической теории дифракции» [4]. В этом научном труде Уфимцев описывал созданный им физико-математический алгоритм, способный подсчитать площадь рассеяния для объектов любой формы. Позже этот метод лег в основу технологий снижения заметности объектов. Существует две принципиально разных конфигурации объектов, предпочтительных для снижения заметности объекта:

1. Гладкие обтекаемые формы объектов, без резких изломов, краев и вершин, что исключает возникновение вторичной дифракции излучения, однако это означает, что, как бы ни был ориентирован объект в пространстве, часть излучения будет возвращена на детектор. Для того чтобы избежать этого, используют также различные специализированные поверхности для снижения возвращенного излучения.

2. Структуры объекта, имеющие множество краев и изломов, сконструированных таким образом, чтобы минимизировать возвращаемое излучение.

Если рассматривать данные конфигурации в приложении к вирусам, то становится ясно, что абсолютно гладких поверхностей и конфигураций вирусов не существует, а значит имеет смысл изучать только второй вариант.

Так, вирус COVID-19 представляет собой сферу с шипами на ее поверхности (шипами называют отростки на поверхности вируса). Изучив внешний вид многих других вирусов, можно прийти к выводу, что геометрическая структура сферы, покрытой шипами, является собирательным образом. Такая структура характерна для множества различных вирусов.

Именно поэтому в данной работе вирус моделируется в виде сферы, покрытой шипами, что соответствует сложной геометрической форме с высокой способностью к рассеиванию излучения.

Иммунная клетка

В качестве модели иммунной клетки выбрана сфера, которая излучает лучи во всех направлениях (графическое представление — на рисунке 1).

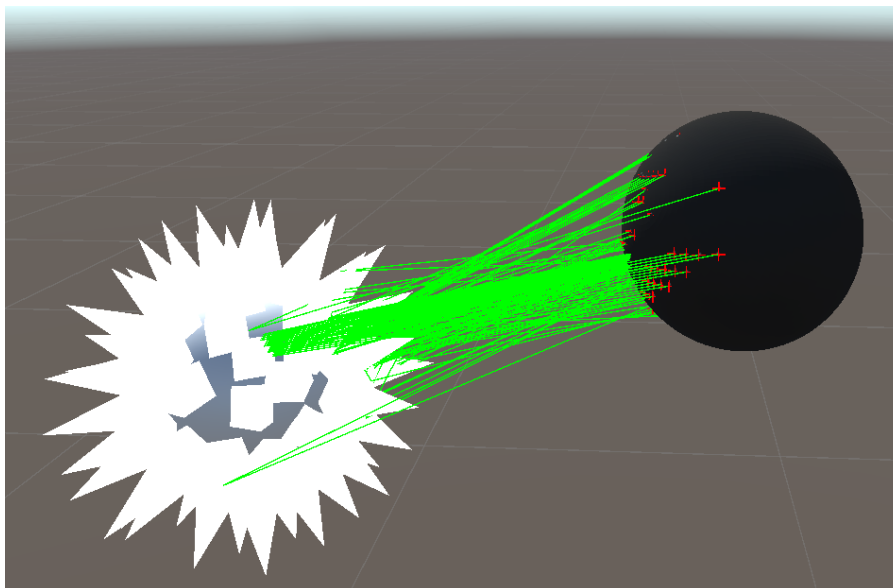


Рис. 1. Пример модели вируса (белый), иммунной клетки (черная сфера) и отражения лучей от поверхности модели вируса на поверхность иммунной клетки

Для визуального моделирования была выбрана среда разработки Unity. Размер вириона вирусной частицы COVID-19 может составлять от 60 до 140 нм, средний размер 100 нм. За единицу размера в Unity принимается 100 нм, соответственно, параметр, задающий размер сферы, может варьироваться от 0.6 до 1.4 единиц размера.

Направление каждого излучаемого луча определяется через сферические координаты:

$$\begin{cases} x = \sin(\theta) * \cos(\varphi) \\ y = \sin(\theta) * \sin(\varphi) \\ z = \cos(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

где x , y и z — это трехмерные координаты, θ и φ — сферические координаты.

Отражение от поверхности вируса рассчитывается в соответствии со стандартным законом отражения:

$$R = 2(N * I)N - I, \quad (2)$$

где R — направление отраженного луча, N — нормаль поверхности, I — направление падающего луча.

Была создана симуляционная модель и проведена серия симуляций, которая позволила собрать базу данных изображений, формируемых отраженными лучами от поверхности модели вируса на поверхность иммунной клетки.

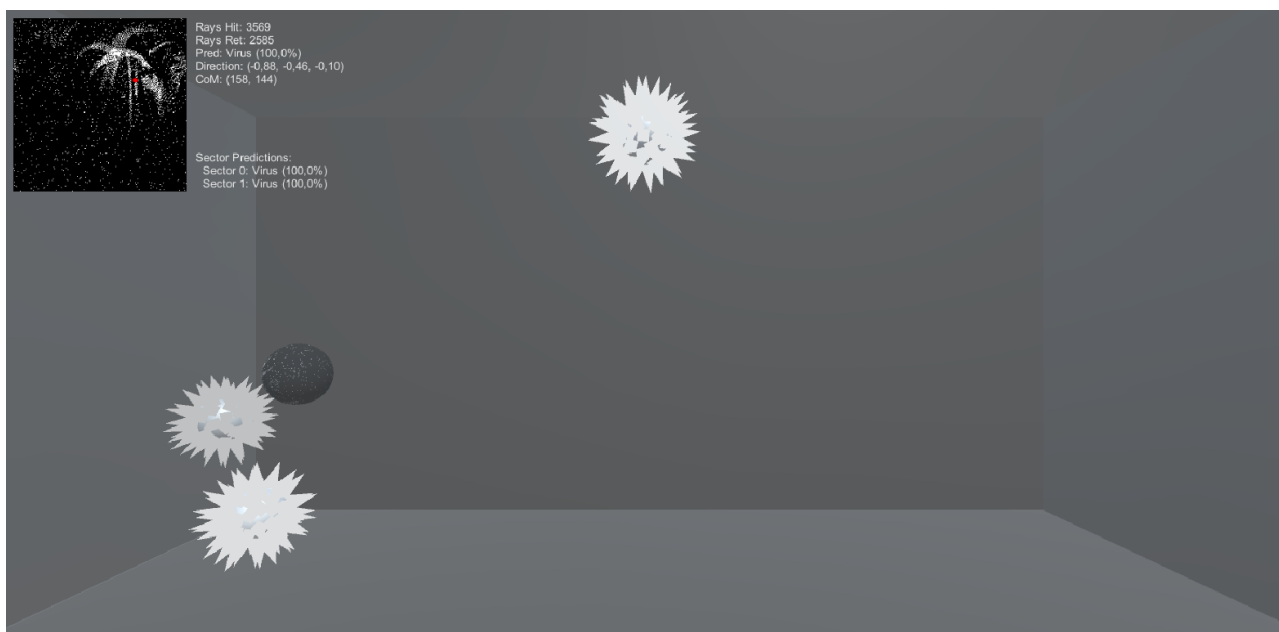


Рис. 2. Снимок экрана симуляции

В результате симуляций было собрано 1894 изображения в приведенном выше формате на рисунке 4 (дополнительно был рассчитан центр масс интенсивности отраженных лучей, попадающих на сферу иммунной клетки, данная информация была добавлена в изображения для обучения нейронной сети не только идентифицировать условный вирус, но и определять вектор направления), в разрешении 224×224 пикселя, для каждого изображения соответственно рассчитаны эталонные векторы.

Для построения картины отражений трехмерные координаты точек преобразуются в координаты развертки:

$$\begin{cases} u = 0,5 + \arctg(z/x)/(2\pi) \\ v = 0,5 - \arcsin(y) / \pi \end{cases}, \quad (3)$$

где x , y и z — трехмерные координаты точки, u и v — координаты развертки.

Затем происходит преобразование в пиксельные координаты изображения:

$$\begin{cases} x = u * (\text{ширина текстуры} - 1) \\ y = v * (\text{высота текстуры} - 1) \end{cases}, \quad (4)$$

где x , y — координаты пикселя, u и v — координаты развертки.

Коэффициент отражений, характеризующий интенсивность, вычисляется по формуле:

$$ratio = \frac{n}{m}, \quad (5)$$

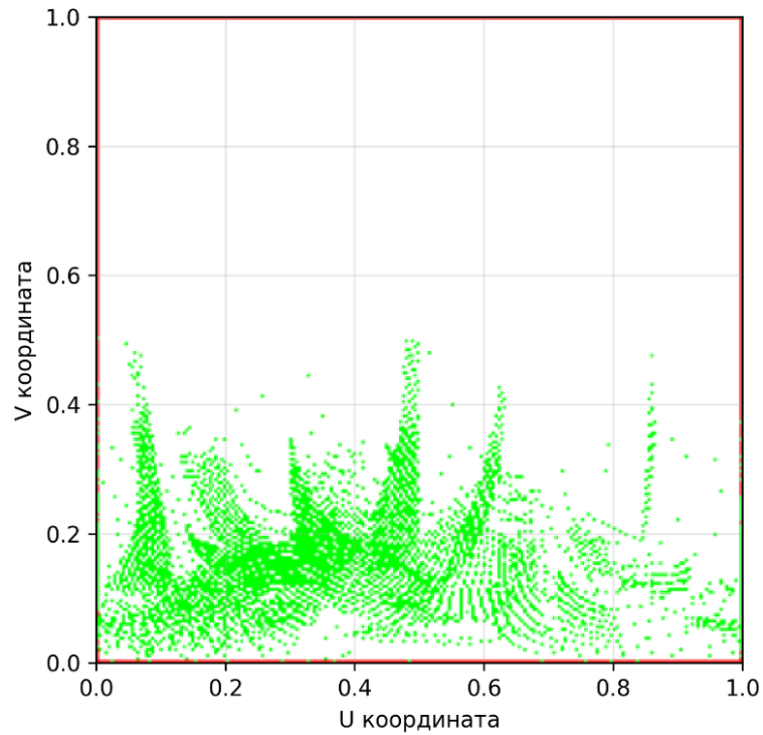


Рис. 3. Пример развертки изображения отраженного сигнала на иммунной клетке

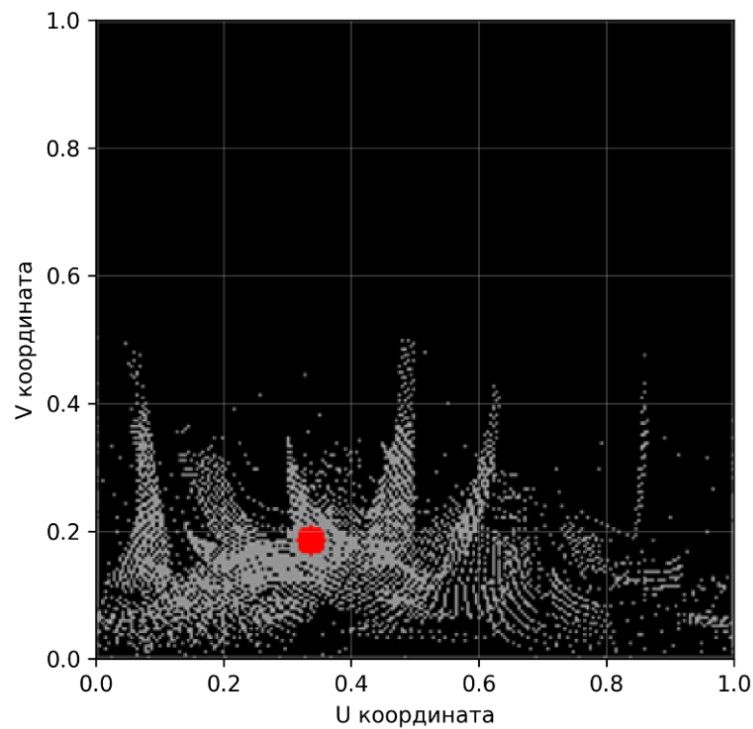


Рис. 4. Обработанное изображение для обучения искусственной нейронной сети

где ratio — коэффициент отражений, n — это количество возвращенных лучей на иммунную клетку, а m — это количество лучей, попавших на внешний объект.

Для нахождения центра масс выполняется преобразование координат изображения в трехмерные (формулы 6–7):

$$\begin{cases} v = y / (\text{height} - 1) * \pi \\ u = x / (\text{width} - 1) * 2\pi \end{cases}, \quad (6)$$

где y — это соответствующая координата точки на изображении, $height$ — это высота изображения, x — это соответствующая координата точки на изображении, $width$ — это ширина изображения.

$$\begin{cases} x = \sin(v) * \cos(u) \\ y = \sin(v) * \sin(u) \\ z = \cos(v) \end{cases}, \quad (7)$$

где u, v — координаты развертки, x, y, z — трехмерные координаты.

Далее происходит расчет взвешенных сумм (формулы 8–9):

$$\begin{cases} weightedSumX = weight * \sum_{i=0}^{n-1} x_i \\ weightedSumY = weight * \sum_{i=0}^{n-1} y_i \\ weightedSumZ = weight * \sum_{i=0}^{n-1} z_i \end{cases}, \quad (8)$$

где x, y, z — трехмерные координаты, $weight$ — вес.

$$totalWeight = \sum_{i=0}^{n-1} weight_i, \quad (9)$$

где $weight$ — вес.

Расчет координат центра масс (формулы 10–12):

$$\begin{cases} centerX = weightedSumX / totalWeight \\ centerY = weightedSumY / totalWeight \\ centerZ = weightedSumZ / totalWeight \end{cases}, \quad (10)$$

где $centerX, centerY, centerZ$ — координаты центра масс, $totalWeight$ — суммарный вес, $weightedSumX, weightedSumY, weightedSumZ$ — взвешенные суммы по соответствующим координатам.

$$\begin{cases} centerU = arctg(centerY / centerX) \\ centerV = arccos(centerZ) \end{cases}, \quad (11)$$

где $centerU, centerV$ — координаты центра масс на развертке, $centerX, centerY, centerZ$ — координаты центра масс в трехмерном пространстве.

$$\begin{cases} centerCol = (centerU / (2 * \pi)) * (width - 1) \\ centerRow = (centerV / \pi) * (height - 1) \end{cases}, \quad (12)$$

где $centerCol, centerRow$ — координаты центра масс на изображении, $centerU, centerV$ — координаты центра масс на развертке, $width, height$ — ширина и высота изображения.

Для идентификации условного вируса использовалась модель ResNet18 — это сверточная нейронная сеть, имеющая 18 слоев в глубину.

Набор данных разбивался на тренировочную, валидационную и тестовую выборки в соотношении 70:20:10 (в процентах) соответственно.

Обучение длилось 10 эпох, на каждой эпохе модель обрабатывает все тренировочные данные партиями по 16 изображений (размер батча равен 16). Скорость обучения равна 10^{-4} . Используется функция потерь Cross-Entropy Loss, стандартная для задач классификации. После каждой эпохи проводится оценка точности на валидационных данных.

В качестве функции потерь использовалась комбинированная метрика, учитывающая косинусное сходство и среднеквадратичную ошибку:

$$loss = cos_loss * \alpha + mse_loss * \beta, \quad (13)$$

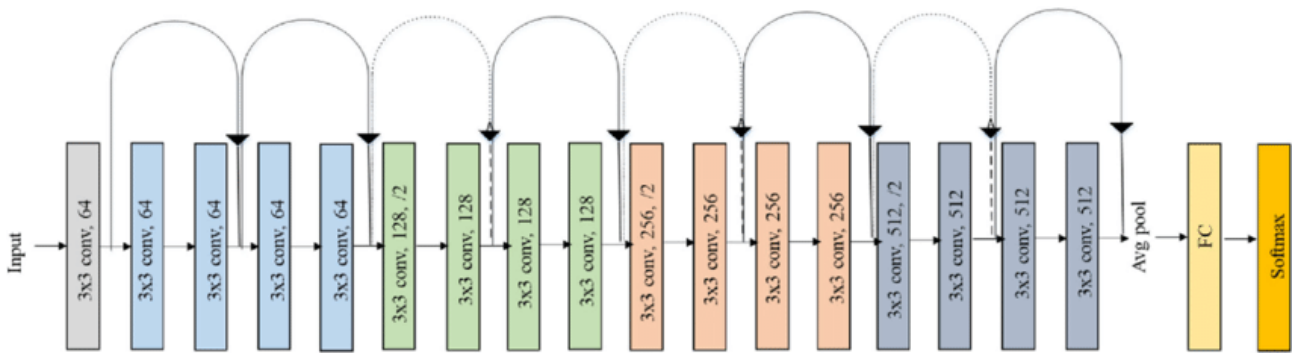


Рис. 5. Архитектура ResNet18

где \cos_loss — это потеря по косинусному сходству, α — это коэффициент вклада ошибки по косинусному сходству в итоговую ошибку, mse_loss — это среднеквадратичная ошибка, β — это коэффициент вклада среднеквадратичной ошибки в итоговую ошибку.

Результаты обучения искусственной нейронной сети были получены следующие. Средние ошибки по компонентам не превышают 0.1. Медианная ошибка угла — 5° вектора направления. Средняя ошибка угла — 7° вектора направления. По итогам обучения и тестирования на тестовой выборке модель показала точность 99%.

Реализация, указанная ранее, является упрощенным вариантом. При введении в сцену, помимо одной иммунной клетки и одного вируса, дополнительных объектов этих классов возникла проблема идентификации объектов. В таком случае на картине отражений иммунной клетки могут одновременно находиться сразу несколько объектов. В этом случае классификатор работал некорректно. Проблема была решена следующим образом: так как иммунная клетка представляет собой сферу, ее можно разбить на 8 секторов, соответственно, и развертка, то есть картина отражений, также разбивается на 8 секторов.

На рисунке 6 представлена развертка, разбитая на 8 секторов.

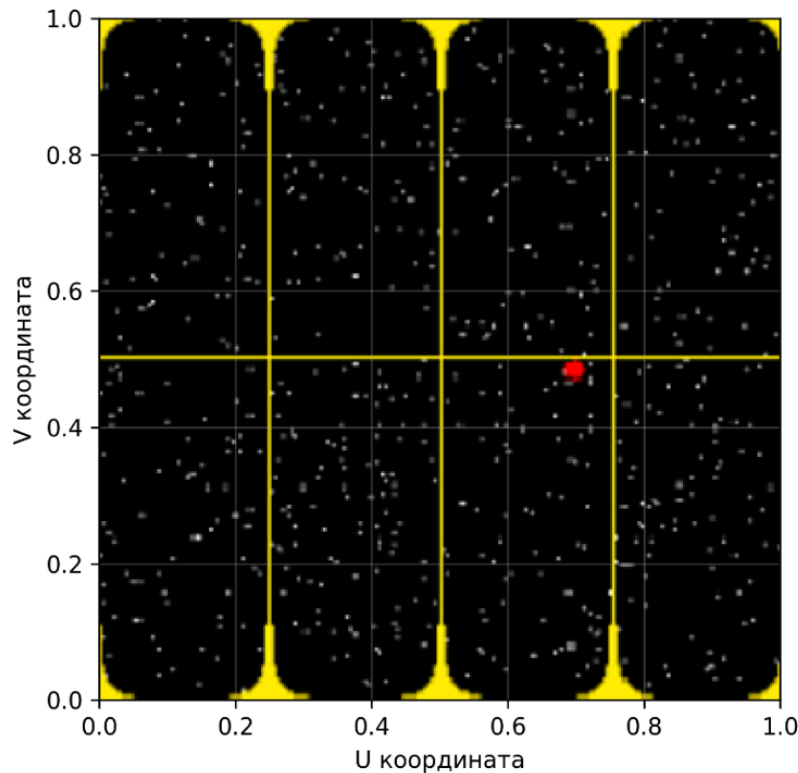


Рис. 6. Развертка, разбитая на сектора

Границы представлены для демонстрации, формирование набора данных и дальнейшее обучение нейросети происходило на изображениях без выделенных границ. Вводится также минимальный порог интенсивности для каждого отдельного сектора для того, чтобы не включать в набор данных «пустые» изображения, то есть не несущие в себе полезной для нейросети информации. Также в систему был привнесён шум, на рисунке 6 он наблюдается во всех секторах. Шум был введен для приближения задачи к реальным условиям.

Интенсивность каждого сектора рассчитывается по формуле 14:

$$intensity = \frac{activePix}{allPix}, \quad (14)$$

где *intensity* — интенсивность, *activePix* — число активных пикселей, *allPix* — число всех пикселей.

На рисунках 7–10 приведены примеры изображений в виде, в котором происходило их сохранение в базу данных.

Было собрано 385 изображений секторов для класса вирус, а также 385 изображений секторов для класса иммунная. Все изображения в черно-белом формате.

Применяемая для обучения нейросети архитектура не изменялась. По итогам обучения точность классификации 98%.

Для выявления влияния шума на точность классификации было проведено дополнительно 16 экспериментов — 16 моделей искусственных нейронных сетей, обученных на изображениях с различной степенью зашумленности. Из них 15 проводились с фиксированным уровнем шума для всех изображений. Последний эксперимент проводился с вариативным уровнем шума, то есть уровень шума определялся для каждого изображения случайно в заданных пределах. Результаты представлены в таблице.

Таблица

Результаты экспериментального исследования влияния шума на точность классификации

| № эксперимента | Шум, в % | Точность классификации, в % |
|----------------|----------|-----------------------------|
| 1 | 2 | 98.7 |
| 2 | 5 | 97.8 |
| 3 | 10 | 97.4 |
| 4 | 15 | 96.1 |
| 5 | 20 | 96.1 |
| 6 | 25 | 98.7 |
| 7 | 30 | 97.4 |
| 8 | 35 | 97.4 |
| 9 | 40 | 95.45 |
| 10 | 45 | 98.7 |
| 11 | 50 | 93.51 |
| 12 | 60 | 93.51 |
| 13 | 70 | 85.71 |
| 14 | 80 | 85.71 |
| 15 | 90 | 72.73 |
| 16 | 2-90 | 93.51 |

Данные таблицы представлены в виде графика на рисунке 11.

На рисунке 12 цифрой 1 отмечено главное окно, в котором происходит симуляция. Белые объекты на рисунке — вирусы, черный объект — иммунная клетка.

Цифрой 2 на рисунке обозначен блок вывода информации, он включает в себя: количество лучей, попавших на объекты, количество лучей, вернувшихся на иммунную клетку, предсказание нейросети классификатора, определяющего класс объекта (в данном блоке выводится информация только для самого интенсивного сектора), предсказанный вектор направления иммунной клетки, координаты центра масс.

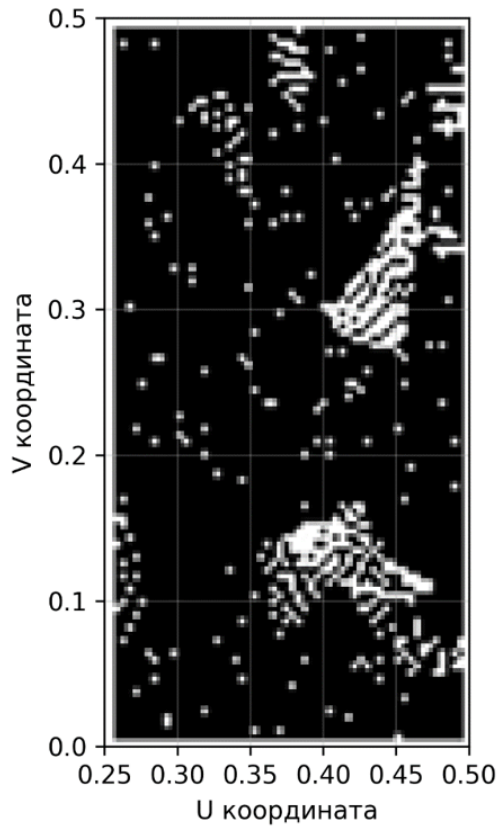


Рис. 7. Картина отражений шестого сектора, вирус

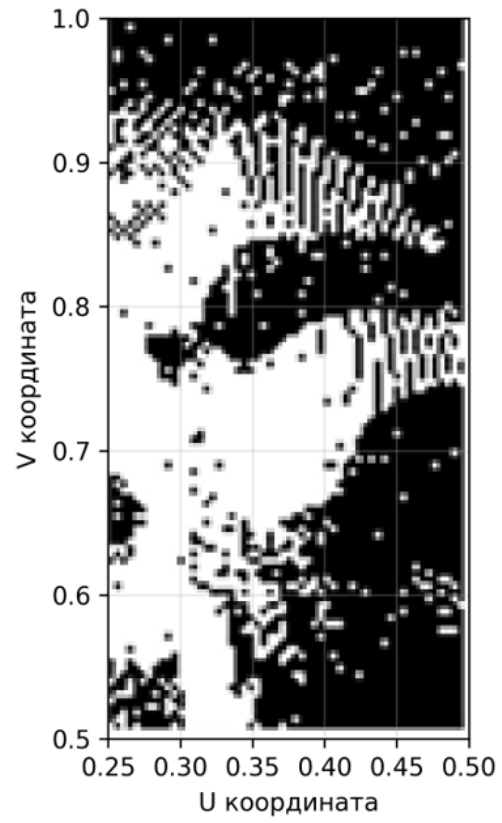


Рис. 8. Картина отражений второго сектора, иммунная клетка

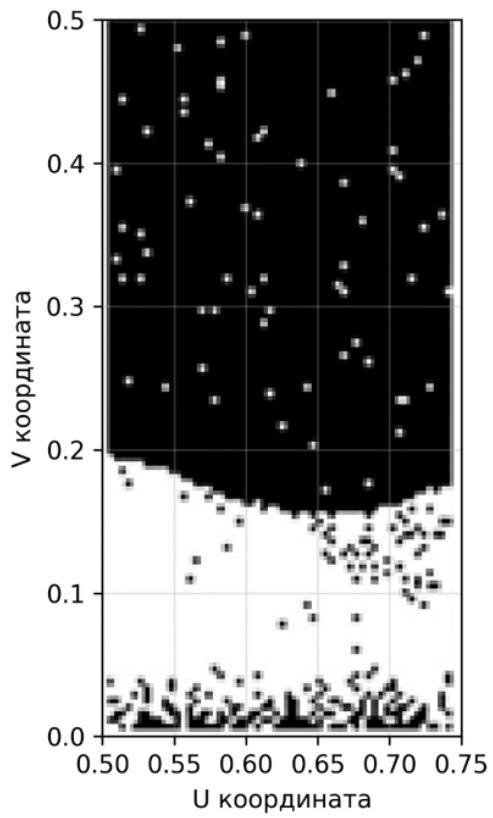


Рис. 9. Картина отражений шестого сектора, вирус

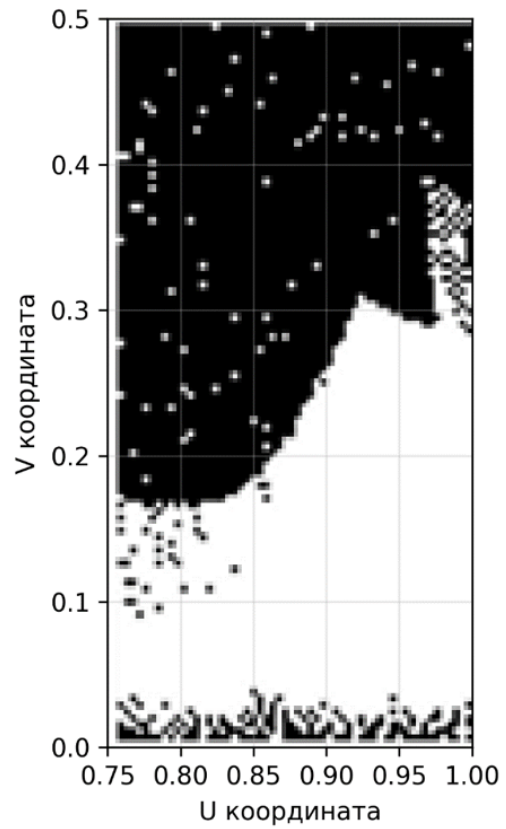


Рис. 10. Картина отражений третьего сектора, иммунная клетка

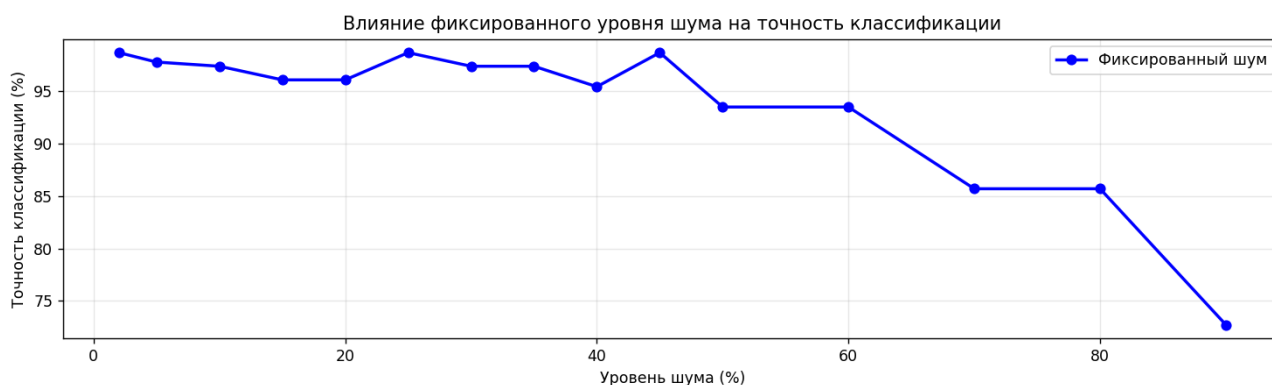


Рис. 11. Зависимость точности классификации от уровня шума

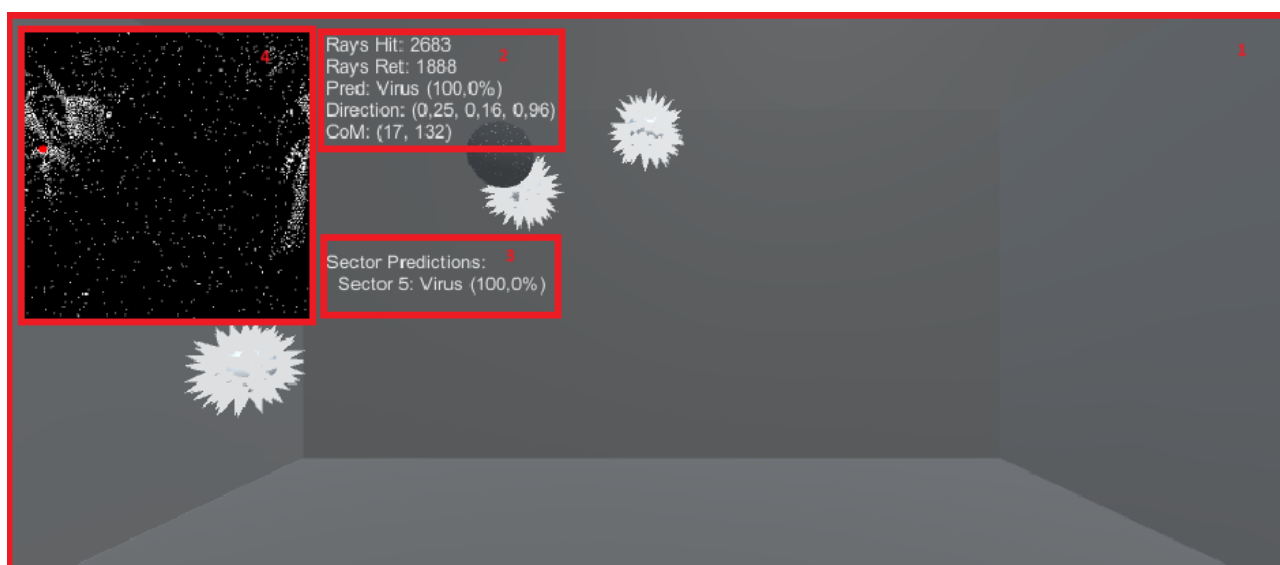


Рис. 12. Окно симуляции

Цифрой 3 отмечен блок, в котором выводится информация о предсказаниях классификатора для каждого сектора.

Цифрой 4 на рисунке отмечена картина отражений, она обновляется на каждом кадре.

Заключение

Одной из сложнейших задач является описание процессов, связанных с работой иммунной системы. Последние исследования различных групп ученых показывают, что клетка организма излучает сигнал в различных диапазонах. Слепой поиск объекта по примеру задачи о случайном блуждании малоэффективен. Изучение и моделирование новых подходов к идентификации, механизмов поиска на клеточном уровне имеет большое практическое значение для исследователей и специалистов в области биоинформатики. Особенностью работы является поиск механизмов взаимодействия клеточных объектов, основанных на простых и эффективных алгоритмах.

Выработанные методы и подходы продемонстрировали высокую эффективность при моделировании процесса охоты. Также необходимо зафиксировать точность нейросетевой модели классификатора, которая составляет 98%, погрешность нейросетевой модели для определения вектора направления, которая составляет 8° , а также погрешность вычисляемого расстояния до вируса, которая составляет 16%. В случае определения расстояния важно брать во внимание некорректность поставленной задачи, так как она не имеет единственного решения. Для точного определения расстояния необходимы два источника и приемника излучения, расположенные в разных точках пространства, однако данная задача решалась в условиях одного источника и приемника излучения, которым является иммунная клетка. Погрешность в 16% обуславливается движением вируса в пространстве и является допустимой в рамках данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудков А. В., Борхсениус С. Н., Скарлато С. О., Ермилова Е. В., Залуцкая Ж. М., Лапина Т. В. *Подвижность и поведение микроорганизмов. II. Эукариоты*. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета; 2010. 188 с.
2. Гурвич А. А. *Проблема митогенетического излучения как аспект молекулярной биологии*. СПб.: Медицина; 1968. 242 с.
3. Puerto-Belda V., Ruz J., Millá C., Cano Á., Yubero M., García S., Kosaka M., Calleja M., Tamayo J. Measuring Vibrational Modes in Living Human Cells. *PRX Life*. 2024;2(1):013003. DOI: <https://doi.org/10.1103/PRXLife.2.013003>.
4. Уфимцев П. Я. *Метод краевых волн в физической теории дифракции*. М.: Советское радио; 1962. 124 с.

ИНТЕГРАЛЫ ДВИЖЕНИЯ НА ЭКСТРЕМАЛЯХ УРАВНЕНИЯ ЭЙЛЕРА–ЛАГРАНЖА

В. П. Кошечев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал «Стрела», г. Жуковский, Московская обл., Российская Федерация✉ *koshcheev1@yandex.ru*

Аннотация: ранее было показано, что с помощью уравнения Якоби может быть построена цепочка замкнутых систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих эволюцию моментов. Показано, что определители Вронского для фундаментальных матриц замкнутых систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка являются интегралами движения на экстремалиях уравнения Эйлера–Лагранжа.

Ключевые слова: уравнение Эйлера–Лагранжа, уравнение Якоби, цепочка замкнутых систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, интегралы движения на экстремалиях.

Для цитирования: Кошечев В. П. Интегралы движения на экстремалиях уравнения Эйлера–Лагранжа. *Успехи кибернетики.* 2025;6(3):17–19.

Поступила в редакцию: 11.07.2025.

В окончательном варианте: 01.09.2025.

INTEGRALS OF MOTION ON THE EXTREMA OF THE EULER–LAGRANGE EQUATION

V. P. Koshcheev

Moscow Aviation Institute (National Research University), Strela Branch, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation✉ *koshcheev1@yandex.ru*

Abstract: it was previously shown that a chain of closed systems of first-order ordinary differential equations describing the evolution of moments can be constructed using the Jacobi equation. The Wronskians for the fundamental matrices of these closed systems are integrals of motion along the extremals of the Euler–Lagrange equation.

Keywords: Euler–Lagrange equation, Jacobi equation, chain of closed systems of ordinary differential equations of the first order, integrals of motion on extremals.

Cite this article: Koshcheev V. P. Integrals of Motion on the Extrema of the Euler–Lagrange Equation. *Russian Journal of Cybernetics.* 2025;6(3):17–19.

Original article submitted: 11.07.2025.

Revision submitted: 01.09.2025.

В [1] было показано, что с помощью уравнения Якоби может быть построена цепочка замкнутых систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих эволюцию моментов.

Пусть нам дано уравнение Эйлера–Лагранжа

$$\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = 0, \quad (1)$$

где $L = L(t, x, \dot{x})$ – функция Лагранжа; $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$.

Следуя [2], запишем

$$L(t, x + \delta x, \dot{x} + \delta \dot{x}) = L(t, x, \dot{x}) + \delta L, \quad (2)$$

$$\text{где } \delta L = \left[\frac{d}{d\alpha} L(t, x + \alpha \delta x, \dot{x} + \alpha \delta \dot{x}) \right]_{\alpha=0} = \frac{\partial L(t, x, \dot{x})}{\partial x} \delta x + \frac{\partial L(t, x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} \delta \dot{x}.$$

Подставим (2) в (1) и получим уравнение Якоби

$$\frac{\partial \delta L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial \delta L}{\partial \dot{x}} = 0,$$

которое записывают в виде [2]

$$\left(L_{xx} - \frac{dL_{x\dot{x}}}{dt} \right) \delta x - \frac{d}{dt} (L_{\dot{x}\dot{x}} \delta \dot{x}) = 0. \quad (3)$$

Если $L = \frac{m\dot{x}^2}{2} - U(x, t)$, то уравнения Эйлера–Лагранжа и Якоби имеют вид соответственно

$$U_x + m\ddot{x} = 0, \quad (4)$$

$$U_{xx}\delta x + m\delta\ddot{x} = 0. \quad (5)$$

Видно, что с помощью уравнения Якоби (5) могут быть построены замкнутые системы дифференциальных уравнений первого порядка для трех новых динамических переменных

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \overline{\delta x^2} \\ \overline{\delta x \delta \dot{x}} \\ \overline{\delta \dot{x}^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ -\frac{U_{xx}}{m} & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2U_{xx}}{m} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\delta x^2} \\ \overline{\delta x \delta \dot{x}} \\ \overline{\delta \dot{x}^2} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $\overline{\delta x^2} = (\delta x)^2$; $\overline{\delta \dot{x}^2} = (\delta \dot{x})^2$; $\overline{\delta x \delta \dot{x}} = (\delta x \delta \dot{x})$.

Рекуррентная формула имеет вид

$$\frac{d}{dt} \overline{\delta x^k \delta \dot{x}^s} = -s \frac{U_{xx}}{m} \overline{\delta x^{k+1} \delta \dot{x}^{s-1}} + k \overline{\delta x^{k-1} \delta \dot{x}^{s+1}}, \quad k + s = n. \quad (7)$$

Если $m\delta\dot{x} = \delta p_x$, то система уравнений (6) с точностью до обозначений совпадает с системой уравнений для средних квадратов квантовых флуктуаций координаты и импульса [3]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \overline{\delta \hat{x}^2} = \frac{2}{m} \overline{\delta \hat{x} \delta \hat{p}_x} \\ \frac{d}{dt} \overline{\delta \hat{x} \delta \hat{p}_x} = \frac{1}{m} \overline{\delta \hat{p}_x^2} - U_{xx} \overline{\delta \hat{x}^2} \\ \frac{d}{dt} \overline{\delta \hat{p}_x^2} = -2U_{xx} \overline{\delta \hat{x} \delta \hat{p}_x}, \end{cases} \quad (8)$$

начальные условия к которой удовлетворяют соотношениям неопределенностей Гейзенберга

$$\begin{aligned} \overline{(\delta \hat{x} \delta \hat{p}_x)^2} \Big|_{t=0} &\leq \overline{(\delta \hat{x}^2)} \Big|_{t=0} \cdot \overline{(\delta \hat{p}_x^2)} \Big|_{t=0}, \\ \overline{(\delta \hat{x}^2)} \Big|_{t=0} \cdot \overline{(\delta \hat{p}_x^2)} \Big|_{t=0} &\geq \frac{\hbar^2}{4}. \end{aligned} \quad (9)$$

Системы дифференциальных уравнений (6)–(7) можно записать в виде [4]

$$\frac{dW}{dt} = AW, \quad (10)$$

где W — фундаментальная матрица решений, а A — матрица коэффициентов при неизвестных.

С помощью тождества Якоби [4] можно установить зависимость между определителем Вронского в начальный и конечный моменты времени

$$|W(t)| = |W(t_0)| \exp \left(\int_{t_0}^t SpA dt \right), \quad (11)$$

где $SpA = 0$ — сумма диагональных элементов фундаментальных матриц дифференциальных уравнений (6)–(8) при $n = 2, 3, \dots$ равна нулю.

Таким образом, определители Вронского для фундаментальных матриц дифференциальных уравнений (6)–(8) являются интегралами движения на экстремальных уравнения Эйлера–Лагранжа (4).

Построим уравнение Лиувилля для уравнения Якоби (5)

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \delta \dot{x} \frac{\partial P}{\partial \delta x} - \frac{U_{xx}}{m} \delta x \frac{\partial P}{\partial \delta \dot{x}} = 0. \quad (12)$$

Решением этого уравнения является функция распределения флуктуаций координаты и скорости

$$P(\delta x, \delta \dot{x}, t) = \frac{1}{2\pi \cdot \Delta} \cdot \exp \left[-\frac{(\delta \dot{x})^2 \overline{\delta x^2} + (\delta x)^2 \overline{\delta \dot{x}^2} - 2(\delta x \delta \dot{x}) \overline{\delta x \delta \dot{x}}}{2\Delta^2} \right], \quad (13)$$

где $\Delta^2 = \overline{\delta x^2 \delta \dot{x}^2} - \overline{\delta x \delta \dot{x}}^2$, если вторые моменты $\overline{\delta x^2}$; $\overline{\delta \dot{x}^2}$; $\overline{\delta x \delta \dot{x}}$ удовлетворяют системе уравнений (6).

С помощью системы уравнений (6) можно показать, что

$$\frac{d\Delta^2}{dt} = 0. \quad (14)$$

Система уравнений (9) с точностью до обозначений совпадает с системой уравнений для средних квадратов квантовых флуктуаций координаты и импульса [3, 4]. Так как из формулы (10) следует $\Delta^2(t) = const$, то для волновых функций, минимизирующих соотношение неопределенностей Гейзенберга, получим

$$\left(\overline{\delta \hat{x}^2}\right) \left(\overline{\delta \hat{p}_x^2}\right) - \left(\overline{\delta \hat{x} \delta \hat{p}_x}\right)^2 = \frac{\hbar^2}{4}. \quad (15)$$

Таким образом, функция распределения (13) локализована в окрестности классической траектории, размер которой — в фазовом пространстве порядка постоянной Планка. Уравнение (15) определяет предельно малое значение эмиттанса пучка заряженных частиц $\sim \hbar$, что имеет важное значение в ускорительной технике [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кощев В. П. Классические и квантовомеханические поправки к решению уравнения Эйлера–Лагранжа. *Успехи кибернетики*. 2025;6(2):44–46.
2. Гельфанд И. М., Фомин С. В. *Вариационное исчисление*. Москва: Физматгиз; 1961.
3. Багров В. Г., Белов В. В., Кондратьева М. Ф. Квазиклассическое приближение в квантовой механике. Новый подход. *Теоретическая и математическая физика*. 1994;98(1):48–55.
4. Гантмахер Ф. Р. *Теория матриц*. Москва: Наука; 1966.
5. Левичев Е. Б. Накопители электронов с малым эмиттансом. *Успехи физических наук*. 2018;188(1): 31–54.

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗМЕНЕНИЯ ЦЕНЫ АКЦИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НЕФИНАНСОВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**В. А. Востров^{1,a}, М. А. Гореликов^{1,2,b}, М. Е. Амелин^{3,c}**¹ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация³ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1647-4416>, ✉ valeriy-v-mail@mail.ru^b ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6196-5735>, gorelikov.matvey@mail.ru^c ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9831-2112>, makc_amelin@mail.ru

Аннотация: в статье предложена концепция проектирования интеллектуальной модели на основе нейронных сетей для проактивного управления финансовыми рисками нефинансовых компаний. Модель предполагает интеграцию данных финансовой отчетности с сайтов раскрытия информации, новостного потока из верифицированных источников и рыночных данных через API Московской биржи (MOEX), который предоставляет различные типы данных: исторические котировки, сделки, информация о позициях участников торгов и другие. Проект основан на анализе современного опыта и предполагает в том числе выявление предпосылок событий, способных оказать влияние на динамику цен на выбранные финансовые инструменты. В статье представлено обоснование выбранной архитектуры и решения с учетом специфики российского рынка.

Ключевые слова: методы искусственного интеллекта, интеллектуальные модели финансового риск-менеджмента, управление инвестициями на базе искусственного интеллекта, искусственный интеллект в сфере финансов.

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: Востров В. А., Гореликов М. А., Амелин М. Е. Концепция модели прогнозирования признаков изменения цены акций, предназначенной для управления рисками нефинансовых организаций. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):20–26.

Поступила в редакцию: 08.07.2025.

В окончательном варианте: 28.08.2025.

A CONCEPT OF A MODEL FOR FORECASTING INDICATORS OF SHARE PRICE CHANGES TO MANAGE RISK IN NON-FINANCIAL ORGANIZATIONS**V. A. Vostrov^{1,a}, M. A. Gorelikov^{1,2,b}, M. E. Amelin^{3,c}**¹ Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation² LETI Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russian Federation³ Surgut State University, Surgut, Russian Federation^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1647-4416>, ✉ valeriy-v-mail@mail.ru^b ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6196-5735>, gorelikov.matvey@mail.ru^c ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9831-2112>, makc_amelin@mail.ru

Abstract: we developed a framework for an intelligent model based on neural networks to support proactive management of financial risks in non-financial companies. We collected financial reporting data from disclosure websites, news feeds from verified sources, and market data through the Moscow Exchange (MOEX) API, which provides historical quotes, trades, positions of trading participants, and other information. We analyzed current practices and identified prerequisites for events that may influence the price dynamics of selected financial instruments. We designed and justified the model’s architecture and selected solutions, taking into account the specific characteristics of the Russian market. The framework

integrates multiple data sources to improve risk prediction and support decision-making in financial risk management.

Keywords: artificial intelligence methods, intelligent financial risk management models, AI-based investment management, artificial intelligence for finance.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Vostrov V. A., Gorelikov M. A., Amelin M. E. A Concept of a Model for Forecasting Indicators of Share Price Changes to Manage Risk in Non-Financial Organizations. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):20–26.

Original article submitted: 08.07.2025.

Revision submitted: 28.08.2025.

Введение

Управление финансовыми рисками в нефинансовых компаниях приобретает критическую важность в условиях глобальной экономической нестабильности, включая санкционное давление, волатильность сырьевых рынков и изменения в российской регуляторной среде. Традиционные подходы к анализу рисков, основанные на финансовых коэффициентах (ликвидности, рентабельности, долговой нагрузки), ограничены задержками в публикации данных (1–3 месяца), их неоднородностью и недостаточной информативностью для раннего выявления угроз. Также стандартные методы не позволяют с необходимой скоростью учитывать влияние регуляторных изменений, например, повышение налогов, на стоимость активов [1]. Косвенные индикаторы, такие как новостные сообщения или динамика биржевых котировок, в большинстве случаев опережают официальную отчетность, предоставляя ценные сигналы о потенциальных рисках [2].

Помимо собственных результатов деятельности компании, значительное влияние на финансовое положение, а значит, и стоимость ценных бумаг эмитентов оказывают экзогенные факторы, важнейшим из которых являются решения государственных органов. Так, например, с 2025 года правительство повысило налог на прибыль индивидуально для ПАО «Транснефть» до 40%, что в день публикации этой новости в ноябре 2024 года вызвало падение акций на 8–9% (рис. 1) из-за ожидаемого сокращения дивидендов с 200 рублей до 156 рублей на акцию [3]. Аналогично увеличение налога на добычу полезных ископаемых (НДПИ) для ПАО «Газпром» с 2023 года на 600 млрд рублей ежегодно усилило финансовую нагрузку на компанию, что привело к отказу от дивидендов за 2023 год и снижению котировок акций к ноябрю 2024 года. Предпосылки таких решений — дефицит государственного бюджета, геополитические факторы, потребности в финансировании социальных программ — часто проявляются в новостном потоке задолго до их реализации, что демонстрирует необходимость их мониторинга для управления рисками.

Для эффективного управления финансовыми рисками необходима автоматизация процессов сбора и анализа данных. Традиционные подходы к автоматизации управления рисками, основанные на статистических методах ARIMA или GARCH, демонстрируют ограниченную эффективность при работе с нелинейными зависимостями, мультимодальными данными и неструктурированными источниками, такими как новостные потоки. Современные методы искусственного интеллекта, в частности нейронные сети, например многоуровневые LSTM, позволяют преодолеть эти ограничения, обеспечивая точное прогнозирование и выявление скрытых факторов риска [5]. При этом консолидация в единый программный комплекс статистической модели и модели искусственного интеллекта позволит объединить их преимущества. Программный комплекс на основе нейронных сетей и статистических моделей сможет интегрировать данные с официальных ресурсов для раскрытия отчетности компаний, API MOEX и новостные потоки для анализа косвенных признаков рисков резкого изменения цены актива и прогнозирования ее дальнейшей динамики.

В настоящей статье представлена концепция программного комплекса для автоматизированного анализа косвенных неспецифических превентивных признаков изменения финансовых показателей компаний и управления финансовыми рисками нефинансовых организаций. Комплекс объединяет статистические модели (ARIMAX, GARCH) и нейросетевые подходы (многоуровневая LSTM) для про-



Рис. 1. Котировки акций ПАО «Транснефть» [4]

гнозирования цен биржевых активов, оценки волатильности и формирования рекомендаций по минимизации рисков.

Задачи программного комплекса

Основные задачи, на решение которых направлен комплекс, включают в себя автоматизацию аналитических процессов для сокращения времени принятия управленческих решений и минимизации ошибок; выявление скрытых факторов риска с использованием нейронных сетей для обнаружения неявных зависимостей; интеграцию многоканальных данных, включая финансовые отчеты, рыночные данные и новостные потоки; поддержку проактивного принятия решений через сценарное тестирование; обеспечение масштабируемости и гибкости для адаптации к различным отраслям.

Данные и их источники

Предполагается, что в работе программного комплекса будут использоваться данные из следующих источников: платформа e-disclosure.ru, API Московской биржи (MOEX), новостных источников и макроэкономические индикаторы, публикуемые государственными органами.

Одним из важнейших факторов, оказывающих непосредственное влияние на динамику активов, являются финансовые показатели их эмитентов, которые собираются программным комплексом из официально раскрываемой отчетности на платформе e-disclosure.ru, предоставляющей публичные данные российских эмитентов. Рыночные данные (котировки ценных бумаг, объемы торгов и значения индексов) извлекаются через интерфейс API Московской биржи, обеспечивающий доступ к реальным данным в формате JSON. Новостные потоки анализируются на основе верифицированных источников, например, поискового интерфейса портала РБК, с которого возможно получение данных в формате JSON. Макроэкономические индикаторы, включая цены на нефть, золото, валютные курсы и уровень инфляции, получают из открытых источников, таких как Банк России и Росстат.

Для анализа изменения рыночных настроений и регуляторных изменений создается специализированный словарь терминов, включающий ключевые слова, наиболее часто встречающиеся в сообщениях, за которыми следуют ощутимые движения цен на соответствующие активы, например, «налоговое законодательство», «санкции», «регулирование рынков», «ожидаются убытки», «рост прибыли», «снижение ставок» и т.п. Этот словарь используется для фильтрации новостей, связанных с потенциальными изменениями настроений на рынке и изменений в законодательстве, которые могут повлиять на стоимость активов. Данные собираются в реальном времени или с заданной периодичностью, обеспечивающей актуальность прогнозов.

Анализ и трансформация данных

Для обучения LSTM-модели необходим согласованный временной ряд, в котором одна и та же календарная сетка содержит цену анализируемого актива, ключевые макроиндикаторы и объем торгов. Собранные данные подвергаются тщательной предобработке в целях обеспечения их пригодности для моделирования. Временные ряды цен нормализуются с использованием min-max масштабирования в диапазоне [0, 1], чтобы устранить влияние различных масштабов. Пропущенные значения заполняются методом линейной интерполяции, а для устранения нестационарности применяется дифференцирование первого порядка или логарифмирование. Для проверки стационарности рядов используется тест Дики–Фуллера [6].

Новостные тексты преобразуются в векторные представления с помощью русифицированной модели BERT [7] — RuBERT, позволяющей извлечь тональность (положительная, нейтральная, отрицательная) и ключевые темы. Для анализа значимых факторов применяется фильтрация текстов по словарю, что позволяет выделить новости, коррелирующие с анализируемым активом, а также учитывать эмоционально-информационный фон, влияющий на рыночные настроения.

Также создаются дополнительные признаки для повышения информативности данных:

- лаги цен за определенное количество торговых дней;
- скользящие средние;
- технические индикаторы: RSI (Relative Strength Index), MACD (Moving Average Convergence Divergence);
- макроэкономические показатели: цены на нефть, золото, курсы валют, инфляция, фондовые индексы.

Эти признаки формируют входной тензор для нейросетевой модели размером 10×5 (10 дней, 5 показателей). Текстовые данные агрегируются в виде векторов размером 768 (выход RuBERT), которые интегрируются с числовыми данными.

Построение моделей

Как указано выше, описываемый программный комплекс включает два аналитических модуля: статистический и нейросетевой.

Статистические подходы характеризуются тем, что они математически обоснованы, устойчивы при малом объеме данных и не требуют больших вычислительных ресурсов, что важно для регулярных обновлений. Однако их точность падает с увеличением горизонта прогноза, а методы машинного обучения, такие как нейронные сети, частично решают эту проблему [8, 9].

Включение в программный комплекс модели ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) и ее расширения ARIMAX (с экзогенными переменными) обусловлено способностью эффективно моделировать временные ряды с учетом автокорреляции и трендов [10]. В отличие от простых методов (скользящее среднее или экспоненциальное сглаживание) ARIMA учитывает авторегрессионные и скользящие средние компоненты, а также дифференцирование для приведения нестационарных рядов к стационарным, что позволяет лучше улавливать сложные зависимости в данных, а ARIMAX при этом добавляет экзогенные переменные (например, экономические индикаторы или новости) и позволяет их учитывать с временными лагами [10–14].

В программном комплексе статистическая модель используется для прогнозирования краткосрочных отклонений цен от их среднего значения. ARIMAX моделирует запаздывающее влияние внешних факторов на цену актива, расширяя горизонт прогноза, работает со стационарными и нестационарными рядами после их преобразования, а экзогенные переменные (например, экономические индикаторы) влияют на целевую переменную, но слабо от нее зависят. Их релевантность подтверждается смысловой и статистической связью. Будущие значения экзогенных параметров обычно неизвестны, а их воздействие имеет лаги.

В предлагаемом подходе формирования краткосрочных прогнозов с использованием модели ARIMAX общий горизонт превышает краткосрочный за счет регулярного переобучения с учетом обновленных данных. Отбор экзогенных переменных начинается с корреляционного анализа и теста Грейнджера для определения лагов. Выбираются переменные с максимальной корреляцией и лагами, горизонт краткосрочного прогноза равен минимальному лагу. Также предполагается переобучение ARIMAX с периодичностью, равной горизонту прогноза, с адаптацией модели к текущим данным и внешним факторам.

При выборе модели искусственного интеллекта для программного комплекса были приняты во внимание следующие факторы. LSTM (Long Short-Term Memory) с ее механизмами памяти эффективно моделирует длительные временные зависимости в финансовых данных, превосходя базовые RNN, которым свойственна проблема исчезающего градиента [15], и CNN, ориентированные на пространственные, а не последовательные данные. Также LSTM легко адаптируется к резким колебаниям рынка, в отличие от трансформеров, которые требуют больших вычислительных ресурсов и больших данных для схожей точности [16].

Кроме того, LSTM легко сочетается с анализом настроений (например, через LLM или RuBERT) для учета новостей, улучшая прогнозы [17]. Это преимущество перед CNN, не предназначенными для последовательного анализа текста, и трансформерами, хотя те и превосходят LSTM в скорости обработки больших текстов.

В отличие от трансформеров, требующих больших объемов данных, LSTM демонстрирует хорошие результаты на умеренных наборах финансовых данных [18].

Хотя трансформеры и оптимизированы для параллельных вычислений на GPU, LSTM также эффективно использует GPU, но с меньшими требованиями к памяти, что делает ее практичной для системы с многошаговым прогнозированием [19].

Учитывая представленные данные, можно сделать вывод, что LSTM является оптимальной моделью для включения в программный комплекс.

Поток данных

Диаграмма на рисунке 2 отображает потоки данных между системами и базами данных рассматриваемого программного комплекса.

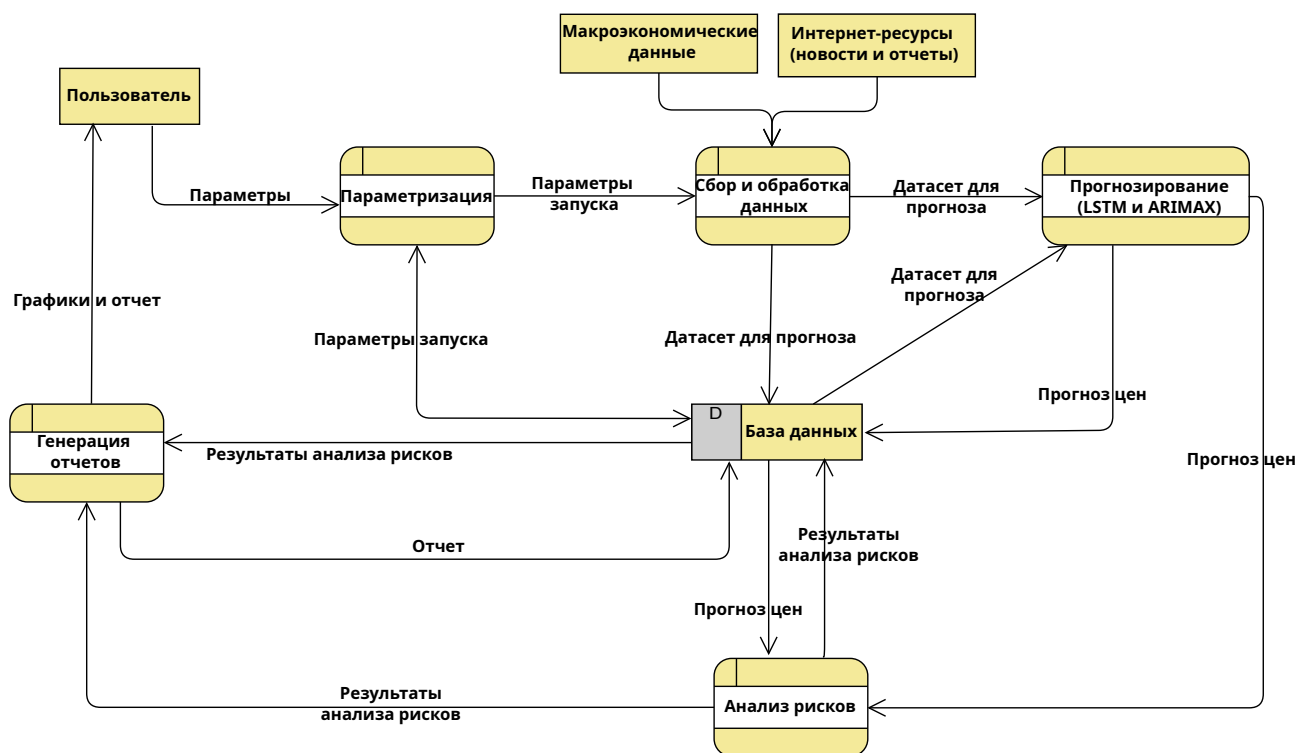


Рис. 2. Диаграмма потока данных в программном комплексе

Ключевыми элементами системы являются входные/выходные данные, точки хранения и сбора данных. Пользователь программного комплекса задает исходные настройки: выбирает активы и период. Эти данные попадают в блок «Параметризация» и сохраняются в базе.

Далее в блоке «Сбор и обработка данных», куда загружаются данные о валютных курсах, макроэкономические показатели и новости, осуществляется их очистка и ввод в таблицу. Готовый набор признаков вновь записывается в базу. Нейросеть тональности анализирует новости и помечает их как позитивные, негативные или нейтральные. LSTM-модель берет эти метки вместе с числовыми данными и строит прогноз цен, который направляется в базу данных.

Блок «Анализ рисков» получает из базы данных прогнозные ряды и проверяет показатели на соответствие заданным пределам. Его выводы и метрики риска сохраняются и передаются в модуль «Генерация отчетов».

Модуль отчетов создает графики и формирует итоговый файл с рекомендациями, после чего пользователь получает отчет и при необходимости проводит сценарный анализ, меняя исходные параметры.

В результате в базе данных формируется полный набор: параметры запуска, очищенные данные, прогнозы, расчет рисков и готовый отчет.

Заключение

Проведенный анализ исследований в области разработки предиктивных систем подтверждает эффективность гибридного подхода. Комбинация нейросетевой и статистической моделей направлена на улучшение точности прогнозирования по сравнению с отдельными моделями [20]. Интеграция в структуру программного комплекса модуля анализа текстовых данных позволит повысить эффективность комплекса за счет учета рыночных настроений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhu X., Wang Y., Li J. What Drives Reputational Risk? Evidence from Textual Risk Disclosures in Financial Statements. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2022;9(1). DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01341-y>.
2. Ristolainen K., Roukka T., Nyberg H. A Thousand Words Tell More than Just Numbers: Financial Crises and Historical Headlines. *Journal of Financial Stability*. 2024;70:101209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2023.101209>.
3. Что будет с акциями «Транснефти» в случае повышения налогов: прогнозы экспертов. *РБК*. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/quote/news/article/673b29719a7947c91e6131b0>.
4. Данные торгового терминала Trading View о стоимости акций ПАО «Транснефть». Режим доступа: <https://ru.tradingview.com/chart/YNS9trTO/?symbol=RUS%3ATRNF#order>.
5. Fischer T., Krauss C. Deep Learning with Long Short-Term Memory Networks for Financial Market Predictions. *European Journal of Operational Research*. 2018;270(2):654–669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.054>.
6. Dickey D. A., Fuller W. A. Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*. 1979;74(366):427–431. DOI: <https://doi.org/10.2307/2286348>.
7. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-Training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *Proceedings of NAACL-HLT 2019*. 2019:4171–4186. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1810.04805>.
8. Нильсен Э. *Практический анализ временных рядов. Прогнозирование со статистикой и машинное обучение* / пер. с англ. СПб.: ООО «Диалектика»; 2021. 544 с.
9. Брюс П., Брюс Э., Гедек П. *Практическая статистика для специалистов Data Science* / пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург; 2021. 352 с.
10. Box G. E. P., Jenkins G. M. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day; 1976. 589 p. Режим доступа: <https://djvu.online/file/DUly3RuKcHT1P?ysclid=mchob73nei436849235>.
11. Волков Н. Модели вида ARIMA. *Яндекс Образование*. Режим доступа: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/modeli-vida-arima>.
12. Gujarati D. N. *Basic Econometrics*. 4th ed. New York: The McGraw-Hill Companies; 2004. 1002 p.
13. Davidson R., MacKinnon J. G. *Econometric Theory and Methods*. Oxford University Press; 2004. 765 p.
14. *ARIMA Model – Complete Guide to Time Series Forecasting in Python*. Режим доступа: <https://www.machinelearningplus.com/time-series/arima-model-time-series-forecasting-python/>.
15. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997;9(8):1735–1780. Режим доступа: <https://www.bioinf.jku.at/publications/older/2604.pdf>.
16. Hinton G. E., Srivastava N., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. R. Improving Neural Networks by Preventing Co-adaptation of Feature Detectors. 2012. *arXiv:1207.0580*. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1207.0580>.

17. Ding X., Zhang Y., Liu T., Duan J. Deep Learning for Event-Driven Stock Prediction. *IJCAI Proceedings*. 2015:2327–2333. Режим доступа: <https://www.ijcai.org/Proceedings/15/Papers/329.pdf>.
18. Nelson D. M. Q., Pereira A. C. M., de Oliveira R. A. Stock Market's Price Movement Prediction with LSTM Neural Networks. *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Anchorage, AK, USA*. 2017:1419-1426. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966019. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7966019>.
19. Lipton Z. C., Berkowitz J., Elkan C. A Critical Review of Recurrent Neural Networks for Sequence Learning. 2015. *arXiv:1506.00019*. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1506.00019>.
20. Roszyk N., Slepaczuk R. The Hybrid Forecast of S&P 500 Volatility Ensembled from VIX, GARCH and LSTM models. 2024. *arXiv:2407.16780*. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2407.16780>.

ВНЕДРЕНИЕ УЧЕТНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЕЙ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ МЕДИКАМЕНТЫ ПО ГОСУДАРСТВЕННЫМ КОНТРАКТАМ

М. П. Базилевский^а, А. А. Морозова^б

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3253-5697>, ✉ mik2178@yandex.ru

^б nastena.morozova.2002@bk.ru

Аннотация: статья посвящена актуальной проблеме повышения эффективности управления бизнес-процессами в фармацевтической компании. Проведен анализ бизнес-процессов организации, выявлены узкие места, требующие автоматизации. Сформулирована оптимизационная задача линейного программирования о минимизации суммарных затрат на автоматизацию процессов и обучение персонала. Решение этой задачи позволило определить оптимальные вложения денежных средств для достижения требуемых показателей эффективности организации. Описаны особенности внедрения новой учетной информационной системы. Для оценки эффективности до и после внедрения было использовано 5 ключевых показателей. Установлено, что в результате внедрения среднее время обработки одного заказа снизилось на 55,6%, количество ошибок при оформлении документов — на 66,7%, доля выполняемых вручную операций — на 50%, операционные затраты — на 33,3%, а количество заказов на одного сотрудника увеличилось на 126,7%.

Ключевые слова: учетная информационная система, фармацевтическая компания, бизнес-процесс, автоматизация, линейное программирование, ключевые показатели эффективности.

Для цитирования: Базилевский М. П., Морозова А. А. Внедрение учетной информационной системы для повышения эффективности управления организацией, реализующей медикаменты по государственным контрактам. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):27–35.

Поступила в редакцию: 29.07.2025.

В окончательном варианте: 21.08.2025.

DEPLOYMENT OF AN ACCOUNTING SYSTEM TO IMPROVE MANAGEMENT EFFICIENCY IN A MEDICINE SUPPLIER UNDER GOVERNMENT CONTRACTS

M. P. Bazilevskiy^a, A. A. Morozova^b

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3253-5697>, ✉ mik2178@yandex.ru

^b nastena.morozova.2002@bk.ru

Abstract: we examined ways to improve business process efficiency at a pharmaceutical supplier operating under government contracts. We mapped operational workflows, measured cycle times and error rates, and identified bottlenecks that slowed processes. We selected tasks suitable for automation and formulated a linear programming problem to minimize the combined costs of automation and staff training. Solving the problem allowed us to determine the most effective allocation of resources to achieve target performance indicators. We implemented a new accounting system and evaluated its impact using five performance measures. After implementation, average order processing time decreased by 55.6%, document errors declined by 66.7%, and the share of manual operations fell by 49.9%. Operating costs decreased by 33.3%, and the number of orders processed per employee increased by 126.7%. These results demonstrate that targeted automation and optimized resource allocation can substantially enhance operational performance.

Keywords: accounting system, pharmaceutical company, business process, automation, linear programming, key performance indicators.

Cite this article: Bazilevskiy M. P., Morozova A. A. Deployment of an Accounting System to Improve Management Efficiency in a Medicine Supplier under Government Contracts. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):27–35.

Original article submitted: 29.07.2025.

Revision submitted: 21.08.2025.

Введение

В условиях стремительного развития цифровых технологий и внедрения инноваций в различных отраслях экономики вопросы повышения эффективности управления бизнес-процессами становятся все более актуальными. Особенно это касается организаций, работающих в сфере государственного

сектора, таких как фармацевтические компании, осуществляющие поставки медикаментов по государственным контрактам. В связи с требованиями современной экономики и растущими запросами со стороны государства эти организации сталкиваются с необходимостью увеличения прозрачности, скорости и точности в управлении своим бизнесом [1].

Одной из ключевых проблем многих организаций является использование устаревших учетных информационных систем (УИС), которые не обеспечивают должного уровня автоматизации процессов, оперативности в принятии решений и полноты отчетности. Для решения этой проблемы в настоящее время в разных сферах разрабатываются и внедряются современные УИС. Например, статья [2] посвящена проектированию автоматизированной системы комплексного учета энергоресурсов предприятия. Предварительно авторами статьи [2] проведен анализ бизнес-процесса учета энергоресурсов и сформулированы требования к системе. В [3] разработана информационная система для автоматизации обработки заказов посетителей предприятия общественного питания. В работе [4] исследуются вопросы внедрения современных информационных систем в гостиничный бизнес. Причем для моделирования бизнес-процессов использована нотация BPMN. В [5] вместо используемой на предприятии по производству световых приборов программы MonControl внедрена информационная система «КРАФТ 5-Производство», что увеличило эффективность работы с поступающей информацией. В [6] разработаны рекомендации по созданию информационно-аналитической системы учета расходов на продвижение товаров в известной сети супермаркетов.

Система 1С:Предприятие 7.7, ранее использовавшаяся в организации, реализующей медикаменты по государственным контрактам, имеет ограничения по функциональности, архитектуре и возможностям интеграции с другими сервисами [7, 8]. Это ведет к низкой производительности труда сотрудников, высокой доле ручных операций, многочисленным ошибкам в документации и, как следствие, к увеличению операционных затрат.

Для решения этих проблем внедрение современных УИС, таких как 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5, является важным шагом на пути к цифровой трансформации. Новая платформа предоставляет расширенные возможности для автоматизации процессов учета и управления, что позволяет не только повысить эффективность работы сотрудников, но и улучшить контроль над операциями и отчетностью, минимизируя риски ошибок и повышения затрат. В связи с этим целью данного исследования является повышение эффективности управления организацией, реализующей медикаменты по государственным контрактам [9–11], за счет перехода от системы 1С:Предприятие 7.7 к системе 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ бизнес-процессов организации, выявить узкие места и области, требующие автоматизации.
2. Выбрать ключевые показатели (KPI) для оценки эффективности организации.
3. Определить минимальные финансовые затраты, необходимые для достижения требуемых значений ключевых показателей эффективности.
4. Сравнить показатели деятельности организации до и после внедрения 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5.

Анализ бизнес-процессов и оценка эффективности организации

Для достижения поставленной цели в рамках исследования был использован комплексный подход, включающий как качественные, так и количественные методы анализа [1]. На начальном этапе был проведен сбор и анализ информации о структуре, последовательности и длительности бизнес-процессов (рис. 1) при использовании платформы 1С:Предприятие 7.7.

Бизнес-процессы выстроены последовательно и включают несколько ключевых этапов: прием и анализ госконтрактов, формирование заявок на закупку медикаментов, проведение закупочных процедур и заключение договоров с поставщиками, приемка и складской учет товаров, оформление отгрузки медикаментов государственным заказчиком, ведение бухгалтерского и налогового учета, а также подготовка отчетной документации по контракту.

Использование устаревшей версии 1С:Предприятие 7.7 ограничивает возможности автоматизации: система не поддерживает современные формы интеграции с электронными торговыми площадками, плохо справляется с объемной аналитикой и не обеспечивает сквозного контроля всех этапов исполнения контракта. Ручной ввод данных, дублирование информации в различных учетных формах,

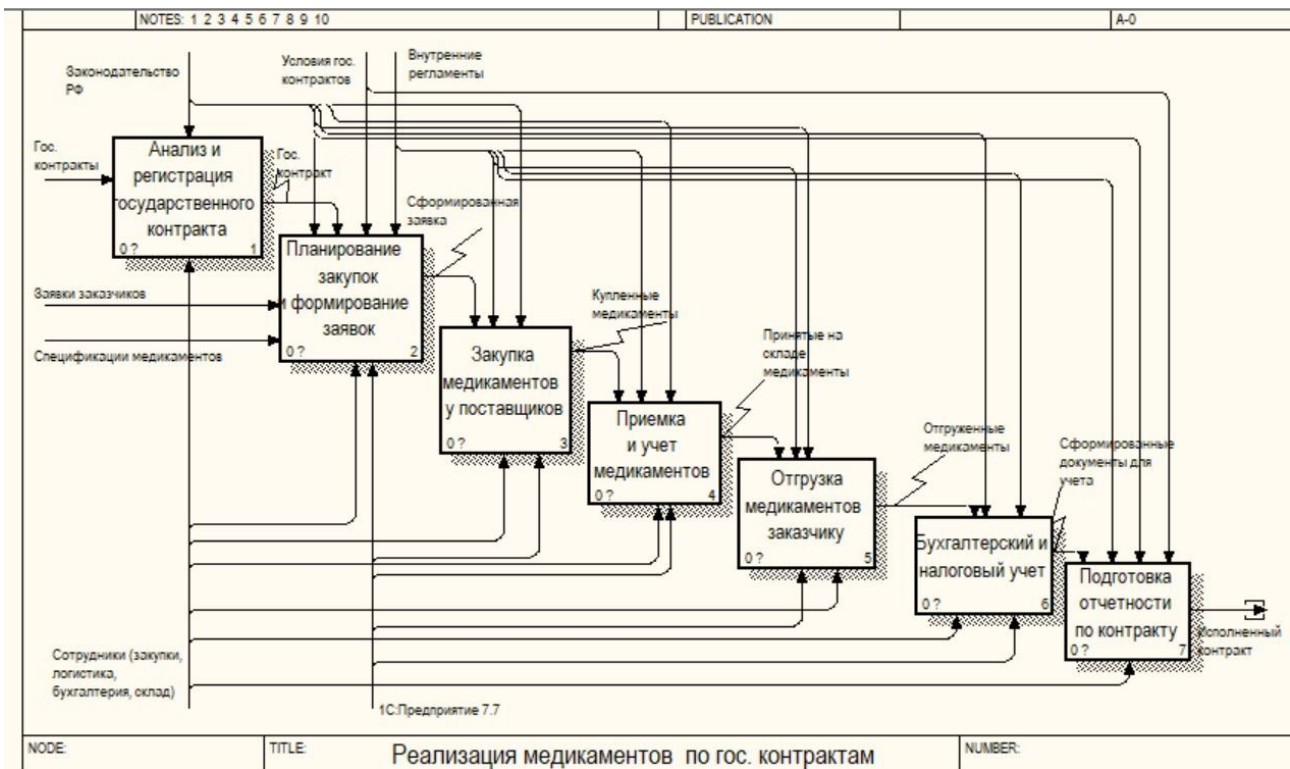


Рис. 1. Диаграмма бизнес-процессов

отсутствие единого информационного пространства между закупками, логистикой и бухгалтерией приводит к ошибкам, задержкам и повышенным рискам срыва сроков исполнения обязательств. Особенно уязвимыми участками являются этапы оформления закупок и отчетности, где высока вероятность человеческого фактора и несвоевременной подачи данных из-за отсутствия интеграции и уведомлений в системе.

Для оценки влияния внедрения новой УИС на эффективность управления организацией было выбрано несколько ключевых показателей эффективности (КПИ) [12]. Эти метрики позволяют объективно измерить изменения, произошедшие в процессах после перехода на более современную платформу 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5. Рассмотрим каждый показатель более детально.

1. Скорость обработки заказов и отгрузок. Это ключевой показатель, который напрямую влияет на удовлетворенность клиентов и выполнение обязательств по государственным контрактам. Чем быстрее обрабатываются заказы и осуществляются отгрузки, тем выше оперативность организации и тем меньше вероятность возникновения просрочек. Измеряется время, затраченное на обработку одного заказа и отгрузку.

2. Количество ошибок при оформлении документов. Это важный показатель, влияющий на качество работы организации и ее репутацию. Ошибки в документации могут привести к задержкам, штрафам и потерям в отношениях с партнерами и государственными органами. Рассчитывается на основе анализа числа ошибок на тысячу или десятки тысяч оформленных документов за определенный период.

3. Объем ручных операций. В организациях с устаревшими учетными системами значительная доля процессов может выполняться вручную, что требует большого количества времени и повышает вероятность ошибок. Объем ручных операций является метрикой, показывающей, сколько действий или шагов в процессе бизнеса требует участия сотрудников. Измеряется как процент от общего числа операций, выполняемых в организации, или как количество операций, требующих участия сотрудников.

4. Уровень операционных затрат. Операционные затраты включают все расходы, связанные с функционированием организации: расходы на труд, ИТ-обслуживание, административные расходы и т.д. Внедрение современной учетной системы должно привести к снижению операционных затрат за счет оптимизации процессов и автоматизации. Уровень операционных затрат измеряется как отноше-

ние совокупных затрат к общему объему выполненных операций или к объему выручки компании за период.

5. Производительность труда сотрудников. Это один из важнейших показателей, отражающих эффективность работы сотрудников организации. В данном контексте это количество операций (например, оформление заказов, обработка документов, проведение расчетов), выполняемых каждым сотрудником за определенный промежуток времени. Объем операций на одного сотрудника рассчитывается как отношение общего числа операций за период к количеству сотрудников, выполняющих эти операции.

На основе статистической информации о деятельности организации были определены значения всех перечисленных выше показателей до внедрения новой УИС:

- 1) среднее время обработки одного заказа $T_{до} = 0,75$ часа;
- 2) количество ошибок при оформлении документов в месяц $E_{до} = 15$;
- 3) доля выполняемых вручную операций $R_{до} = 0,58$;
- 4) операционные затраты на ИТ-сопровождение $Z_{до} = 1,2$ млн руб. / год;
- 5) количество заказов на одного сотрудника в день $P_{до} = 30$.

Дополнительно на основе тестирования была оценена степень обученности пользователей работе с УИС. Она составила $O_{до} = 0,6$, т.е. каждый сотрудник справился с тестом в среднем на 60%.

Поскольку доля выполняемых вручную операций $R_{до} = 0,58$, то доля выполняемых автоматически операций (уровень автоматизации) $A_{до} = 1 - R_{до} = 0,42$.

Задача о минимизации суммарных затрат на автоматизацию процессов и обучение персонала

Повысить эффективность управления организацией можно за счет повышения уровня автоматизации процессов и степени обученности сотрудников, что естественным образом связано с определенными финансовыми затратами. Любая организация, безусловно, стремится к минимизации этих затрат. В этой связи возникает необходимость в оптимальном распределении денежных средств для достижения заданных показателей функционирования предприятия. Для этого может быть использован аппарат математического программирования [13–17].

Сформулируем далее оптимизационную задачу о минимизации суммарных затрат на автоматизацию процессов и обучение персонала в результате внедрения новой УИС. Пусть A — уровень автоматизации процессов, O — уровень обученности сотрудников. Эти переменные удовлетворяют ограничениям:

$$A_{до} \leq A \leq 1, \quad (1)$$

$$O_{до} \leq O \leq 1. \quad (2)$$

Обозначим буквой C суммарные затраты на автоматизацию и обученность. Предположим, что переменная C связана с переменными A и O линейной зависимостью:

$$C = k_0 + k_1 \cdot A + k_2 \cdot O, \quad (3)$$

где k_0, k_1, k_2 — неизвестные параметры. Для поиска уравнения плоскости (3) используем следующие условия:

1) если $A = A_{до}$ и $O = O_{до}$, то $C = 0$, т.е. если не вкладывать деньги в автоматизацию и обучение, то их уровни не изменятся;

2) если $A = 1$ и $O = O_{до}$, то $C = 8000000$, т.е. на полную автоматизацию без вложений на обучение требуется 8 млн руб.;

3) если $A = A_{до}$ и $O = 1$, то $C = 3000000$, т.е. на полный курс обучения без вложений на автоматизацию требуется 3 млн руб.

Тогда уравнение плоскости (3) можно записать в виде

$$\begin{vmatrix} A - 0,42 & O - 0,6 & C \\ 0,58 & 0 & 8000000 \\ 0 & 0,4 & 3000000 \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

Упростив выражение (4) и выразив C , получим следующую зависимость суммарных затрат от уровня автоматизации и обученности:

$$C = -10293103,44 + 13793103,44 \cdot A + 7500000 \cdot O. \quad (5)$$

Выражение (5) можно интерпретировать так: для повышения уровня автоматизации на 0,01 требуется 137931,03 руб., а для повышения обученности на 0,01 — 75000 руб.

Обозначим буквой T среднее время обработки одного заказа в часах. Пусть переменная T связана с переменными A и O линейной зависимостью. Для идентификации коэффициентов уравнения плоскости используем следующие условия:

1) если $A = A_{до}$ и $O = O_{до}$, то $T = T_{до}$, т.е. если уровни автоматизации и обученности не изменятся, то и среднее время обработки одного заказа останется прежним;

2) если $A = 1$ и $O = O_{до}$, то $T = 0,1$, т.е. при полной автоматизации и при неизменном уровне обученности среднее время обработки одного заказа составляет 6 минут;

3) если $A = 1$ и $O = 1$, то $T = 0$, т.е. при полной автоматизации и при полном курсе обучения среднее время обработки одного заказа будет составлять очень близкое к нулю значение.

Тогда по аналогии с представленным выше описанием получим зависимость среднего времени обработки одного заказа в часах от уровня автоматизации и обученности:

$$T = 1,37068 - 1,12068 \cdot A - 0,25 \cdot O. \quad (6)$$

Выражение (6) можно интерпретировать так: увеличение уровня автоматизации и обученности на 0,01 приводит к уменьшению среднего времени обработки одного заказа примерно на 0,672 и 0,15 минут соответственно.

Обозначим буквой E среднее количество ошибок в документообороте. Будем считать, что переменная E связана с переменными A и O линейной зависимостью. Для идентификации коэффициентов этой линейной зависимости используем следующие условия:

1) если $A = A_{до}$ и $O = O_{до}$, то $E = E_{до}$, т.е. если уровни автоматизации и обученности не изменятся, то и среднее количество ошибок останется прежним;

2) если $A = 1$ и $O = O_{до}$, то $E = 5$, т.е. при полной автоматизации и при неизменном уровне обученности среднее число ошибок составит 5;

3) если $A = 1$ и $O = 1$, то $E = 0$, т.е. при полной автоматизации и при полном курсе обучения среднее число ошибок будет составлять очень близкое к нулю значение.

Тогда через уравнение плоскости по трем точкам получим зависимость среднего количества ошибок в документообороте от уровня автоматизации и обученности:

$$E = 29,7413 - 17,2413 \cdot A - 12,5 \cdot O. \quad (7)$$

Выражение (7) можно интерпретировать так: увеличение уровня автоматизации и обученности на 0,01 приводит к уменьшению среднего количества ошибок примерно на 0,172 и 0,125 соответственно.

Допустим, что среднее время обработки одного заказа должно быть не больше T^* ($T^* \leq T_{до}$) часа, а среднее количество ошибок — не больше O^* ($O^* \leq O_{до}$). Тогда, учитывая (6) и (7), введем следующие ограничения:

$$1,37068 - 1,12068 \cdot A - 0,25 \cdot O \leq T^*, \quad (8)$$

$$29,7413 - 17,2413 \cdot A - 12,5 \cdot O \leq E^*. \quad (9)$$

Для минимизации суммарных затрат введем целевую функцию

$$C \rightarrow \min. \quad (10)$$

Решение сформулированной задачи линейного программирования с целевой функцией (10) и с линейными ограничениями (1), (2), (8), (9) позволяет найти минимальные затраты на автоматизацию процессов и обучение сотрудников, гарантирующие требуемый уровень времени обработки одного заказа и количества ошибок.

Предложенный математический аппарат был использован для поиска минимальных затрат при ограничении на время обработки одного заказа $T^* = 0,3$ часа и при ограничении на количество ошибок $E^* = 6$. Учитывая (5), задача линейного программирования (1), (2), (8)–(10) примет вид:

$$-10293103,44 + 13793103,44 \cdot A + 7500000 \cdot O \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$1,12068 \cdot A + 0,25 \cdot O \geq 1,07068, \quad (12)$$

$$17,2413 \cdot A + 12,5 \cdot O \geq 23,7413, \quad (13)$$

$$0,42 \leq A \leq 1, \quad (14)$$

$$0,6 \leq O \leq 1. \quad (15)$$

Оптимальное решение задачи (11)–(15): $A_{\text{опт}} = 0,768$, $O_{\text{опт}} = 0,840$. Значение целевой функции в этой точке $C_{\text{опт}} = 6599980,64$. Это означает, что для обеспечения времени обработки одного заказа не более $T^* = 0,3$ часа и количества ошибок не более $E^* = 6$ потребуется 6599980,64 руб. Причем из этой стоимости на автоматизацию процессов требуется 4800000 руб., а на обучение сотрудников — 1800000 руб. В результате уровень автоматизации увеличится с 0,42 до 0,768, а уровень обученности — с 0,6 до 0,84.

Особенности внедрения новой УИС

После определения финансовых затрат на базе действующей организационной структуры была проведена настройка и внедрение программного продукта 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5. Особое внимание уделялось сохранению целостности данных при миграции, обучению пользователей и адаптации регламентов.

Для переноса информации между системами был реализован поэтапный механизм миграции, который включал следующие ключевые действия:

1. Предварительный аудит базы данных 1С:Предприятие 7.7. Выполнялись полная инвентаризация и анализ структуры данных: документы, справочники, остатки, проводки. Оценивалась корректность и непротиворечивость данных, выделялись устаревшие или дублирующие записи, которые подлежали очистке.

2. Формирование универсальных выгрузок в формате JSON. Для обеспечения платформенной независимости и читаемости данных выгрузка выполнялась не в формате .dt (типовой формат обмена 1С), а в формате JSON, что позволило более гибко управлять структурами данных при импорте. Были подготовлены скрипты, выгружающие следующие блоки:

- справочники (номенклатура, контрагенты, склады);
- документы (поступления, реализации, перемещения, заявки покупателей);
- остатки по счетам и партиям;
- взаиморасчеты.

3. Очистка и нормализация данных. На этапе промежуточной обработки были устранены дубли, приведены к единому формату артикулы и коды, выделены неактуальные позиции.

4. Импорт в 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5. Для загрузки JSON-структур в новую конфигурацию использовались внешние обработки на языке 1С, написанные специально для проекта. Загрузка проводилась поэтапно с промежуточной проверкой и логированием на каждом шаге. Дополнительно применялись механизмы транзакционной обработки, чтобы в случае сбоя обеспечить откат операций и сохранность базы.

5. Контроль после миграции. По завершении загрузки выполнялись процедуры сверки остатков, проводок и документов по контрольным точкам. Были сформированы отчеты «до/после» с целью верификации успешной миграции данных.

Обучение пользователей проводилось путем очных встреч, где собирались мини-группы по функциям: логисты, закупщики, кладовщики, бухгалтеры и менеджеры по продажам. Использовались реальные кейсы, повторяющие их повседневные задачи. Также были подготовлены подробные инструкции в текстовом формате и видеоуроки.

Результаты внедрения

Оценка результатов осуществлялась на основании статистических данных, собранных за сопоставимые периоды до и после внедрения системы. Сравнительный анализ позволил выявить изменения в эффективности процессов. Результаты сравнения представлены в таблице.

Таблица

Показатели эффективности организации до и после внедрения

| Показатель | До внедрения | | После внедрения | | Изменение |
|------------|--------------------|---|--------------------|--|-----------|
| | Значение | Комментарий | Значение | Комментарий | |
| T | 45 мин | До внедрения системы обработка заказов могла занимать значительное время из-за необходимости ручного ввода данных, проверки и согласования информации | 20 мин | После внедрения системы благодаря автоматизации и оптимизации процессов с использованием современной учетной системы скорость обработки заказов значительно увеличилась. Новый интерфейс и функционал системы позволили упростить процесс отгрузки, автоматизировав многие из этих этапов | -55,6% |
| E | 15 | До внедрения системы ручная обработка данных и недостаточная интеграция между процессами часто приводили к ошибкам при заполнении и оформлении документов (например, неверное указание данных, ошибка в расчетах, пропуски) | 5 | После внедрения системы автоматизация процессов значительно сократила количество человеческих ошибок, так как система поддерживает валидацию данных, генерирует отчеты автоматически и выполняет множество операций без участия человека | -66,7% |
| R | 58% | До внедрения системы процессы, такие как ввод данных, проверка, составление отчетности, часто выполнялись вручную. Это приводило к большому количеству ошибок и затраченного времени | 29% | После внедрения системы множество операций было автоматизировано, что снизило нагрузку на сотрудников и позволило значительно ускорить выполнение задач. Например, генерирование отчетности, проверка данных и подготовка документов теперь выполняются автоматически | -50% |
| Z | 1,2 млн руб. / год | До внедрения системы высокие операционные затраты часто связаны с необходимостью вручную обрабатывать информацию, проводить множество проверок и исправлений, а также с низкой производительностью сотрудников | 0,8 млн руб. / год | После внедрения системы: платформа 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5 позволила снизить операционные расходы за счет уменьшения числа ручных операций, уменьшения времени на выполнение задач и повышения точности процессов | -33,3% |
| П | 30 | До внедрения новой системы работники выполняли операции вручную или с помощью устаревшей версии системы, что значительно замедляло процесс и снижало общую производительность | 68 | После внедрения новой системы автоматизация рутинных задач и улучшенная интеграция процессов позволили существенно повысить производительность. В частности, увеличился объем операций, которые сотрудники могут выполнить за единицу времени благодаря сокращению времени на выполнение каждой операции | +126,7% |

Представленные в таблице результаты демонстрируют существенное повышение эффективности управления после перехода на новую платформу:

1. Сокращение времени обработки заказов T позволило ускорить логистику и снизить количество просрочек при выполнении контрактных обязательств.
2. Рост производительности труда П обеспечен за счет автоматизации рутинных операций и внедрения удобного интерфейса для сотрудников.
3. Снижение количества ошибок E положительно сказалось на качестве обслуживания государственных клиентов и на уровне претензионной работы.
4. Оптимизация затрат была достигнута за счет снижения нагрузки на ИТ-отдел и уменьшения

необходимости в ручной проверке данных.

5. Быстрое формирование отчетности повысило прозрачность операций для надзорных органов и заказчиков.

Хотелось бы отметить, что процесс формирования одного заказа в организации включает следующие ключевые этапы:

- а) получение заявки от заказчика (по контракту);
- б) проверка наличия медикаментов на складе;
- в) формирование внутреннего документа-заказа;
- г) согласование с отделом закупок и логистики;
- д) подготовка отгрузочных документов (накладная, счет-фактура);
- е) проведение документа в учетной системе;
- ж) уведомление клиента и передача на отгрузку.

До внедрения УИС обработка одного заказа занимала примерно 45 минут, так как:

- проверка остатков выполнялась вручную через отчеты;
- документы формировались отдельно, с множеством повторяющихся вводов данных;
- не было механизмов предварительной проверки ошибок и статусов заказа;
- требовалось дополнительное согласование по e-mail или телефону;
- вся аналитика по исполнению формировалась постфактум.

После внедрения УИС обработка одного заказа сократилась до 20 минут благодаря:

- автоматической проверке остатков и уведомлениям;
- использованию шаблонов заказов и автозаполнения полей;
- сквозной обработке: заказ → отгрузка → проводка — в одном интерфейсе;
- встроенному согласованию по этапам с контрольными точками;
- онлайн-отслеживанию статуса заказов и резервированию товаров.

Заключение

В статье проведен анализ бизнес-процессов организации, использующей платформу 1С:Предприятие 7.7, что позволило выявить факторы, негативно влияющие на эффективность управления. С помощью сформулированной задачи линейного программирования установлено, как нужно вложить деньги в автоматизацию процессов и обучение сотрудников, чтобы обеспечить требуемый уровень некоторых показателей эффективности организации. Переход на новую УИС 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5 позволил не только устранить существующие ограничения в учете и управлении, но и обеспечить значительное улучшение операционных и экономических показателей.

На основании анализа данных можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение новой УИС привело к существенному повышению производительности труда (на 126,7%), благодаря автоматизации рутинных операций и повышению удобства пользовательского интерфейса.

2. Были достигнуты значительные сокращения времени обработки заказов (на 55,6%), что улучшило логистику и контроль исполнения контрактов.

3. Количество ошибок в документах снизилось на 66,7%, что повысило надежность учета и снизило риски штрафных санкций при работе с государственными заказчиками.

4. Операционные затраты на ИТ-сопровождение уменьшились на 33,3%, что демонстрирует высокую экономическую эффективность проекта автоматизации.

Таким образом, полученные результаты не только подтверждают целесообразность перехода на платформу 1С:Предприятие 8.3 УТ 11.5, но и могут служить основой для разработки рекомендаций по цифровой трансформации для других организаций, работающих в сфере государственных закупок медикаментов. Автоматизация учетных процессов с использованием современных информационных систем способствует устойчивому развитию, снижению издержек и повышению управляемости бизнеса в условиях жестких регуляторных требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермакова С. Э., Ковязин И. Е. Основные аспекты роботизации бизнес-процессов в сфере услуг здравоохранения. *Вопросы инновационной экономики*. 2020;10(1):433–448. DOI:

- 10.18334/vines.10.1.100494.
2. Сизова О. В., Безносова Э. Е. Опыт автоматизации системы комплексного учета энергоресурсов организации. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством*. 2021;4(50):128–135. DOI: 10.6060/ivecofin.2021504.575.
 3. Кононович М. А., Шах А. В. Информационная система для автоматизации учета продаж в пунктах общественного питания. *Наука и технологии-2023*. 2023:19–29.
 4. Сизова О. В., Беляева С. В. Автоматизация процесса учета клиентов гостиницы. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021;4(68):32–40. DOI: 10.6060/snt.20216804.0005.
 5. Потекаева Ю. В., Охотников И. В., Сибирко И. В. Формирование информационной архитектуры промышленного предприятия. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2021;11(8А):191–197. DOI: 10.34670/AR.2021.22.30.024.
 6. Акимжанова С. Б., Кажмухаметова А. А. Информационно-аналитическая система учета расходов на продвижение товаров в «Magnum Cash&Carry». *Вестник науки*. 2024;2(12):68–89.
 7. Филимонова Е. И. *1С: Предприятие 7.7: Практический самоучитель*. М.: Феникс; 2007. 313 с.
 8. Планы изменения порядка сопровождения программных продуктов «1С:Предприятие 7.7» с 1 июля 2012 года. Рекомендации по переходу на «1С:Предприятие 8». *Информационный выпуск от 17.04.2012 № 15011*. Режим доступа: <https://its.1c.ru/docs/inf/15011>.
 9. *Directum RX: Автоматизация бизнес-процессов и документооборота для медицинских и фармацевтических предприятий*. Режим доступа: <https://www.directum.ru/solutions/industries/pharma>.
 10. Глухова М. В. *Модели управления и информационные системы в здравоохранении*. М.: Наука; 2018. 276 с.
 11. *Государственные закупки медикаментов: изменения в законодательстве*. Режим доступа: <https://www.roszdravnadzor.ru/zakupki-medicamentov>.
 12. Дьяконов В. *Ключевые показатели эффективности (KPI): как измерять и управлять результатами*. М.: Альпина Паблишер; 2014. 256 с.
 13. Базилевский М. П., Наседкин П. Н. Формализация модели информационной безопасности предприятия в виде многокритериальной задачи линейного программирования. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(3). Режим доступа: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=1431>.
 14. Базилевский М. П. Отбор оптимального числа информативных регрессоров по скорректированному коэффициенту детерминации в регрессионных моделях как задача частично целочисленного линейного программирования. *Прикладная математика и вопросы управления*. 2020;(2):41–54.
 15. Базилевский М. П. Моделирование тенденций временных рядов со структурными изменениями с помощью многослойных модульных регрессий. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):34–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-04.
 16. Базилевский М. П. Отбор значимых по критерию Стьюдента информативных регрессоров в оцениваемых с помощью МНК регрессионных моделях как задача частично-булевого линейного программирования. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2021;(3):5–16. DOI: 10.17308/sait.2021.3/3731.
 17. Сивакова Т. В., Судаков В. А., Шимко В. С. Исследование методов решения задач смешанного целочисленного линейного программирования. *Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*. 2024;(24). Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/ipmp3234>.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ NDIR ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

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: целью данной статьи является применение нейронной сети (NN) для линейаризации нелинейной характеристики NDIR-сенсора. Практически все типы аналитических датчиков имеют нелинейный отклик. Датчик с использованием NN может автоматически компенсировать нелинейные характеристики сигнала и его нелинейную зависимость от параметров окружающей среды с достаточно высокой точностью. Для демонстрации возможности предлагаемой системы на основе NN приведены результаты работы интеллектуального NDIR-датчика для измерения концентраций газов. Результаты имитационных экспериментов показали, что модель NDIR-сенсора на основе NN способна преобразовывать нелинейный сигнал концентрации с достаточно низкой погрешностью.

Ключевые слова: датчик, нелинейность, линейаризация, нейронная сеть, концентрация.

Для цитирования: Замятин Н. В., Смирнов Г. В. Нейросетевая линейаризация NDIR газовых сенсоров. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):36–45.

Поступила в редакцию: 27.06.2025.

В окончательном варианте: 20.09.2025.

NEURAL NETWORK-BASED LINEARIZATION OF THE NDIR GAS SENSOR CHARACTERISTIC

N. V. Zamyatin^а, G. V. Smirnov^б*Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russian Federation*^а ✉ zamnv47@gmail.com, ^б smirnov@main.tusur.ru

Abstract: almost all types of analytical sensors have a nonlinear response. We used a neural network to linearize the nonlinear characteristic of an NDIR sensor. A neural network compensates for the nonlinear dependence of the signal on environmental parameters with high accuracy. To demonstrate the capabilities of the proposed approach, we presented the results of an intelligent NDIR sensor for measuring gas concentrations. Simulation experiments showed that the neural network-based NDIR sensor model converted a nonlinear concentration signal with low error.

Keywords: sensor, non-linearity, linearization, neural network, concentration.

Cite this article: Zamyatin N. V., Smirnov G. V. Neural Network-Based Linearization of the NDIR Gas Sensor Characteristic. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):36–45.

Original article submitted: 27.06.2025.

Revision submitted: 20.09.2025.

Введение

Нелинейные задачи управления являются подходящими приложениями для искусственных нейронных сетей (ANN) и за последние годы привели к значимым эксплуатационным результатам. Одной из причин нелинейности систем управления являются нелинейные характеристики датчиков, поэтому нейронные сети стали неотъемлемой частью систем управления для компенсации нелинейностей.

Калибровка и линейаризация газовых датчиков — это процесс преобразования выходных данных, генерируемых газовым датчиком, в значения концентраций. Выходной сигнал обычно представлен в виде напряжения. Калибровка датчика и линейаризация являются необходимостью для установления истинной зависимости между выходным сигналом датчика и уровнем концентрации контролируемых газов. Для достижения этой цели датчики необходимо периодически калибровать. Одним из наиболее распространенных методов калибровки датчиков газа является составление уравнения наилучшего соответствия, которое соотносит выходные данные датчика с уровнем концентрации газа. Это достигается за счет подачи на датчик известных уровней концентрации определенных газов в течение некоторого периода времени и фиксации значений, которые он выдает. Затем формируется график с осью x в качестве уровней концентрации и осью $y=f(x)$ в качестве выходных данных датчика. Потом добавляется наиболее подходящая линейная зависимость (опорная) таким образом, чтобы она проходила через

множество точек на графике (рис. 1). При этом, чем больше число точек, тем точнее можно отобразить опорную зависимость. Следует отметить, что наиболее подходящее уравнение — это всего лишь оценка и, следовательно, от него нельзя ожидать высокого уровня точности.

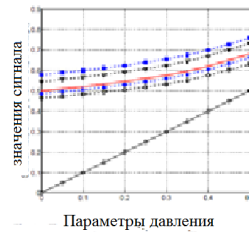


Рис. 1. Концепция линейризации газовых сенсоров

Благодаря использованию искусственной нейронной сети для калибровки и линейризации датчиков достигаемая погрешность минимальна, обеспечивая при этом достаточно высокий уровень точности [1]. Искусственная нейронная сеть — хотя и далекое подобие человеческого мозга, но она так же обучается и функционирует, используя большое количество входных данных, которые ей предоставляются. В этой статье показано применение искусственной нейронной сети для калибровки и линейризации NDIR газовых датчиков, используемых для распознавания запахов.

Нейросетевой алгоритм применен для линейризации результатов аналитического контроля газов. Для реализации возможностей нейронной сети использовалась архитектура с произвольно подключенными нейронами. В качестве функции активации для нейронной сети использована сигмоида. Это конкретное применение было реализовано с использованием языка Python для NDIR газовых датчиков при распознавании запахов.

NDIR газовые сенсоры и нелинейность сигналов

Оптические газовые сенсоры измеряют оптические свойства или характеристики, такие как поглощение, поляризация, флуоресценция и др. Поскольку этот метод не связан с химическими реакциями, характерные для датчиков MOX (металлоорганические соединения) и CP (проводящие полимеры), изменения окружающей среды оказывают меньшее влияние на функционирование оптических датчиков. Поэтому для оптических газовых датчиков не нужна частая калибровка. Кроме того, что касается дрейфа датчиков, одиночные или гораздо меньшее число оптических газовых датчиков могут работать подобно крупным массивам датчиков MOX или CP и будут менее зависимы от изменений окружающей среды.

Дополнительные преимущества механизма оптического взаимодействия заключаются в чувствительности к широкому спектру ЛОС (летучих органических соединений), хорошей селективности (особенно к таким газам, как CO_2 и CH_4), хорошим временем отклика/восстановления и более длительным сроком службы датчиков, чем у других типов газовых датчиков [2].

Недисперсная инфракрасная сенсорная система (NDIR) состоит из трех основных частей: излучателя в виде ИК-источника, капиллярной кюветы и ИК-детектора с фильтром (рис. 2). Молекулярно-абсорбционная спектроскопия определяет принцип функционирования NDIR-сенсора. Когда газ находится внутри капиллярной кюветы, молекулы газа поглощают излучение от ИК-источника, а оптический фильтр пропускает излучение с длиной волны, соответствующей целевому запаху. Молекулярное поглощение ИК измеряется при обнаружении падения уровня сигнала, который соответствует компоненту запаха.

NDIR-сенсоры используют доступные излучатели и детекторы. ИК-излучатели с высокой излучательной способностью (EMIRS200) и с перестраиваемой частотой разработаны фирмой InfraTec (Дрезден, Германия). Эти приборы имеют возможность сканировать средне- и длинноволновый ИК-диапазон (3,1-10,5 м) с шагом 20 нм. Этот шаг следует считать разрешением по длине волны. Благодаря такой особенности любые измерения фиксированной частоты можно рассматривать как «виртуальные датчики». Нейросетевая обработка позволяет не использовать дорогостоящие прецизионные фильтры для выбора определенных частот. Также возможен вариант с применением фильтрации, основанной на микромеханическом интерферометре Фабри–Перо (FPI), включающем оптический резонатор с двумя

параллельными отражающими поверхностями, выполняющими роль полуволнового резонатора. Изменяя расстояние между пластинами, можно настроить центральную длину волны простым регулированием напряжения на управляющем выводе. Поскольку компоненты запаха имеют уникальную частоту инфракрасного поглощения, NDIR-сенсор может быть использован для идентификации запаха в целом без определения каждого химического вещества.

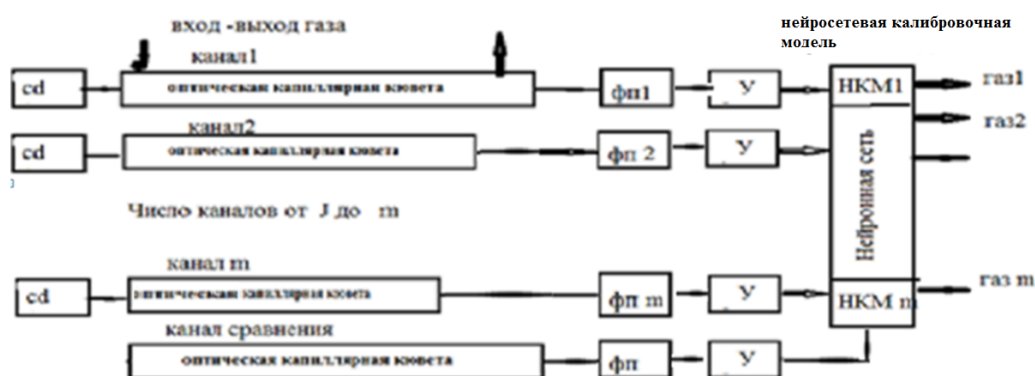


Рис. 2. NDIR-сенсор

Функциональность системы была продемонстрирована на трех экспериментах. Первый из них заключался в испытании отдельных газов (CO_2 и CH_4) в различных концентрациях. Сигналы датчиков представляют линейно-полиномиальную (второй степени) зависимость для CO_2 и CH_4 в исследуемом диапазоне концентраций. Более того, результаты этого теста показывают, что чувствительность для CO_2 ниже 25 ppm, а для CH_4 — ниже 1 ppm.

Проблема линейризации газовых сенсоров

Нелинейность сигнала NDIR-сенсора зависит от различных причин, что снижает порог чувствительности и повышает предел обнаружения. Рассеяние света и фоновое поглощение увеличивают регистрируемую величину и, соответственно, нелинейность.

Многие датчики с аналоговыми выходными сигналами имеют общие характеристики, такие как линейность, воспроизводимость и разрешающая способность. Нужно определять параметры внешней среды: время отклика и полосу пропускания, рабочую температуру, вибрацию. Эти характеристики определяют источники неопределенностей и представляют пределы погрешностей, искажающих линейную зависимость выходного сигнала датчика от входного воздействия.

Нелинейность служит мерой максимального отклонения выходного сигнала датчика от заданной теоретической прямой, приведенной на графике (рис. 1). Лучшим выбором среди опорных прямых, основанным на статистике, является линия наилучшего соответствия. Это прямая линия, рассчитанная методом наименьших квадратов, посредством которого сумма квадратов отклонений от прямой математически минимизируется. Такая прямая линия наилучшего соответствия используется в качестве основы для представления нелинейности датчика, потому что это статистически оправдано и подтверждается в реальных измерениях.

Также нужно учитывать и другие источники ошибок, влияющие на выходной сигнал, при соблюдении предварительных условий, которые должны выполняться в процессе измерений:

- температура должна быть постоянной, либо ее изменения должны быть незначительными по сравнению с величиной нелинейности;
- погрешности датчика также должны быть малы по сравнению с его нелинейностью;
- любая нелинейность на выходе системы, обусловленная ее узлами, также должна быть во много раз меньше нелинейности датчика.

Разрешающая способность, как датчика, так и прибора для считывания выходных данных, должна быть достаточной, чтобы реагировать на небольшие отклонения в выходном сигнале, вызванные нелинейностью датчика [3].

Поэтому если все иные погрешности малы в сравнении с нелинейностью, то именно она будет доминирующим источником неопределенности измерений, в противном случае влияние остальных погрешностей будет решающим.

Максимальное значение нелинейности при использовании прямой линии наилучшего соответствия в качестве опорной для датчика с однополярным выходным сигналом обычно выражается в процентах (\pm) от полной шкалы выхода, а для датчика с биполярным выходным сигналом максимальная нелинейность выражается в (\pm) процентах от полного выходного диапазона [3].

Повышение точности — сегодня одно из важнейших направлений развития NDIR-сенсоров. Это нужно для:

1. Возможности обнаружения и исследования новых физических явлений.
2. Высокоточных измерений спектроскопических параметров молекул для моделирования их поглощения.

3. Некоторых аналитических применений, требующих точности на уровне (0.1–0.01)%.

4. Распознавания запахов для медицинских и промышленных целей.

Подсистемы NDIR-сенсоров включают пять основных элементов:

1. Фотодиод или фотодиодный лазер.
2. Фотоприемник и система обработки.
3. Кювета с молекулами контролируемого газа.
4. Оптика.
5. Электроника.

Светодиод является основным источником нелинейности в аналитических системах. Нелинейность светодиодов возникает из-за двух явлений.

Во-первых, несовершенство управляющих цепей светодиода приводит к нелинейной зависимости напряжения от тока. В частности, светодиод имеет ограниченный динамический диапазон напряжения, нижний предел которого известен как напряжение включения (TOV), а верхний предел — как напряжение насыщения. Все, что ниже значения TOV, означает, что светодиод находится в области отключения и не проводит никакого тока. Напряжению насыщения соответствует максимально допустимый переменный/импульсный ток, при превышении которого светодиод подвергается перегреву, что может привести к его повреждению. Амплитуды сигналов, выходящие за пределы этого рабочего диапазона, должны быть отсечены перед подачей на светодиод, что приводит к нелинейным искажениям, называемым отсекающим шумом [4].

Если амплитуда сигнала приблизительно моделируется гауссовской случайной величиной с нулевым средним значением, то этот шум двойного отсечения может быть хорошо смоделирован как коэффициент ослабления плюс некоррелированный аддитивный шум, в соответствии с теоремой Бусганга [5]. Кроме того, нелинейность внутри рабочей области светодиода вызывает дополнительные искажения, которые следует рассматривать как нелинейность, ограниченную динамическим диапазоном [6].

С другой стороны, количество испускаемых светодиодом фотонов не прямо пропорционально амплитуде подаваемого электрического тока в его активной области, что приводит к нелинейной передаточной функции между входным током и выходной оптической интенсивностью. Кроме того, реакция индикатора зависит не только от текущего значения подаваемого электрического сигнала, но и от предыдущего входного сигнала, что приводит к эффекту памяти. Фактически этот эффект памяти обусловлен тем, что характеристика сигнала светодиода зависит от частоты подаваемого тока [7].

Нелинейные характеристики светодиодов могут изменяться со временем из-за старения компонентов и температурного дрейфа. Эффективность электрооптического преобразования медленно снижается из-за повышения температуры, вызванного самонагревом светодиода. Это означает, что интенсивность уменьшается со временем при одном и том же входном токе возбуждения. Кроме того, температура может внезапно изменяться при различных уровнях освещенности, что приводит к изменениям нелинейных характеристик светодиода [8].

Известно, что некоторые ЛОС (летучие органические соединения), имеющие отношение к безопасности пищевых продуктов и биомедицинскому мониторингу, имеют частоты поглощения в диапазоне 2,8–5,2 м, например, такие как ацетон, 2-бутанон и изопропанол [9]. Количество поглощенных фотонов прямо пропорционально мощности фотонного пучка от излучателя и, следовательно, количеству обнаруженного газа. Это позволяет определить концентрацию измеряемых молекул запаха. Есть два преимущества, связанных с ИК-излучением.

Во-первых, ИК-излучение рассеивается меньше, чем видимое излучение в присутствии пара,

тумана или дыма, из-за его большей длины волны [10].

Во-вторых, миниатюризация ИК-источников и детекторов возможна с использованием новейших МЭМС-технологий.

Для режима функционирования NDIR с точки зрения точности важны: погрешность измерения регистрируемого сигнала, точность определения частотной шкалы и искажения контура исследуемой линии. Каждый из этих элементов вносит свой вклад в искажения регистрируемого сигнала. При правильной постановке измерений возможно достижение абсолютной точности на уровне 0.1 %, которая, в основном, определяется погрешностью измерения длины кюветы, давления и температуры. Следовательно, погрешность, определяемая нелинейностью, не должна превышать 0.01-0.1 %.

В случае линейной регистрации нормированный сигнал имеет линейную зависимость от нормированной мощности с единичным наклоном. Нелинейность, обусловленная фотодиодом и системой обработки, приводит к нелинейной зависимости регистрируемого сигнала от падающей на него мощности излучения и имеет небольшое значение.

Существующие методы линейризации и их недостатки

Посредством схемы линейризации нелинейный отклик в виде кривой может быть приблизительно линейризован. Значение линейности может быть определено, как в [11].

Отклик, показанный на рисунке 3, имеет нелинейность $\approx 29\%$. Это также может быть вызвано неправильным выбором электронной схемы. Например, импедансные мосты на основе моста Уитстона широко используются для разработки схемы считывания для точного измерения электрических параметров датчиков.

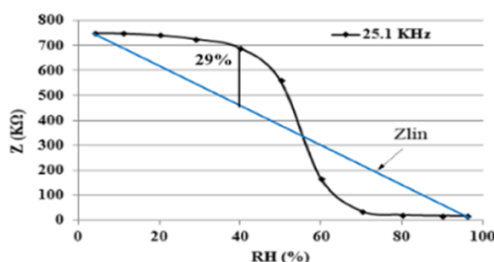


Рис. 3. Нелинейный сигнал керамического сенсора влажности

Методы линейризации можно разделить на две группы. Это аналоговые методы формирования сигнала и цифровые методы, использующие программные линейные алгоритмы (SLA). Цифровой метод может быть дополнительно классифицирован на программную линейризацию и аналоговые и цифровые схемы формирования смешанных сигналов. Обобщенная схема с линейризацией сигнала показана на рис. 4.

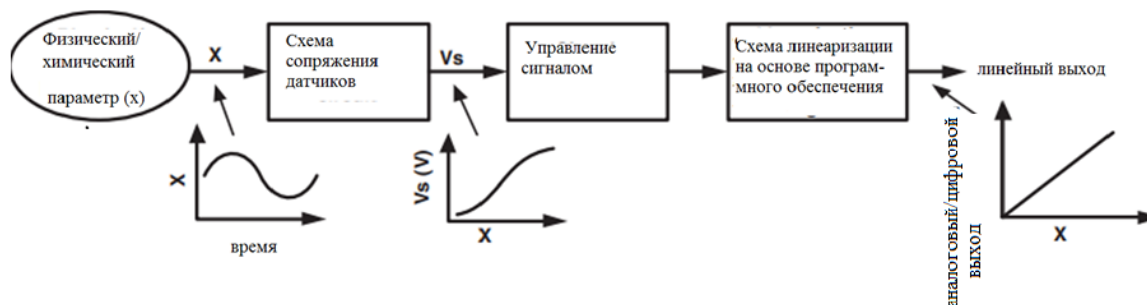


Рис. 4. Обобщенная схема процедуры линейризации

Нелинейность фотоакустического сигнала ближнего инфракрасного диапазона (NIR) для определения концентрации глюкозы была сведена к минимуму с помощью двухволнового дифференциального метода [12]. Он демонстрирует достаточную линейность с коэффициентом корреляции линейной регрессии 0,998 в диапазоне от 100 мг/дл до 2 г/дл. Однако предел обнаружения недостаточен, а система относительно сложна.

Благодаря развитию технологии микросхем цифровые методы в настоящее время наиболее часто используются там, где требуются высокая производительность и точность. Еще одним преимуществом этих методов является программируемость, которая помогает обрабатывать сигналы от различных датчиков. В интеллектуальных датчиках аналоговый выходной сигнал преобразуется в двоичную форму, затем из цифровых данных формируется линейное соотношение. Существует два подхода: вывод линейного уравнения и справочная таблица.

Линеаризация по функциональному соотношению

Если связь между измеряемым параметром и цифровыми данными нелинейна, можно разработать уравнение для получения линеаризованного значения параметра. Например, выходное напряжение газового датчика связано с концентрацией газа в миллионных долях по [13].

Простейший цифровой метод заключается в создании справочной таблицы, содержащей пару выходных данных датчика в цифровой форме и соответствующее им линейное значение в памяти μC . Этот метод зависит от большего объема памяти для повышения точности. В случае меньшего количества данных требуется алгоритм интерполяции. Было опубликовано несколько работ по оптимизации таблицы с целью уменьшения ее размера для небольших встраиваемых приложений [14]. В некоторых случаях размер справочной таблицы оптимизируется с помощью эволюционного генетического алгоритма [15].

Например, большинство газовых датчиков, работающих по принципу адсорбции и десорбции, имеет длительный отклик и время восстановления, также датчик обладает высокой нелинейностью [16]. Время отклика может составлять от нескольких десятков секунд до минуты. Чтобы сократить общее время отклика датчика и схемы формирования сигнала, нужно разработать схему линеаризации, которая обеспечивает низкое время отклика. Время линеаризации может быть сведено к минимуму за счет разумного выбора электроники и максимального сокращения количества аппаратных компонентов.

Нейронные сети

Архитектура MLP (многослойный линейный перцептрон) хотя и является распространенной для применения архитектурой, но имеет недостатки:

- ошибки первых слоев увеличиваются на последующих слоях;
- при увеличении числа слоев обучение таких сетей и, соответственно, изменение весов влияет на распространение ошибок.

Используемая нейронная сеть имеет 3 слоя: 1 входной слой, 1 выходной слой и 1 скрытый слой. Входной и выходной слои имеют по одному узлу в каждом, в то время как скрытый слой имеет 5 узлов. В дополнение к этому нейронная сеть использует один дополнительный узел во входном и скрытом слоях со значением 1. Этот узел называется узлом смещения. Значение этого смещения поддерживается постоянным. Смещение используется для сохранения нейтрального значения в каждом скрытом слое, что позволяет избежать любого переопределения значений.

Поток сигналов в нейронной сети при обучении с обратным распространением ошибки состоит из двух частей: прямого распространения и обратного распространения. Во время прямого распространения значения каждого узла каждого слоя преобразуются с использованием передаточной функции. Затем выходные данные генерируются путем умножения преобразованных значений узлов на текущие значения весов.

При обратном распространении сгенерированный выходной сигнал сравнивается с фактическим выходным сигналом и ошибка на каждом уровне вычисляется и минимизируется. Для минимизации ошибок обычно используется градиентный спуск. Здесь ошибка в каждом весе вычитается и генерируются соответствующие новые веса. После того как сгенерированы новые веса, прямое распространение выполняется снова, чтобы получить новый результат. Этот результат будет ближе к фактическому результату, чем ранее сгенерированный результат. Весь этот процесс выполняется в цикле до тех пор, пока сгенерированное выходное значение не достигнет близкого к фактическому выходному значению. Алгоритм обучения реализован в коде на Python для получения желаемых результатов. Схема нейронной сети представляется в следующем виде (рис. 5).

Значения синаптических коэффициентов приведены в таблице.

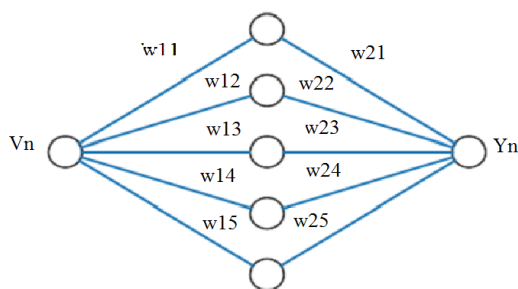


Рис. 5. Схема нейронной сети

Таблица

Значения синаптических коэффициентов

| Синаптические коэффициенты скрытого слоя | | Синаптические коэффициенты выходного слоя | |
|--|-------------|---|-------------|
| W11 | -0.16595599 | W21 | -0.81532281 |
| W12 | 0.44064899 | W22 | -0.62747958 |
| W13 | -0.99977125 | W23 | -0.30887855 |
| W14 | -0.39533485 | W24 | -0.20646505 |
| W15 | -0.70648822 | W25 | 0.07763347 |

Предлагаемая модель использует MLP для компенсации нелинейной характеристики датчика. Характеристики NDIR-сенсора нелинейны и зависят от параметров среды: температура окружающей среды влияет на характеристики сигнала нелинейным образом. Нужно получить близкие к линейным характеристики для NDIR-сенсора независимо от его нелинейных свойств и нелинейной зависимости от окружающей среды.

В предлагаемой модели NDIR-сенсора на основе MLP все сигналы соответствующим образом нормализуются, чтобы сохранить их в диапазоне от 0 до 1.

Модель работает в два этапа: этап обучения и этап тестирования. Первая часть, называемая обучающим набором, используется для обучения ИНС, а другая часть, называемая тестовым набором, используется для тестирования модели. На этапе обучения ИНС обучается характеристикам датчиков. На этапе обучения входной шаблон из обучающего набора применяется к ИНС и вычисляется выходной сигнал. Затем выходные данные сравниваются с соответствующим целевым шаблоном. Ошибка, полученная в результате этого сравнения, затем используется для обновления весов MLP с использованием обратного распространения ошибки. Процедура обучения заканчивается, когда ошибка достигает заданного минимального значения. Схема NDIR-сенсора (рис. 6.) на основе MLP соответствуют линейным характеристикам сигнала, применяется к модели ИНС и для вычисления ее выходных данных. Если выходной сигнал ИНС и целевой шаблон близко совпадают, тогда можно сказать, что модель ИНС удовлетворительно изучила характеристики датчика.

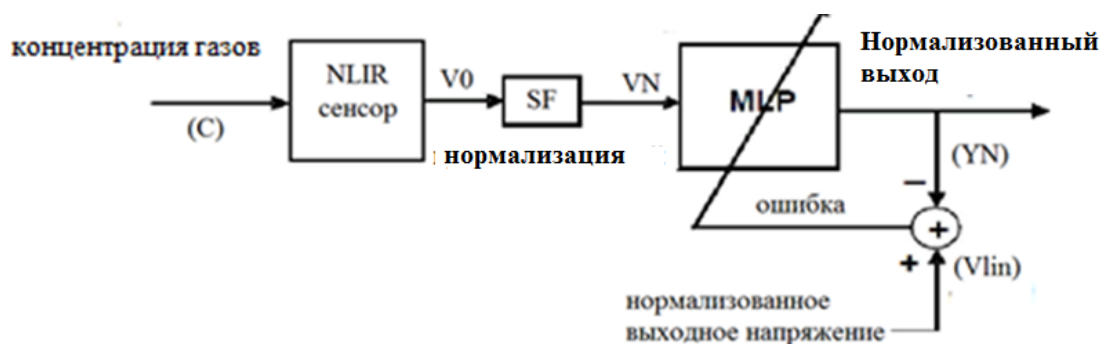


Рис. 6. Схема на основе MLP – нейронной сети для линейризации NDIR-сенсора

Эффективность модели при нелинейной зависимости характеристик датчика определяется двумя формами нелинейных функций, обозначенных $NL1$ (для CO_2) и $NL2$ (для CH_4). Линейная опорная функция, обозначаемая как $NL0$, используется для целей сравнения.

На первом этапе MLP обучается переводу характеристик датчика в нормализованные линейризованные характеристики отклика. Схема для этого показана на рис. 5. Здесь входные данные для MLP состоят из нормализованного значения концентрации CN и нормализованного выходного сигнала SCI VN.

Выходной сигнал NDIR-сенсора в виде нормализованного выходного сигнала SCI определяет значения искомой концентрации. Для получения близких к линейным характеристик сигнала выход SCI должен быть линейно пропорционален нормализованному значению концентрации.

Поэтому выбирается целевой выходной сигнал $VLin = mPN$. На этапе обучения MLP пытаются получить результат, который является хорошей оценкой целевого результата. Изменяя значение параметра усиления m , можно получить линейризованные характеристики датчика с другим коэффициентом усиления.

Для задач линейризации датчика могут быть использованы и другие архитектуры, например, сети с радиально-базисными функциями (RBF), машины опорных векторов (SVM), байесовские сети.

Для нейронной сети в виде 3-слойного MLP с $\{1 - 5 - 1\}$ в этой задаче моделирования была выбрана архитектура (см. рис. 5). Количество узлов во входном, скрытом и выходном слоях равно 1, 5 и 1 соответственно. Таким образом, MLP содержит только 21 вес. Каждый узел скрытого слоя и выходного слоя состоит из сигмовидной нелинейной функции. Входным сигналом для MLP было нормализованное выходное напряжение SCI (VN). Линейное нормализованное напряжение $VLin$ использовалось в качестве целевого выходного сигнала для MLP.

Первоначально все веса MLP устанавливаются на случайные значения в пределах $\pm 0,5$, для обучения пять наборов данных выбраны случайным образом. Кроме того, отдельные значения из каждого набора также были выбраны случайным образом. После применения одного входного шаблона MLP выдает выходной сигнал. Выходное значение сравнивалось с целевым выходным значением для получения значения ошибки, которая затем используется для обновления весов MLP. Коэффициенты обучения и скорости выбраны равными 0,3 и 0,5 соответственно. Для эффективного обучения MLP проведена 1000 итераций, и параметр обучения изменялся следующим образом:

$$i = i - 1(1 - i/Nt),$$

где i — номер текущей итерации, а Nt — общее количество использованных итераций.

При использовании компьютера Pentium 4 с тактовой частотой 2,8 ГГц потребовалось всего 16 секунд, чтобы обучить MLP с 100 000 итераций. В конце итоговые веса MLP сохраняются для фактического использования модели.

Экспериментальные результаты. Результаты линейризации

По результатам моделирования NDIR-сенсора ниже приведена оценка модели MLP для линейризации. Было обнаружено, что модель MLP способна выполнять линейризацию сигнала сенсора. Результаты моделирования для двух форм нелинейных зависимостей CO_2 и CH_4 представлены на рис. 7.

Характеристики отклика для $NL1$ и $NL2$ являются близкими к линейным. Сигнал с NDIR-сенсора с разрешением 300–10000 ppm используется для обнаружения таких газов, как CO_2 и CH_4 . 12-разрядный АЦП обеспечивает восемь аналоговых входов, при этом время преобразования составляет всего 2,44 мкс на канал.

Заключение

В статье предлагается методика линейризации датчика, основанная на простой модели нейронной сети (всего с пятью нейронами). Этот подход может быть применен даже к датчикам, у которых отсутствует точная математическая модель, путем обучения ANN экспериментальным данным. В качестве примера приведен многослойный перцептрон, для которого изменение концентраций можно считать линейным. Нейронная сеть представлена в виде 3-слойного MLP с $\{1 - 5 - 1\}$ архитектурой. Количество узлов во входном, скрытом и выходном слоях равно 1, 5 и 1 соответственно. Таким образом, MLP содержит только 21 вес. Каждый узел скрытого слоя и выходного слоя состоит из сигмовидной

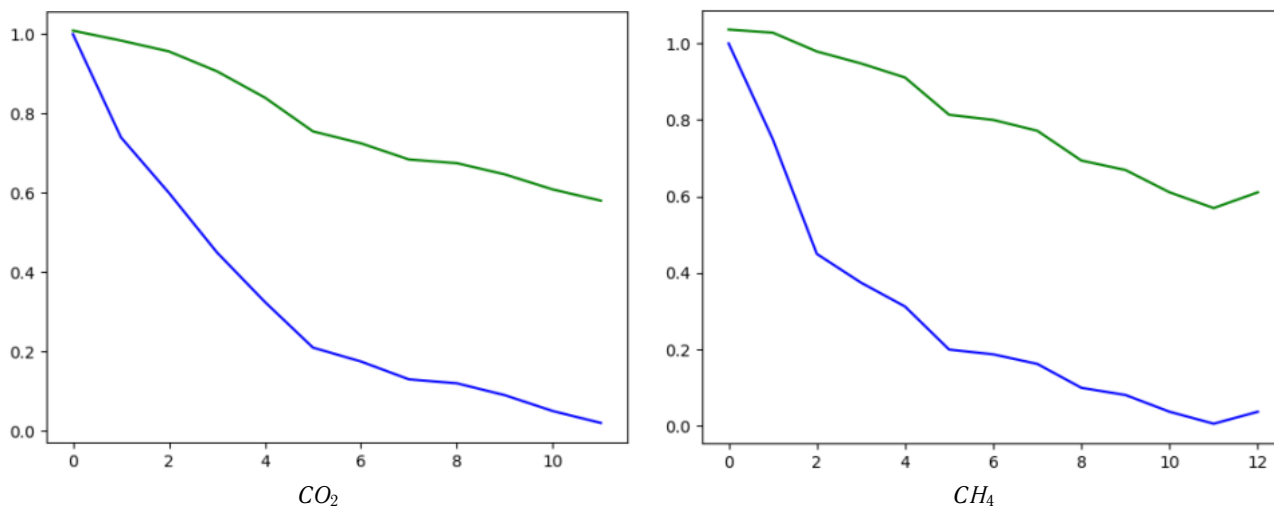


Рис. 7. Результаты линейризации для концентраций газов CO_2 и CH_4

нелинейной функции. Если характеристики измерительного преобразователя нелинейны, необходимо использовать соответствующие методы коррекции, как аппаратные, так и программные.

Оптический NDIR-сенсор состоит из 8 пар излучатель-детектор, которые заключены в отдельные капиллярные световоды. Входное отверстие регулируется с помощью клапана, а для создания системы отрицательного давления используется насос. Функциональность системы была продемонстрирована в ходе экспериментов по тестированию отдельных газов (CO_2 и CH_4) в различных концентрациях. Реакция датчиков показала, что изменения CO_2 и CH_4 в тестируемом диапазоне концентраций близки к нелинейной полиномиальной зависимости (второй степени). Приведены примеры нелинейных зависимостей и зависимостей после линейризации нейронными сетями.

При правильной архитектуре нейронных сетей очень сложные задачи могут быть решены всего несколькими нейронами. Операционная цель состояла в том, чтобы создать нейронную сеть, которая работала бы как можно быстрее, при этом вводя ошибку, которая не превышала бы ошибку, уже введенную при использовании нейронной сети для аппроксимации исходной функции. При использовании метода с обратным обучением эти сети могут быть легко обучены. Этот процесс обеспечивает баланс скорости и точности для систем, не использующих аппаратное обеспечение с плавающей запятой. Также известно, что температура, влажность и давление играют жизненно важную роль в определении уровней концентрации газа. Преимущество использования искусственной нейронной сети заключается в том, что значения давления, температуры и влажности также могут быть введены в качестве входных значений увеличением числа входных узлов. Это позволит получить высокоточные результаты для различных диапазонов вышеупомянутых факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rahman M., Devanathan R., Kuanyi Z. Neural Network Approach for Linearizing Control of Nonlinear Process Plant. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000;47:470–476. DOI: 10.1109/41.836363.
2. Azzouz A. et al. Advances in Colorimetric and Optical Sensing for Gaseous Volatile Organic Compounds. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019;118:502–516. DOI: 10.1016/j.trac.2019.06.017.
3. Esfahani S. et al. Development of a Tuneable NDIR Optical Electronic Nose. *Sensors*. 2020;20(23):6875. DOI: 10.3390/s20236875.
4. Бугров В. Е., Виноградова К. А. *Оптоэлектроника светодиодов: учебное пособие*. СПб.: НИУ ИТМО; 2013. 174 с.
5. Taherkhani N., Kiasaleh K. *Statistical Modelling of the Clipping Noise in OFDM-based Visible Light Communication System*. arXiv:1909.03587. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1909.03587.
6. Somsikov V. Non-Linearity of Dynamics of the Non-Equilibrium Systems. *World Journal of Mechanics*. 2017;7:11–23. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjm.2017.72002>.

7. Никифоров С. Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp. *Компоненты и технологии*. 2006;11. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-parametrov-semeystva-svetodiodov-cree-xlamp>.
8. Peng D., Liu K. Effect of Ambient Temperature and Heating Time on High-Power LED. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1777(1):012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1777/1/012033.
9. Peng W., Lan L., Wu P., Ning X. Detection and Treatment of VOCs in the Food Industry. *International Journal of Agriculture and Food Sciences Research*. 2024;1(1):115–123. DOI: 10.62051/ijafsr.v1n1.12.
10. Асеев В. А., Бабкина А. Н., Миронов Л. Ю., Нурьев Р. К. *Спектроскопические методы исследования материалов фотоники*. СПб.: Университет ИТМО; 2021. 97 с.
11. Islamia J. et al. Linearization of the Sensors Characteristics: A Review. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2019;12(1):1–21. DOI: 10.21307/ijssis-2019-007.
12. Tajima T. et al. Multi-Modality Analysis of Glucose Aqueous Solution Using Photoacoustic and Dielectric Spectroscopy for Non-Invasive Glucose Monitoring. *Proc. SPIE, Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing*. 2017;10064:1006445. DOI: 10.1117/12.2251049.
13. Kurseeva V. Y., Tikhov S. V., Valovik D. V. Nonlinear Multiparameter Eigenvalue Problems: Linearised and Nonlinearised Solutions. *Journal of Differential Equations*. 2019;267(4):2357–2384. DOI: 10.1016/j.jde.2019.03.014.
14. Bucci G., Faccio M., Landi C. New ADC with Piecewise Linear Characteristic: Case Study – Implementation of a Smart Humidity Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2001;49(6):1154–1166. DOI: 10.1109/19.893250.
15. Catunda S. Y. C., Naviner J.-F., Deep G. S., Freire R. Designing a Programmable Analog Signal Conditioning Circuit without Loss of Measurement Range. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2003;52(5):1482–1487. DOI: 10.1109/TIM.2003.818556.
16. Capone S. et al. Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2003;5(5):1335–1348. DOI: 10.1002/chin.200429283.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ БЕРЕЖЛИВОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

А. В. Курамшина^а, С. А. Лысенкова^б, А. А. Фахриева^в

Сургутский государственный университет, Сургут, Российская Федерация

^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9891-4959>, ✉ kuramshina_av@surgu.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>, lysenkova_sa@surgu.ru

^в ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1915-6656>, fadelina2003@mail.ru

Аннотация: бережливое производство — концепция, которая сегодня является основой трансформации экономики страны. Значимость и своевременность ее продиктована возможностью увеличить эффективность за счет высвобождения ресурсов, повышения производительности и безопасности, минимизации затрат и др. В таких условиях становится актуальным обучение этой концепции. Решением может стать формирование информационной системы обучения бережливому производству в целом и разработка веб-приложения в частности. Использование веб-приложения обеспечивает неограниченный доступ к информации в режиме 24/7, прозрачность системы оценивания, возможность выполнять задания в удобном темпе и формирование навыков работы с различными видами информации в цифровой среде.

Ключевые слова: веб-приложение, бережливое производство, дистанционное обучение, онлайн-обучение, симуляция, модели базы данных, система управления базами данных.

Для цитирования: Курамшина А. В., Лысенкова С. А., Фахриева А. А. Разработка прототипа веб-приложения для обучения бережливому производству. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):46–51.

Поступила в редакцию: 01.09.2025.

В окончательном варианте: 19.09.2025.

PROTOTYPE WEB APPLICATION FOR LEAN MANUFACTURING TRAINING

A. V. Kuramshina^а, S. A. Lysenkova^б, A. A. Fahrieva^в

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9891-4959>, ✉ kuramshina_av@surgu.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>, lysenkova_sa@surgu.ru

^в ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1915-6656>, fadelina2003@mail.ru

Abstract: lean manufacturing is a production management concept that increases efficiency by freeing resources, improving productivity and safety, and reducing costs. The growing importance of this approach creates a demand for systematic training. We developed a prototype web application for interactive training in lean manufacturing. The application provides students with continuous access to learning materials, transparency in assessment, the ability to complete tasks at their own pace, and opportunities to build digital skills while working with various types of information. The study shows that the application supports effective training in lean manufacturing and meets the current demand for digital educational tools.

Keywords: web application, lean manufacturing, distant learning, training, simulation, database models, database management system.

Cite this article: Kuramshina A. V., Lysenkova S. A., Fahrieva A. A. Prototype Web Application for Lean Manufacturing Training. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):46–51.

Original article submitted: 01.09.2025.

Revision submitted: 19.09.2025.

Введение

Современные условия стремительного развития технологий и цифровизации требуют внедрения инновационных подходов в обучение и профессиональную подготовку в различных сферах. Одной из таких областей является бережливое производство — концепция, направленная на оптимизацию процессов, снижение потерь и повышение эффективности. Несмотря на признание ее значимости, освоение основ бережливого производства часто оказывается затруднительным из-за сложностей восприятия и отсутствия интерактивных обучающих инструментов.

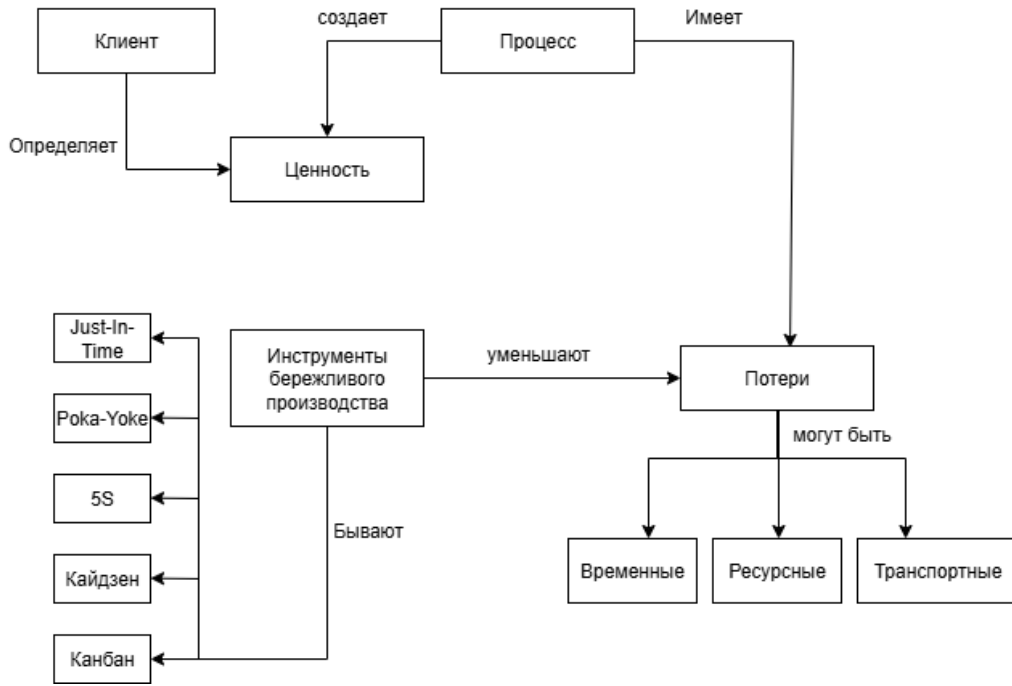


Рис. 1. Пояснительная модель предметной области

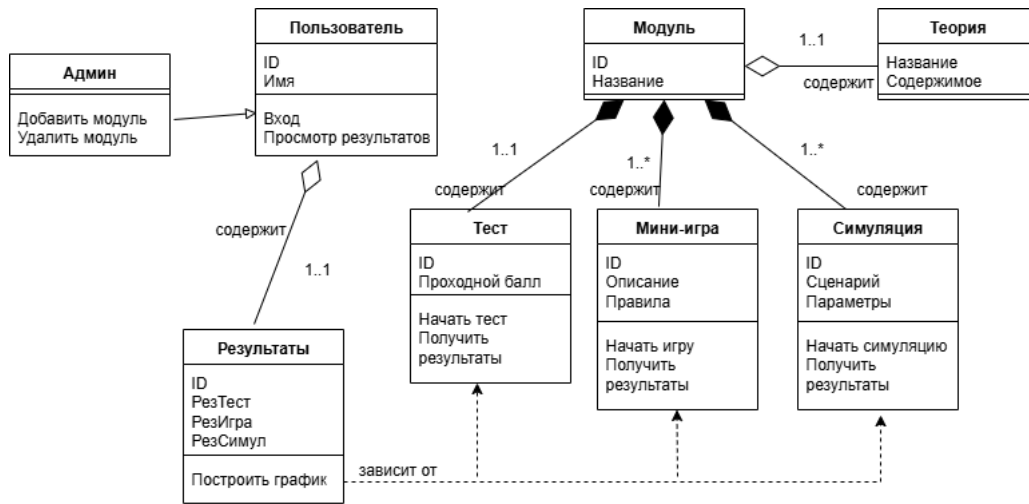


Рис. 2. Концептуальная модель предметной области

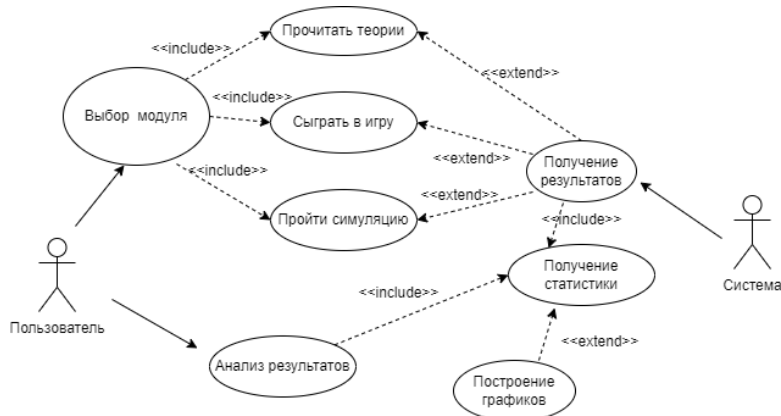


Рис. 3. Use-case диаграмма

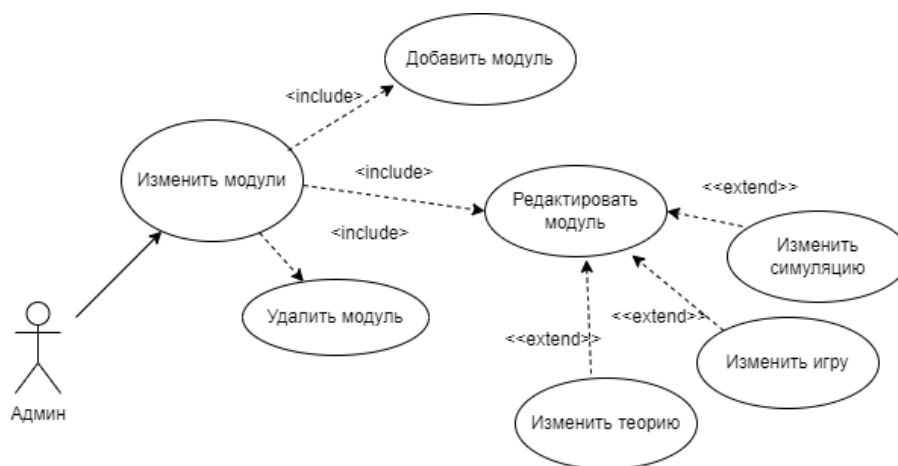


Рис. 4. Use-case диаграмма управления модулями

В настоящее время бережливое производство становится актуальным на всех уровнях управления. Использование lean-технологий — основа национальных проектов. Так, в частности, это базис проекта «Производительность труда», который в 2025 году продолжился и трансформировался в рамках национального проекта «Эффективная и конкурентная экономика» [1], а эффективный регион приравнен к бережливому [2]. Бережливое производство реализуется через федеральные центры компетенций и систему региональных [3], бережливым становится то предприятие, которое применяет принципы и инструменты бережливого производства и постоянно совершенствуется.

С 2022 года бережливое производство входит во все стандарты системы среднего образования в формулировке общей компетенции (ОК-7) с обязательным изучением дисциплины «Основы бережливого производства». В 2024 году сформирован Отраслевой центр компетенций «Бережная школа», осуществляющий свою деятельность на базе ФГБНУ «Институт стратегии развития образования» и обобщивший лучшие практики реализации бережливых проектов в образовательных организациях [4].

Это предопределило выбор предметной области. Было решено сформировать веб-приложение как элемент технологии электронного и дистанционного обучения с возможностью дальнейшей его трансформации (использованием виртуальной/дополненной реальности, увеличением возможностей геймификации и др.).

Материалы и методы

Онлайн-обучение — это процесс получения знаний и навыков с использованием информационных технологий и сети Интернет без необходимости физического присутствия в аудитории.

Веб-приложение является отличным выбором для реализации онлайн-обучения, так как для лучшего усвоения материала используются интерактивные элементы, применение которых затруднено для статических страниц. Простота реализации и большая распространенность Multi Page Application (MPA) — основные причины выбора такого типа веб-приложения.

Методика и методы исследования включают в себя анализ литературы, методы проектирования и прототипирования. Исследование построено на разработке модели базы данных, концептуальной модели предметной области, диаграммы вариантов использования, диаграммы классов, диаграммы компонентов.

Результаты и их обсуждение

В основу структуризации приложения положены инструменты бережливого производства, применение которых актуально для современных предприятий [5–9]. Однако стоит отметить, что структура информационной системы универсальная и позволяет трансформировать опыт.

В ходе изучения предметной области были выделены основные понятия и создана пояснительная модель, которую можно увидеть на рисунке 1.

Концептуальная модель (рис. 2) визуализирует основные элементы веб-приложения.

В ходе сравнительного анализа аналогов было решено уделить большее внимание раскрытию главных инструментов и методов бережливого производства для более глубокого погружения в дан-

ную концепцию. Также внимание уделяется свободе доступа к модулям после их прохождения. Еще одно преимущество веб-приложения — возможность легкой масштабируемости системы, добавление новых модулей, а соответственно, и теории, а также возможность наполнения веб-приложения другим контентом.

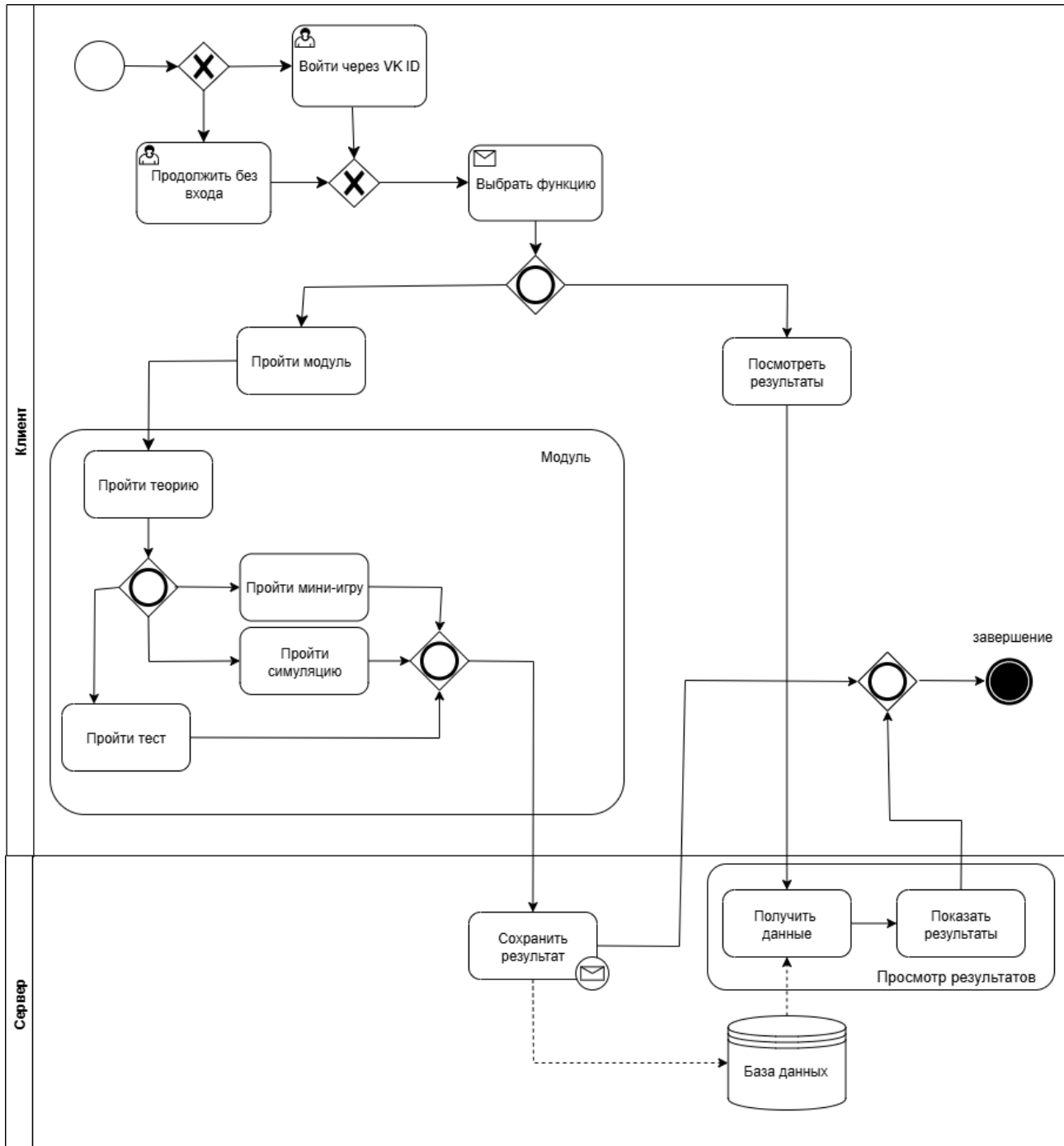


Рис. 5. BPMN диаграмма

Основной сценарий использования веб-приложения для обучения, в котором пользователь выбирает модуль, читает теорию, играет в игру, проходит симуляцию и получает результаты, представлен в качестве Use-case диаграммы (рис. 3), в которой показано, как пользователь взаимодействует с системой. На рисунке 4 отображено управление модулями.

Бизнес-процесс системы приведен на рисунке 5, в котором показан процесс работы информационной системы от входа до выполнения модулей и сохранения результатов.

Основной сценарий взаимодействия пользователя с системой:

1. Пользователь выполняет вход либо же продолжает без входа.

2. Далее выбирается один из предложенных модулей и начинается ознакомление с его контентом.
3. Ознакомившись со страницей теории, пользователь может либо пройти тест, либо сыграть в мини-игру, либо пройти симуляцию.
4. После прохождения контента результаты сохраняются в базу данных.
5. Пользователь может либо снова пройти модуль, либо ознакомиться с результатами.
6. При просмотре результатов клиентская часть запрашивает у сервера получение данных из базы данных, после чего преобразует их в визуальный формат.

На рисунке 6 представлена UML-диаграмма классов, которая показывает структуру системы и связи между ее элементами.

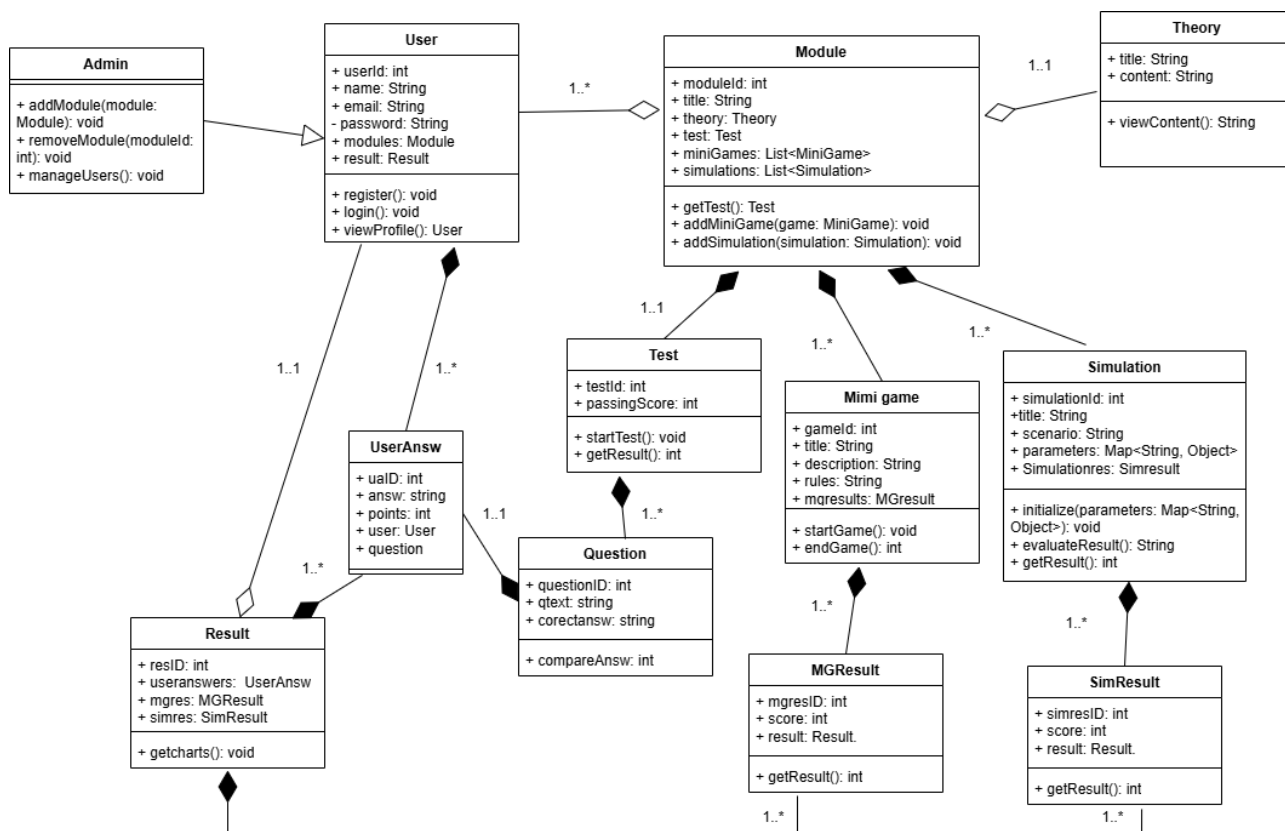


Рис. 6. UML диаграмма классов

Система управления базами данных (СУБД) теоретически может быть размещена на отдельном выделенном сервере, что является типичной практикой в корпоративных и облачных инфраструктурах. Это позволяет разграничить нагрузку между компонентами, повысить отказоустойчивость и масштабируемость. Однако использование выделенного сервера для СУБД не является необходимым. Пользователь получает доступ к веб-приложению с помощью персонального компьютера или иного устройства (например, планшета или смартфона), на котором установлен стандартный веб-браузер. При переходе по URL-адресу веб-сайта клиент загружает интерфейс приложения из интернета, после чего взаимодействует с ним, отправляя и получая данные без необходимости установки дополнительных программ.

В основу проектирования пользовательского интерфейса положено, что каждая страница веб-сайта состоит из двух частей: заголовка и основной части. В заголовке содержится информация о текущем пользователе, такая как имя, и кнопка перехода в личный кабинет, в котором отображается аналитика по пройденным курсам. В основной части находится вся важная информация, такая как выбор модуля или текст теоретической части.

Дизайн включает такие аспекты, как навигация с помощью клавиатуры, совместимость с программами для чтения экрана и достаточный цветовой контраст.

На главной странице представлено приветственное сообщение, которое коротко объясняет суть сайта, также тут можно будет добавить реальные отзывы пользователей для ознакомления. На странице

выбора модулей указан прогресс прохождения в виде горизонтальной полоски и процент пройденного материала. Для структуризации веб-приложения использованы основные методы и инструменты, приведенные в ГОСТ Р 56407-2023 «Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения», утвержденном приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 октября 2023 года № 1292-ст.


Заключение

Использование возможностей веб-приложения для интенсификации образовательного процесса в целом и обучения бережливому производству в частности позволяет быстро, адекватно и интересно достигать поставленных целей. Веб-приложение для обучения бережливому производству может стать полезным и эффективным инструментом повышения квалификации как сотрудников предприятий, так и других людей, желающих изучить инструменты бережливого производства. Данная разработка может получить дальнейшее развитие в создании большего количества теоретических блоков, а соответственно, и мини-игр с симуляциями, увеличения количества интерактивных упражнений. Также есть возможность разработки мобильного приложения для привлечения большего количества пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный проект «Эффективная и конкурентная экономика». Режим доступа: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/effektivnaya-i-konkurentnaya-ekonomika/?ysclid=mfoyr91adk703689997>.
2. Эффективный регион. Режим доступа: <https://efregion.ru/>.
3. Производительность труда — Федеральный центр компетенций. Режим доступа: <https://производительность.рф/?ysclid=mfhqh2bd5b955799999>.
4. Лучшие практики реализации бережливых проектов в образовательных организациях. М., 2024. 511 с. Режим доступа: <http://bipkro.ru/wp-content/uploads/2024/09/Sbornik-luchshih-praktik-realizacii-berezhlivyh-proektov-v-obrazovatelnyh-organizaciyah.pdf?ysclid=mfozaz64jb883477094>.
5. Артёмова И. В., Вагина Т. А., Гнилицкая В. А. и др. Методические рекомендации по внедрению бережливых технологий в деятельность образовательных организаций Белгородской области. Белгород, 2019. Режим доступа: <https://new.beliro.ru/wp-content/uploads/2019/09/metod.rekomendacii-po-vnedreniju-berezhlivyh-tehnologij.pdf>.
6. Лямин Б. М., Янчевская М. Ю. A Model for Satisfaction Improvement in Participants of the Educational Process Via the Introduction of Lean Tools in the Administration of Universities. *Technoeconomics*. 2025;4(2):32–41. DOI: 10.57809/2025.4.2.13.3.
7. Цяо С., Мазурчук Т. М. Повышение эффективности компании на основе принципов бережливого производства. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2023;13(2–1):304–313. DOI: 10.34670/AR.2023.40.30.027.
8. Суйкова О. А. Технологии бережливого производства в системе образования. *Инновационное развитие профессионального образования*. 2021;3:170–183. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-berezhlivogo-proizvodstva-v-sisteme-obrazovaniya>.
9. Курамшина А. В., Попова Е. В. *Основы бережливого производства*. М: КноРус; 2023. 200 с.

ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БУДУЩЕГО ДЛЯ БИОСИСТЕМ В БИОКИБЕРНЕТИКЕ

А. Б. Рубин^{1,a}, В. М. Еськов^{2,b}, В. В. Еськов^{3,c}, Ю. В. Вохмина^{4,d}¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*² *Сургутский филиал федерального государственного автономного 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 *Самарский государственный социально-педагогический университет, г. Самара, Российская Федерация*^a  rubin@biophys.msu.ru, ^b yeskov48@mail.ru, ^c firing.squad@mail.ru, ^d Vakhmina@mail.ru

Аннотация: еще в 1944 году Е. Schrödinger предлагал создать новые законы для биосистем, но только в рамках современной физики (это было ошибкой). Через 3 года (1947 год) Н.А. Бернштейн представил гипотезу о «повторении без повторений» в биомеханике. В 1948 году Weaver пошел дальше всех: он выводит все биосистемы за пределы всей современной науки. Никто в мире на все это не отреагировал, и только в 1999 году В.Л. Гинзбург выступил против редукции биологии и медицины к законам физики. Однако только научная школа профессора В.М. Еськова доказала правоту этих четырех выдающихся ученых. Нами была доказана уникальность любой выборки любого параметра функции организма любого человека. Одновременно мы доказали отсутствие динамического хаоса в поведении любых параметров организма человека. Эпоха редукции биологии к законам физики завершилась. Возникла новая наука (об этом и писал Weaver), которая имеет особые понятия, законы и модели.


Ключевые слова: детерминизм, хаос, биосистемы, эффект Еськова–Зинченко.

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: Рубин А. Б., Еськов В. М., Еськов В. В., Вохмина Ю. В. Проблемы прогнозирования будущего для биосистем в биокибернетике. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):52–61.

Поступила в редакцию: 13.08.2025.*В окончательном варианте:* 10.09.2025.

FORECASTING FOR BIOSYSTEMS IN BIOCYBERNETICS

A. B. Rubin^{1,a}, V. M. Eskov^{2,b}, V. V. Eskov^{3,c}, Yu. V. Vokhmina^{4,d}¹ *Moscow State University, Moscow, 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 *Samara State University of Social Sciences and Education, Samara, Russian Federation*^a  rubin@biophys.msu.ru, ^b yeskov48@mail.ru, ^c firing.squad@mail.ru, ^d Vakhmina@mail.ru

Abstract: in 1944, E. Schrödinger proposed formulating new laws for biosystems within the framework of modern physics, which later proved to be a mistake. In 1947, N.A. Bernstein advanced the hypothesis of “repetition without repetition” in biomechanics. In 1948, W. Weaver suggested that biosystems extend beyond the boundaries of modern science. These ideas went largely unnoticed until 1999, when V.L. Ginzburg opposed the reduction of biology and medicine to the laws of physics. The research group led by Prof. V.M. Eskov confirmed the correctness of these four scientists. We demonstrated the uniqueness of each sample of any physiological parameter in every individual. We also demonstrated the absence of dynamic chaos in the behavior of human physiological parameters. Biology is no longer reduced to the laws of physics. A new science has emerged, as Weaver anticipated, with its concepts, laws, and models.

Keywords: determinism, chaos, biosystems, Eskov–Zinchenko effect.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Rubin A. B., Eskov V. M., Eskov V. V., Vokhmina Yu. V. Forecasting For Biosystems in Biocybernetics. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):52–61.

Original article submitted: 13.08.2025.

Revision submitted: 10.09.2025.

Введение

Проблема редукции любых бионаук к законам современной физики и математики имеет некоторую историю. Если быть абсолютно точными, то первая работа на эту тему появилась в 1944 году в виде книги «What is Life?», которую представил нобелевский лауреат E. Schrödinger [1]. Через 3 года выдающийся биомеханик 20 века Н.А. Бернштейн усилил эту проблему. В своей фундаментальной работе [2] Бернштейн выдвинул гипотезу о «повторении без повторений» в организации любого движения. Никаких строгих экспериментальных доказательств этому он не представил тогда, но были физиологические аргументы (на базе реальности 5 разных систем для организации движений). Подчеркнем, Бернштейн шел своим путем, и только в биомеханике. Однако эта его гипотеза уже нашла некоторое подтверждение в исследованиях разных групп ученых Сургута, Москвы, Тулы.

Через год один из основоположников теории информации W. Weaver выступил с революционной статьей «Science and Complexity» [3]. В этой работе он полностью отказывается от редукции биосистем к законам физики и требует создания новой науки для описания живых систем (или систем третьего типа — СТТ). Фактически Weaver продолжил идеи Schrödinger, но пошел дальше. Weaver вывел все системы третьего типа (биосистемы) за пределы всей современной науки.

Определенные сомнения в возможности редукции высказывал основоположник нечетких множеств L. Zadeh, но это было только предположение. На долгие годы мировая наука забыла о работах Schrödinger [1], Бернштейна [2] и Weaver [3]. Только в 1999 году нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург опять поднимает эту особую проблему редукции. Он прямо выступил против редукции [4]. Для нас обзорная работа Гинзбурга была толчком для проверки идей и гипотез всех четырех ученых, которых мы сейчас отметили. Их идеи открывали путь в новую науку.

Это было толчком для проверки, в первую очередь, идей Бернштейна в биомеханике. Мы к этому времени создали высокоточные токовихревые датчики для регистрации перемещений (движений) конечностей человека. Регистрация движений производилась с точностью $\Delta x < 0,1$ мм по вертикали (для пальца). Это было 2–3% погрешностей, что в биомеханике не всегда имеет место.

В итоге за последние 25 лет мы доказали все эти гипотезы на основе доказательства эффекта Еськова–Зинченко (ЭЗ) [5–9]. Фактически ЭЗ доказал отсутствие статистической устойчивости любой выборки треморограммы (ТМГ) и теппинграммы (ТПГ) любого человека на нашей планете. Уникальность любой выборки (основа ЭЗ) завершила дальнейшее применение статистики не только в биомеханике, но и в биологии, медицине, психологии, экологии и т.д. Редукция СТТ к законам физики отсутствует [5–9].

Краткая хронология идей редукции живых систем к законам физики

Как мы уже отметили во введении, первым ученым, который выразил сомнения в возможности описания биосистем (СТТ по Weaver) в рамках действующих законов физики, был нобелевский лауреат E. Schrödinger. Он открыто говорил о необходимости создания новых законов для живых систем (СТТ) [1]. Однако он считал, что физики легко примут эти новые законы (они будут в рамках современной физики), и верил, что они будут быстро созданы различными учеными. Нобелевский лауреат ошибся дважды в своих прогнозах.

Во-первых, как показали наши исследования за последние 25 лет, редукция биосистем к законам и моделям современной физики полностью невозможна. Особые свойства (которые мы доказали) живых систем не позволяют их описывать и изучать ни методами теории динамических систем (ТДС), ни методами стохастики (статистика в биологии и медицине сейчас превалирует). Гинзбург был прав: редукция живых систем к законам физики ставится под сомнение.

Точнее, редукция живых систем к законам физики невозможна, и тут Weaver и Гинзбург были полностью правы. Во-вторых, нобелевский лауреат был уверен, что новые законы (для описания СТТ) будут приняты физиками. Это тоже было ошибкой. Вот уже 25 лет мы пытаемся опубликоваться в физических журналах, и наши статьи все эти годы игнорировали (как и работы указанных четырех ученых). Это совершенно непонятно, так как все экспериментально легко проверяется. Получается, что наука отходит от эксперимента?

Подчеркнем, что через 3 года после Schrödinger выдающийся биомеханик 20 века Н.А. Бернштейн представил свою монографию «О построении движений» [2]. В этой работе Бернштейн предложил революционную гипотезу о «повторении без повторений» в биомеханике. Однако его идеи тоже игнорировали, как и идеи Schrödinger. Такая ситуация для нас совершенно неприемлема.

Он пытался доказать эту гипотезу путем доказательства реальности участия пяти различных систем в организации любого движения. Бернштейн представил системы A, B, C, D, E и говорил, что они работают хаотично. Последнее означает, что эти системы включаются и выключаются в организацию любого движения хаотично и сила, длительность их выполнения при «построении движения» тоже хаотичны. Поэтому невозможно повторить любое движение. Но в каком смысле реализуется это повторение? Ответ на этот вопрос Бернштейн не представил.

В физике и математике существует два типа повторений. В теории динамических систем мы работаем с векторами состояний системы $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном фазовом пространстве состояний (ФПС). Этот вектор $x(t)$ описывает некоторую фазовую траекторию (ФТ), которая может многократно и точно повториться. Зная начальные параметры $x(t_0)$ для вектора $x(t)$ и уравнения движений в виде дифференциальных уравнений, разностных уравнений, интегральных уравнений и т.д., мы можем точно (строго) повторить ФТ и конечное состояние $x(t_f)$ для вектора $x(t)$. ТДС строго требует точного повторения всех точек ФТ [5–9]. Это основа всей детерминистской науки.

Только в динамическом хаосе (ДХ) $x(t_f)$ не повторится, и это создало определенные проблемы для ТДС. Подчеркнем, в ТДС все точно (строго) определено и повторимо. Здесь повторение точное. Иная ситуация в стохастике. Здесь задание (повторение) начального условия — состояния $x(t_0)$ не гарантирует попадание 2-ой раз (точно) в уже полученную ранее точку $x(t_f)$. Будущее точно нельзя повторить! Однако в ДХ мы имеем инвариантность мер в странном аттракторе, а это уже повторение! Речь идет о равномерном распределении в странном аттракторе.

Поэтому мы работаем с выборками точек $x(t_f)$. Они получаются при нескольких повторениях (здесь уже нет точных повторений). Однако в стохастике должна повторяться статистическая функция распределения (ее характеристики, например), и это тоже уже будут повторения. О каких «неповторениях» говорил Бернштейн? Нам и до настоящего времени неизвестно, говорил ли он о точных повторениях ФТ и $x(t_f)$, как в ТДС, или о повторении выборок? Нам, и никому в мире, это неизвестно! Выдающийся биомеханик об этом ничего не сказал [2]. Однако он мог в эксперименте это сделать, но не сделал!

Бернштейн доказал (качественно) отсутствие «повторений» в организации движений. Но о каких повторениях может идти речь? В рамках ТДС, где есть точные повторения начальных условий $x(t_0)$, фазовой траектории для $x(t)$ или конечного состояния? В стохастике же повторения другие. Здесь требуется повторение распределения для выборки. Мы работаем уже не с точкой, а с облаками точек в ФПС. Имеются законы (приближенные) для оценки этих выборок.

Через год W. Weaver в своей выдающейся работе [3] попытался дать ответ на этот вопрос о «повторениях». Weaver впервые дал общую классификацию всех систем природы и попытался выделить биосистемы (СТТ) за границы всей современной детерминистской и стохастической науки (ДСН). Он выделяет детерминистские системы (Simplicity, или системы 1-го типа — СПТ). Далее он говорит о стохастических системах (Disorganized complexity, системы 2-го типа — СВТ). Наконец, он выделяет биосистемы, или СТТ, которые не объект всей ДСН [3].

Подчеркнем, для своей классификации Weaver не приводит никаких аргументов. Он просто говорит, что для СПТ созданы теория динамических систем и вся детерминистская наука. Здесь прошлое (задание, например, $x(t_0)$) строго определяет будущее (например, $x(t_0)$). Такие СПТ Weaver обозначил как Simplicity (простота). Для них будущее определено.

В рамках ТДС создано много моделей биосистем и даже получены нобелевские премии (по биологии и физиологии). Достаточно напомнить модель популяционного взрыва в виде $\frac{dx}{dt} = ax$, где

$x = x(t)$ – численность популяции, a – биотический потенциал. Известна 1-ая модель с обратной связью $\frac{dx}{dt} = (a - bx)x$, а также модель Лотки–Вольтерры (хищник – жертва), за которую эти двое ученых получили нобелевскую премию. Известна модель Ходжкина–Хаксли (для нейрона) в физиологии. Она тоже создана в рамках ТДС.

Подчеркнем, что в конце 80-х годов 20-го века нобелевский лауреат I.R. Prigogine резко выступил против дальнейшего применения детерминистского подхода (ТДС, в частности) для описания биосистем. Он так и называл свою книгу «The End of Certainty» [10]. Prigogine говорил о том, что в живой природе нет биосистем, которые точно могут описываться моделями ТДС. Детерминизм не описывает СТТ. Однако Prigogine, как и многие другие нобелевские лауреаты, очень надеялся на стохастику и динамический хаос при описании биосистем.

Это было его большой ошибкой. Подчеркнем, что Weaver не относит к СВТ все биосистемы, но он говорит уже о какой-то complexity для СВТ. Почему? Weaver не дает объяснения, но мы сделали анализ его работ и дали этому интерпретацию. Это логика работ Weaver, если его внимательно читать [3]. Необходимо бережно относиться к нашим предшественникам. Повторим, этих ученых игнорируют уже несколько десятков лет.

Действительно, чем СПТ отличаются от СВТ? Это очевидно: СВТ демонстрируют Uncertainty и Unpredictability при описании биосистем. В стохастике при повторении $x(t_0)$ и всего процесса мы не знаем, чем это закончится. Будущее в виде $x(t_f)$ для СВТ имеет Uncertainty и Unpredictability. Если мы имеем дело с непрерывной случайной величиной (НСВ), то мы уже никогда не попадем в ранее полученную точку $x(t_f)$. Этим ТДС отличается от стохастики.

Для НСВ нет точных повторений финала любого процесса. Однако все СТТ – это complexity, так как это НСВ. Параметры функций организма человека непрерывно и хаотически изменяются на некоторых отрезках: $x(t_f) \in [a; b]$. Поэтому появляется complexity у СВТ и тем более у СТТ. Поэтому мы в стохастике работаем с выборками $x(t_f)$, то есть опыты многократно повторяют и находят статистическую функцию распределения $F(x)$ (или $f(x)$ – дифференциальный закон распределения). Последние 150–200 лет это было основой всех наук о жизни.

В стохастике появляется Uncertainty для будущего, и мы работаем с выборками. Можно было предположить, что для биосистем все еще хуже, и как одна точка $x(t_f)$ не может описать СВТ, так и целая выборка уже не может описывать СТТ. Последний вывод сделали мы сами 25 лет назад и начали этот тезис проверять для разных биосистем. Однако об этом скажем ниже [5–9, 13–16].

Для нас сейчас важно подчеркнуть: Schrödinger говорил об особых законах для биосистем, но он не отрицал редукцию; Бернштейн говорил о «повторении без повторений», но не дал строгого понятия этому тезису (это все гипотезы); Weaver пошел дальше всех, но его тоже игнорировали более 70-ти лет!

Он отрицал редукцию биологии (всех наук о жизни) к моделям ТДС (детерминизма) и всей стохастики. Но почему? Где доказательства границ ДСН? О каких «повторениях» мы можем говорить при изучении живых систем? Есть ли редукция биологии, медицины и других наук о жизни к законам физики?

Действительно, ответ на этот вопрос все последние 80 лет лежал на поверхности: надо было сделать (как и предлагал Бернштейн) эти «повторения» и сравнить результаты. Для нас остается загадкой: почему за 150 лет (активного применения стохастики в науках о жизни) никто не измерил (подряд) на интервалах времени Δt_1 и Δt_2 две выборки одного параметра организма одного (любого) испытуемого и не сравнил статистически такие две выборки (любого параметра). Почему никто не проверил величину частоты статистического совпадения двух соседних выборок одного параметра одного человека. Подчеркнем, при этом человек находится в неизменном состоянии в рамках физиологического, физического, психологического покоя. Все вроде неизменно.

Можно было пойти дальше: подряд у одного испытуемого измерить 15 выборок $x(t_f)$ на интервалах $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ и проверить статистическую устойчивость таких $n=15$ выборок (можно взять любое n). Это было загадкой и догмой все 150 лет: две соседние выборки статистически совпадают. Почему никто не пытался это проверить? Почему физики и математики этого не требовали?

Мы верим, что трое выдающихся ученых [1–3] как-то увидели здесь какую-то ошибку, но сами ничего не сделали для доказательства своих гипотез (ответа на вопрос о статистической устойчивости выборок они не получили). Долгие годы после Weaver никто не пытался проверить его гипотезу об

отсутствии редукции СТТ к законам физики. Все верили в догму об устойчивости выборок. Только в 1999 году нобелевский лауреат по физике В.Л. Гинзбург возвращается к проблеме редукции и определяет ее как третью великую проблему всей физики [4]. Подчеркнем, Гинзбург говорит именно о физике!

Великие проблемы физики В.Л. Гинзбурга

Действительно, Гинзбург в самом начале своей обзорной статьи [4] говорит о догматизме в науке. Он напоминает нам всем о тоталитаризме (догматизме) и как бы подводит читателя к отсутствию редукции биологии к законам и моделям физики. Он выделил три великие проблемы физики: необратимость процессов (стрела времени), квантовый эксперимент и роль наблюдателя в нем, редукция биологии к законам физики и математики. Все эти три великие проблемы до настоящего времени игнорируются физиками во всем мире. Прошло уже четверть века (21-го века!) после публикации Гинзбурга, а в науке нет реакции на эту работу [4].

Нобелевский лауреат прямо говорит о невозможности такой редукции [4] и подчеркивает, что мы еще чего-то не знаем на фундаментальном уровне. Он пишет: «Вместе с тем, можно ли считать, что возможность редукции биологии к современной физике несомненна? ... дать положительный ответ было бы, как мне кажется, неправильно ... мы даже на фундаментальном уровне еще не знаем чего-то необходимого для редукции» [4].

Очевидно, это Schrödinger сделал первый шаг в проблеме редукции (он требовал новых законов для биологии) [1]. Бернштейн в биомеханике выдвинул гипотезу о «повторении без повторений» [2]. Weaver пошел дальше: он вывел все биосистемы за пределы всей современной науки и предложил для СТТ создать новую науку [3]. Это все были революционные идеи, но они требовали четких доказательств. Наука базируется на научных фактах, а их пока никто не представил.

Гинзбург в 1999 году окончательно нас (научную школу профессора В.М. Еськова) подтолкнул к отрицанию редукции, и мы начали изучать реальные проблемы СТТ на «фундаментальном уровне» [4]. Фактически речь идет о доказательстве нереальности двух «великих» догм в науке о жизни и во всех науках. Подчеркнем, именно физики и математики должны были эти две догмы опровергнуть, но никто этого не сделал.

Отметим, что существует и третья догма о том, что биосистемы имеют динамический хаос (Лоренца). Об этом писали три нобелевских лауреата: I.R. Prigogine [10], R. Penrose [11], M. Gell-Mann [12] в своих работах. Все три догмы никто детально в науке не проверял.

Во-первых, более 150 лет в науках о жизни считалось, что любая выборка может быть повторима (статистически), если с испытуемым в аспектах физиологии, физики, психологии ничего не происходит. Но уже Бернштейн говорит об отсутствии повторений в организации движений [2]. Более того, Weaver вообще вывел СТТ за пределы всей современной науки (ДСН). Гинзбург прямо отрицает редукцию биологии [4]. Четверо ученых говорят об одном.

Очевидно, что для проверки этого надо было сделать эти «повторения» и их проверить. Именно это мы выполнили 25 лет назад, когда зарегистрировали с помощью токовихревых датчиков две соседние треморограммы у одного испытуемого (в покое). Этот сигнал $x(t)$ — расстояние между датчиком и пальцем испытуемого, которое квантовалось (с частотой 100 Гц), и за 5 с мы получили выборку с 500-и точками для ТМГ. Две соседние выборки сравнивались статистически с помощью общепринятых в статистике критериев (например, по Вилкоксоу). Опыты повторяли по 100 раз (при парном сравнении).

В итоге мы получили частоту статистического совпадения двух соседних пар $p_{1,2} \leq 0,05$. Это очень малая величина, так как в статистике требуют $p_{1,2} \geq 0,95$. У нас все наоборот: с вероятностью $p_{1,2} \geq 0,95$ две соседние выборки ТМГ статистически не будут совпадать. У них критерий Вилкоксона $p_{1,2} \leq 0,05$.

Затем мы проверили совпадение 15-ти выборок ТМГ от одного испытуемого. Это означает: как вообще соотносятся выборки ТМГ одного испытуемого, которые были получены подряд? Имеют ли они вообще статистическую повторяемость? Многие выборки ТМГ от одного испытуемого! При этом с ним ничего не происходит! Физиологически и физически ничего не происходило с испытуемым.

Оказалось, что Бернштейн был прав: невозможно повторить выборку ТМГ статистически у одного испытуемого. Мы регистрировали тысячи матриц парных сравнений 15-ти выборок ТМГ и

ТПГ для одного испытуемого. Оказалось, что выборки совпадают с частотой $p_1 \leq 0,05$ для ТМГ и $p_2 \leq 0,15$ для ТПГ. Это очень малые величины для статистики!

Таблица 1

Матрица попарного сравнения выборок ТМГ от одного испытуемого (число повторов $N = 15$), применялся известный критерий Вилкоксона (уровень значимости $p < 0,05$, здесь число совпадений $k = 3$)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 2 | .00 | | .16 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .01 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 3 | .00 | .16 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 4 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 5 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 6 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .29 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 7 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .29 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 8 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 9 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 10 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 11 | .00 | .01 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .24 | .00 | .00 |
| 12 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 |
| 13 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .24 | .00 | | .00 | .00 |
| 14 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .03 |
| 15 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .03 | |

Для примера мы представляем две таблицы парных сравнений 15-ти ТМГ (таблица 1) и 15-ти ТПГ (таблица 2) для одного испытуемого (в покое). Очевидно, что выборки (в основном) статистически не совпадают. В таблице 1 число $k_1 \leq 6$ для ТМГ, то есть не более 6-ти пар (из 105-ти разных) могут статистически совпадать. Для остальных пар $p_{1,2} \geq 0,05$, то есть они все разные. В таблице 2 для ТПГ эти k_2 немного больше.

Удивительно, но за последние 150–200 лет никто этого в науках об СТТ (биосистемах) никогда не делал. Никто строго (т.е. статистически) не проверял однородность любых групп на предмет общей генеральной совокупности. Более того, обычно в биомедицине берут только одну точку исследуемого параметра. Например, один раз измеряют артериальное давление (у одного человека), один раз определяют биохимические параметры крови и т.д. Все по одному разу.

Это очень удивительно, но все эти величины непрерывно и хаотически изменяются. Надо регистрировать хотя бы одну выборку любого параметра $x_1(t)$! В итоге все человечество работало с одной точкой (где необходимы были выборки) и с одной выборкой (для одного испытуемого), хотя надо было ее повторять и проверять. Эти две догмы и сейчас имеют место во всей науке!

Конец первой догме в современной науке и реальность второй догмы

Нобелевский лауреат по физике В.Л. Гинзбург в самом начале своей статьи говорит о тяжелых последствиях догматизма в науке. В частности, в СССР не признавали генетику и кибернетику в 50-х годах 20-го века. Ученые подвергались репрессиям и наказаниям за свои убеждения [4].

Относительно биосистем Гинзбург выделяет третью «великую проблему физики», которая связана с возможностью редукции биологии к физике. Можно ли описывать биосистемы (СТТ) в рамках законов и моделей современной физики? Это великая проблема (вместе с обратимостью и ролью наблюдателя в квантовом эксперименте). Гинзбург прямо пишет: «... нельзя исключать возможность того, что мы даже на фундаментальном уровне не знаем чего-то необходимого для редукции» [4]. Очевидно, что скепсис Гинзбурга — это продолжение идей Schrödinger, Бернштейна и Weaver о биосистемах, их особых свойствах. Все четверо ученых были настроены против редукции СТТ [1–4].

Подчеркнем еще раз, что Weaver был первый в мире ученый, который предложил вывести все биосистемы за пределы детерминистской и стохастической науки. Он предлагал создать новую науку

Таблица 2

Матрица попарного сравнения выборок ТПГ от одного испытуемого (число повторов $N = 15$), применялся известный критерий Вилкоксона (уровень значимости $p < 0,05$, здесь число совпадений $k_2 = 20$)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|------------|-----|------------|-----|------------|------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | | .00 | .47 | .00 | .00 | .00 | .00 | .94 | .00 | .00 | .01 | .04 | .00 | .00 | .00 |
| 2 | .00 | | .10 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .21 | .00 | .00 | .00 |
| 3 | .47 | .10 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .87 | .00 | .00 | .00 | .11 | .00 | .00 | .00 |
| 4 | .00 | .00 | .00 | | .22 | .00 | .57 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .14 | .01 |
| 5 | .00 | .00 | .00 | .22 | | .00 | .20 | .00 | .00 | .00 | .54 | .00 | .00 | .66 | .83 |
| 6 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .49 | .00 | .00 |
| 7 | .00 | .00 | .00 | .57 | .20 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .10 | .28 |
| 8 | .94 | .00 | .87 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 9 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .31 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 10 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .31 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 11 | .01 | .00 | .00 | .00 | .54 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .60 | .21 |
| 12 | .04 | .21 | .11 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 |
| 13 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .49 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 |
| 14 | .00 | .00 | .00 | .14 | .66 | .00 | .10 | .00 | .00 | .00 | .60 | .00 | .00 | | .89 |
| 15 | .00 | .00 | .00 | .01 | .83 | .00 | .28 | .00 | .00 | .00 | .21 | .00 | .00 | .89 | |

для СТТ и тем самым опровергал редукцию биологии к законам и моделям современной физики.

Только в 1999 году В.Л. Гинзбург продолжил и развил этот тезис, отрицая редукцию биологии к законам физики. Он прямо пишет: «Вместе с тем можно ли считать, что возможность редукции биологии к современной физике несомненна? ... дать положительный ответ было бы, как мне кажется, неправильно...» [4]. Мы специально повторяем эти высказывания нобелевского лауреата, но они 25 лет игнорируются в науке.

После ознакомления с работами Schrödinger, Бернштейна, Weaver и Гинзбурга мы начали изучать СТТ на «фундаментальном уровне». Этот фундаментальный уровень касается вопроса: можно ли описывать СТТ в рамках стохастики? Выше мы говорили об ЭЕЗ. В этом эффекте любая выборка любого параметра функций (одного!) человека будет уникальной (неповторимой)! Значит, эта первая догма ДСН заставила всех ученых (во всем мире) работать с непрогнозируемыми биосистемами. Но наука (ДСН) не может работать с такими системами. Если нет прогноза будущего, то нет и науки — ДСН. Это аксиома.

Однако мы подошли к осознанию и второй «великой» догмы всех наук о жизни. Речь идет о проблеме выбора однородных групп испытуемых. Напомним, что в статистике имеется строгий критерий однородности любой группы людей. Этот критерий почти никто не использовал.

Для этого мы должны взять по одной выборке исследуемого параметра $x_i(t)$ организма каждого испытуемого из группы и сравнить все такие выборки (всех из группы) между собой. В статистике требуют, чтобы все испытуемые из одной группы имели общую генеральную совокупность. Это означает, что испытуемые статистически сильно не различаются, если их выборки параметра $x_i(t)$ принадлежат общей генеральной совокупности. Если этого нет, то каждый человек из группы имеет свою (особую) генеральную совокупность, а группа не однородная.

Очень странно, но за последние 150–200 лет никто во всех науках о жизни не делал такие испытания и сравнения выборок $x_i(t)$ для всех из группы. Фактически считалось, что при одинаковом возрасте, поле и т.д. группа уже однородна. Это было глубочайшим заблуждением всей науки, так как физики не требовали выполнения этого критерия для всех СТТ. Очевидно, что вина физиков (биофизиков) в этой догме существенная.

В качестве доказательства реальности потери однородности группы испытуемых в биомеханике мы представляем таблицу 3 для треморограмм. У каждого из 15-ти испытуемых (одного пола, возраста и т.д.) якобы однородной группы мы зарегистрировали выборку из 500 точек ТМГ. Затем эти

все 15 выборок этих 15 испытуемых мы попарно сравнивали по критерию Манна–Уитни (и другим критериям).

Таблица 3

Матрица попарного сравнения выборок ТМГ группы для разных испытуемых ($N = 15$), использовался известный критерий Ньюмана–Кейлса (уровень значимости $p < 0,05$, число совпадений $k_3 = 10$)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|-----|------------|------------|-----|-----|------------|-----|------------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 2 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .58 | .00 | .33 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 3 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .01 | .00 | .00 | .00 | .00 | .79 | .00 | .17 | .00 |
| 4 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .51 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 5 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 6 | .00 | .58 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .81 | .00 | .00 | .02 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 7 | .00 | .00 | .01 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .98 | .00 | .25 | .00 |
| 8 | .00 | .33 | .00 | .00 | .00 | .81 | .00 | | .00 | .00 | .04 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 9 | .00 | .00 | .00 | .51 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 10 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 11 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .02 | .00 | .04 | .00 | .00 | | .00 | .00 | .00 | .00 |
| 12 | .00 | .00 | .79 | .00 | .00 | .00 | .98 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .78 | .00 |
| 13 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | | .00 | .48 |
| 14 | .00 | .00 | .17 | .00 | .00 | .00 | .25 | .00 | .00 | .00 | .00 | .78 | .00 | | .00 |
| 15 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .00 | .48 | .00 | |

Подчеркнем, что таблица 3 – типичная матрица парных сравнений выборок для любых 15 (якобы однородная группа) испытуемых. В итоге мы получили число k_3 пар выборок ТМГ двух разных людей, у которых критерий Манна–Уитни $p_{i,j} \geq 0,05$, имеет очень небольшое значение. Обычно в таких матрицах для ТМГ ($k_3 \leq 10$) эти числа $k_3 < 10\%$. Для теппинга это число чуть больше, но обычно для ТПГ $k_4 \leq 15\%$. Это очень малые величины в статистике, то есть группы не могут быть однородными.

Аналогичные результаты мы получили для 16-ти параметров сердечно-сосудистой системы (ССС) любой (якобы однородной!) группы испытуемых. Здесь, как и для ТПГ, такие числа $k_4 \leq 15\%$ (для них критерий Манна–Уитни $p_{i,j} \geq 0,05$). Все группы испытуемых (якобы однородные) не могут быть однородными. СССР не имеет однородных групп.

Для примера мы представим одну типичную матрицу парных сравнений выборок (таблица 4) кардиоинтервалов (КИ) для 15-ти разных испытуемых ($k_4 = 18$). Число k_4 с критерием Манна–Уитни $p_{i,j} \geq 0,05$ очень невелико. Для КИ это число $k_4 \leq 15\%$ в любой, якобы однородной, группе испытуемых.

Были построены десятки тысяч подобных матриц парных сравнений якобы однородных групп людей по параметрам ТМГ, ТПГ, КИ, электромиограмм, электроэнцефалограмм, электронейрограмм и многих параметров крови (уровень сахара в крови, например). Везде картина одинакова.

В живой природе нет однородных групп испытуемых (больных в медицине, с одинаковым диагнозом). Любая группа неоднородна по строгим критериям статистики. Странно, но за эти 150 лет никто не проверял: имеют ли люди общие генеральные совокупности, если их объединить в группу.

Это вторая «великая» догма всех наук о жизни значительно затрудняет дальнейшее применение статистики в изучении биосистем. Любая группа испытуемых (больных в медицине) не может быть однородной. Все эти 150–200 лет биология, медицина, психология, экология и т.д. работали с неоднородными группами.

Обсуждение

В конце 2-го тысячелетия В.Л. Гинзбург представил три «великие проблемы» физики. Мы считаем, что его третья великая проблема является ключом к решению и первых двух великих проблем в отношении редукции биосистем к законам современной физики. Возможна ли такая редукция? Гинзбург ее отрицает.

Таблица 4

Матрица попарного сравнения выборок КИ (их число $N = 15$) 15 разных испытуемых, применялся известный критерий Ньюмана–Кейлса (значимость $p < 0,05$, здесь число совпадений выборок $k_4 = 18$)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | | 0,00 | 0,81 | 0,00 | 0,01 | 0,09 | 0,10 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 0,00 | | 0,00 | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 0,81 | 0,00 | | 0,00 | 0,11 | 0,24 | 0,07 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 0,00 | 0,23 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,24 | 0,23 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 0,01 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | | 0,96 | 0,00 | 0,00 | 0,88 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,26 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 0,07 | 0,00 | 0,24 | 0,00 | 0,96 | | 0,00 | 0,42 | 0,90 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | 0,10 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 8 | 0,01 | 0,00 | 0,06 | 0,01 | 0,26 | 0,42 | 0,00 | | 0,64 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 9 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,88 | 0,90 | 0,00 | 0,64 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 10 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,24 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,66 | 0,00 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,66 | | 0,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |

В настоящем сообщении мы говорим о двух «великих» догмах всего естествознания. Первая догма — любая выборка любых параметров организма человека может дать прогноз будущего состояния организма. Это ошибочно. Любая выборка уникальна и не может быть повторима (ее вероятность $p \in (0,05; 0,15)$).

По выборке мы не можем дать прогноз будущего для любой биосистемы. Это составляет основу ЭЗ во всех науках о жизни. Но эта догма не единственная.

Имеется и вторая догма о реальности однородности групп испытуемых. Это фундаментальная догма всей науки. Подчеркиваем, речь идет не только о биосистемах. Столетиями физика предлагала разные модели биосистем в рамках ТДС и стохастики. Мы доказали, что такие модели описывают артефакты. Повторить эти процессы нельзя. В.Л. Гинзбург был прав: наука многого еще не знает на «фундаментальном уровне». Этот фундаментальный уровень: любая выборка любого параметра организма человека уникальна и в природе нет однородных групп испытуемых.

Разрушение этих двух догм требует создания новой науки для описания биосистем и изменений во всех науках о жизни. Именно этого требовали Weaver и Гинзбург, но их игнорировала вся мировая наука.

Закключение

С 1944-го года (первая публикация Е. Schrödinger) человечество пыталось как-то поднять проблему специфики в описании живых систем. Через 3 года Н.А. Бернштейн почти доказал эту проблему в биомеханике. Через год W. Weaver пошел дальше, он предложил создать новую науку для описания всех биосистем.

Однако все эти десятилетия эти ученые игнорировались. Их гипотезы никто не пытался проверить и доказать. Это было трагедией для всего естествознания. Только В.Л. Гинзбург в 1999 году вернулся к этой проблеме и отверг возможность редукции биологии к законам всей физики.

Гинзбург говорил о фундаментальном уровне незнания всей наукой фундаментальных свойств биосистем. И он оказался прав. В ЭЗ было доказано, что любая выборка любого параметра организма человека будет уникальной. Но с уникальными системами современная наука не работает. Weaver был прав: нужна новая наука.

Оказалось, что в природе не существует и однородных групп испытуемых. Нет людей, которые имели бы общие генеральные совокупности по своим параметрам. В итоге мы все последние 150–

200 лет работали с уникальными выборками и с неоднородными группами испытуемых. Дальше так работать невозможно. Нужна новая наука.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schrödinger E. *What Is Life?* Cambridge: Cambridge University Press; 1944.
2. Бернштейн Н. А. *О построении движений*. М.: Медгиз; 1947. 254 с.
3. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36:536–544.
4. Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? *Успехи физических наук*. 1999;169:419–441. DOI: 10.3367/UFNr.0169.199904d.0419.
5. Filatova O. E., Maistrenko E. V., Boltaev A. V., Gazya G. V. The Influence of Industrial Electromagnetic Fields on Cardio-Respiratory Systems Dynamics of Oil-Gas Industry Complex Female Workers. *Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(7):46–51.
6. Коннов П. Е., Филатов М. А., Поросинин О. И., Юшкевич Д. П. Использование искусственных нейросетей в оценке актинического дерматита. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):109–112. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-109-112.
7. Кухарева А. Ю., Мельникова Е. Г., Байтуев И. А., Филатов М. А. Существует ли связь между «many-worlds interpretation» и «many-minds interpretation» в биокибернетике? *Успехи кибернетики*. 2023;4(3):101–108. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-11.
8. Газя Г. В., Кухарева А. Ю., Мельникова Е. Г., Газя Н. Ф. Проблема эргодичности – фундаментальная проблема всех наук о живых системах. *Успехи кибернетики*. 2023;4(3):55–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-06.
9. Галкин В. А., Кухарева А., Мельникова Е. Г., Филатов М. А. Реально «великие» проблемы физики живых систем. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2023;2:80–88. DOI: 10.12737/2306-174X-2023-2-68-77.
10. Prigogine I. R. *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. The Free Press; 1996.
11. Penrose R. Newton, Quantum Theory and Reality / ed. S.W. Hawking, W. Israel. *Three Hundred Years of Gravitation*. Cambridge: Cambridge University Press; 1989.
12. Gell-Mann M. Fundamental Sources of Unpredictability. *Complexity*. 1997;3(1):13–19.
13. Филатов М. А., Розенберг Г. С., Акопов Г. В. Типы регуляции (управления) в системах природы и общества. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2023;2:47–55. DOI: 10.12737/2306-174X-2023-2-38-44.
14. Горбунов Д. В., Гавриленко А. В., Кухарева А. Ю., Манина Е. А. Возможности энтропийного подхода в оценке биомеханических параметров человека. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):34–39. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-04.
15. Коннов П. Е., Соколова А. А., Воронюк Т. В., Самойленко И. С., Музиева М. И. Кардиореспираторная система жителей Югры при неинфекционных заболеваниях. *Вестник новых медицинских технологий*. 2024;31(1):95–98. DOI: 10.24412/1609-2163-2024-1-95-98.
16. Еськов В. В., Гавриленко Т. В., Еськов В. М., Вохмина Ю. В. Феномен статистической неустойчивости систем третьего типа. *Журнал технической физики*. 2017;87(11):1609–1614. DOI: 10.21883/JTF.2017.11.45117.2158.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗВУКОВЫХ СТИМУЛОВ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И КОГНИТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВОЛЕЙБОЛИСТОК

Д. В. Белощенко^{1,а}, Т. В. Гавриленко^{1,2,б}

¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

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

^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7584-7124>, ✉ d.beloshhenko@mail.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Аннотация: музыка как один из древнейших способов воздействия на психоэмоциональное и физиологическое состояние человека широко используется в различных сферах деятельности, включая спорт. Данное исследование посвящено изучению влияния двух контрастных музыкальных жанров — классической музыки (произведение Людвиг ван Бетховена) и тяжелого металла (музыка группы Rammstein) — на физиологические параметры человека (частоту пульса и уровень насыщения крови кислородом), а также когнитивные функции: письмо, внимание и память. В исследовании приняли участие 20 профессиональных волейболисток (девушки в возрасте от 18 до 23 лет) с опытом игры не менее 5 лет.

Проведенное исследование подтверждает значимое влияние различных звуковых стимулов на физиологические параметры и когнитивные функции женского организма. Выявленные закономерности свидетельствуют о целесообразности дифференцированного подхода к использованию музыкального сопровождения в тренировочном процессе: классическая музыка способствует улучшению концентрации внимания, рабочей памяти и точности выполнения задания, в то время как тяжелый металл положительно влияет на скорость реакции.

Полученные результаты позволили сформулировать практические рекомендации по использованию музыки для оптимизации тренировочного процесса и соревновательной деятельности.

Ключевые слова: звуковые стимулы, уровень кислорода в крови, частота пульса, когнитивные функции, количество написанных слов, количество совершенных ошибок.

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: Белощенко Д. В., Гавриленко Т. В. Сравнительный анализ воздействия различных звуковых стимулов на физиологические и когнитивные процессы волейболисток. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):62–69.

Поступила в редакцию: 25.08.2025.

В окончательном варианте: 16.09.2025.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTS OF SOUND STIMULI ON PHYSIOLOGICAL AND COGNITIVE PROCESSES IN FEMALE VOLLEYBALL PLAYERS

D. V. Beloshchenko^{1,а}, T. V. Gavrilenko^{1,2,б}

¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation

² Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7584-7124>, ✉ d.beloshhenko@mail.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Abstract: we studied the influence of two contrasting musical genres – classical music (Ludwig van Beethoven) and heavy metal (Rammstein) – on physiological parameters (pulse rate and blood oxygen saturation) and cognitive functions (writing, attention, and memory). We recruited 20 professional female volleyball players aged 18 to 23 with at least five years of volleyball experience.

Our findings confirm that sound stimuli significantly affect physiological parameters and cognitive functions in female athletes. Classical music improves concentration, working memory, and task accuracy,

while heavy metal reduces reaction time. These patterns show that a differentiated approach to using music is beneficial in the training process.

We proposed practical recommendations for using music to optimize training and competitive performance.

Keywords: sound stimuli, blood oxygen level, pulse rate, cognitive functions, number of words written, number of errors.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Beloshchenko D. V., Gavrilenko T. V. Comparative Analysis of the Effects of Sound Stimuli on Physiological and Cognitive Processes in Female Volleyball Players. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):62–69.

Original article submitted: 25.08.2025.

Revision submitted: 16.09.2025.

Введение

Современные исследования в области спортивной психофизиологии, нейропсихологии и когнитивной науки подтверждают значимость музыкального сопровождения для повышения эффективности тренировочного процесса и соревновательной деятельности. Однако влияние различных акустических стимулов на конкретные виды спорта, в частности на волейбол, остается недостаточно изученным.

Существующие исследования демонстрируют значимое влияние музыки на физиологические параметры спортсменов. Согласно результатам метаанализа, проведенного Р. С. Terry с соавт. [1], прослушивание музыки может вызывать изменения частоты сердечных сокращений (ЧСС), уровня гормонов стресса и нейротрансмиттеров, а также воспринимаемого уровня напряжения.

Исследования показывают [2, 3], что музыка с темпом 120-140 ударов в минуту способствует синхронизации движений спортсменов с ритмом, что повышает экономичность энергозатрат и может отражаться на показателях ЧСС и SpO_2 . А. Ströhle [3] отмечает, что прослушивание музыки с высоким темпом (>140 уд/мин) приводит к увеличению ЧСС на 5–15% даже в состоянии покоя, что обусловлено активацией симпатической нервной системы.

Когнитивные аспекты влияния музыки изучены в работах L. R. Slevc с соавт. [4], где показано, что классическая музыка может улучшать показатели рабочей памяти и концентрации внимания. Явление получило название «эффект Моцарта» и связано с активацией префронтальной коры и гиппокампа. В противоположность этому М. Kliuchko и др. [5] продемонстрировали, что тяжелый металл может временно ухудшать результаты выполнения задач, требующих устойчивого внимания, но улучшать скорость реакции и моторные навыки.

S. Hallam, R. MacDonald [6] указывают на важность индивидуальных предпочтений в восприятии музыки, отмечая, что знакомая и предпочитаемая музыка оказывает более выраженное положительное влияние на когнитивные функции независимо от жанра.

Специфика влияния музыки на волейболистов изучена в меньшей степени по сравнению с влиянием музыки на представителей циклических видов спорта. Тем не менее исследование С. Mesagno и др. [7] показало, что прослушивание музыки перед выполнением подачи повышает точность подачи на 11–17%. D. T. Bishop с соавт. [8] отмечают, что музыка с выраженной ритмической структурой способствует улучшению координации движений и точности передач в волейболе.

Волейбол как командный вид спорта требует от спортсменов не только высокого уровня физической подготовленности, но и развитых когнитивных функций, включая скорость реакции, пространственную ориентацию, концентрацию внимания и способность к быстрому принятию решений. В этой связи особый интерес представляет изучение влияния контрастных музыкальных жанров — классической музыки и тяжелого металла — на психофизиологические параметры волейболистов.

Объект и методы исследования

В исследовании приняли участие 20 профессиональных волейболисток (девушки в возрасте от 18 до 23 лет) с опытом игры не менее 5 лет. Испытуемые не имели физиологических заболеваний,

расстройств слуха и вредных привычек, доминирующая рука — правая. Все участницы были проинформированы о целях и процедуре исследования и предоставили письменное информированное согласие на участие в соответствии с принципами Хельсинкской декларации [9].

Для изучения воздействия различных типов звуковых стимулов на функциональные системы и функции организма была разработан эксперимент, включающий выполнение стандартизированной когнитивной задачи (переписывание специализированного текста) в трех экспериментальных условиях с параллельной регистрацией параметров сердечно-сосудистой системы (ССС).

Когнитивная задача заключалась в переписывании стандартизированного текста научно-популярного содержания объемом 3000 символов. Данная задача требует задействования комплекса когнитивных функций, включая зрительное восприятие, внимание, рабочую память и моторный контроль, при этом позволяет объективно оценить скорость (количество написанных слов) и точность (количество допущенных ошибок) выполнения.

Эксперимент состоял из трех последовательных этапов длительностью по 3 минуты каждый, с интервалами отдыха по 15 минут для нивелирования эффекта последствия предыдущего акустического воздействия. Экспериментальные условия были следующими:

1. Переписывание текста в условиях относительной тишины (без звукового воздействия).
2. Выполнение аналогичной задачи при прослушивании произведения Людвиг ван Бетховена («Лунная» соната).
3. Выполнение задачи при прослушивании музыки группы Rammstein (жанр индастриал-металл).

Параллельно с выполнением когнитивной задачи осуществлялась непрерывная регистрация параметров ССС с использованием пальцевого пульсоксиметра HealthTree JKS50B, закрепленного на указательном пальце кисти левой руки. Регистрировались следующие параметры: SpO_2 — сатурация крови кислородом (%), отражающая эффективность функционирования кардиореспираторной системы; PR — частота пульса (уд/мин), являющаяся индикатором активности ССС и косвенным показателем уровня вегетативной активации.

Анализ и обработка полученных данных осуществлялись с использованием программного обеспечения MS Office Excel 2016 и Statistica 10.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных пульсоксиметрии выявил различия в показателях SpO_2 в группе девушек-волейболисток при воздействии различных музыкальных композиций (табл. 1). Минимальное (*Min*) значение составляло 94 %, максимальное (*Max*) — 98 %. При прослушивании классической музыки во всей группе испытуемых отмечалось повышение SpO_2 на 2–3% по сравнению с контрольным условием, что может свидетельствовать о более эффективном дыхании. При прослушивании тяжелого металла значимых изменений SpO_2 не наблюдалось.

Таблица 1

Результаты статистической обработки значений SpO_2 в группе девушек-волейболисток без звукового воздействия и при прослушивании музыкальных композиций

| N=20 | Значение уровня кислорода в крови SpO_2 | | |
|----------|---|-----------------------------|--|
| | Без звукового воздействия | При прослушивании Rammstein | При прослушивании Людвиг ван Бетховена |
| X_{cp} | 96,60 | 96,75 | 97,05 |
| W | 0,87 | 0,79 | 0,79 |
| P | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

Полученные значения SpO_2 в группе девушек-волейболисток были проверены на соответствие закону нормального распределения с помощью теста Колмогорова–Смирнова и Лиллифорса, а также *W*-теста Шапиро–Уилка (*Shapiro–Wilk's W test*). Выявлено, что распределение количества совершенных ошибок отличается от нормального ($p < 0,05$), то есть закон Гаусса не подтвердился (табл. 1). Поскольку выборки зависимые и имеют ненормальный тип распределения, для выявления различий в значениях SpO_2 у испытуемых при прослушивании музыкальных композиций и без звукового воздействия (табл. 2) был использован дисперсионный анализ Фридмана (*Friedman ANOVA*).

Таблица 2

Результаты применения дисперсионного анализа Фридмана (Friedman ANOVA and Kendall's concordance) для оценки наличия различий в значениях SpO_2 в группе девушек-волейболисток без звукового воздействия и при прослушивании музыкальных композиций

| N=20 | Average Rank | Sum of Ranks | Mean | Std. Dev. |
|--|--------------|--------------|-------|-----------|
| Без воздействия | 1,8 | 36 | 96,60 | 0,99 |
| При прослушивании Rammstein | 2,0 | 40 | 96,75 | 0,96 |
| При прослушивании Людвиг ван Бетховена | 2,2 | 44 | 97,05 | 0,76 |

Примечание: Average Rank – ранги; Sum of Ranks – полученные суммы рангов; Mean – среднее значение показателя; Std. Dv. – стандартное отклонение выборки.

Было установлено (табл. 2), что статистически значимых различий в значениях SpO_2 в группе девушек-волейболисток без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций не выявлено, т.к. $p = 0,29207$, Kendall's coeff. of concordance = 0,06154 (коэффициент согласованности Кендалла).

Далее проводился анализ вторых данных пульсоксиметрии – PR. Было установлено (рис. 1), что в группе женщин в среднем PR составляет в спокойном состоянии 98 уд/мин, при прослушивании Rammstein – 100 уд/мин, при прослушивании классической музыки – 89 уд/мин. Min значение PR было установлено при прослушивании Людвиг ван Бетховена – 80 уд/мин, Max – 110 уд/мин при прослушивании индастриал-металл.

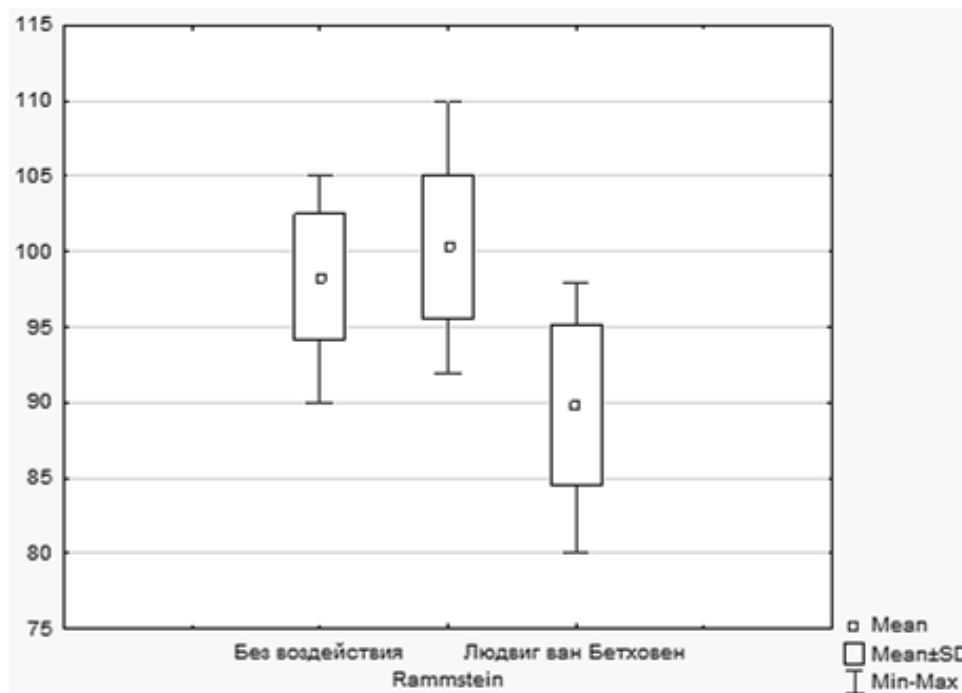


Рис. 1. Результаты значений PR в группе девушек-волейболисток (n = 20 человек) без звукового воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций. Mean – среднее значение PR; Mean±SD – стандартное отклонение выборки; Min-Max – минимальное и максимальное значение PR

В целом, в группе девушек у 85% волейболисток (рис. 1) наблюдается увеличение PR при прослушивании Rammstein на 3–12 уд/мин. Музыка с высоким темпом и интенсивностью активирует симпатическую нервную систему, вызывая увеличение выработки адреналина и норадреналина, что

способствует увеличению ЧСС. Это физиологическое возбуждение может быть полезным перед выполнением действий, требующих максимальной мобилизации ресурсов организма, таких как нападающий удар или блокирование в волейболе.

Классическая музыка же, наоборот, у 85% девушек вызывала снижение PR на 2–14 уд/мин либо не изменяла значений, что может быть обусловлено активацией парасимпатической нервной системы, снижением уровня кортизола и нормализацией вариабельности сердечного ритма [10].

Полученные значения PR в группе девушек-волейболисток проверялись на соответствие закону нормального распределения с помощью теста Колмогорова–Смирнова и Лиллифорса, Шапиро–Уилка. Данные имеют нормальный тип распределения ($p > 0,05$), поэтому дальнейшие сравнения производили с помощью парного критерия Стьюдента (табл. 3).

Таблица 3

Результаты применения парного критерия Стьюдента (t -тест для зависимых выборок) для оценки наличия различий в значениях PR в группе девушек-волейболисток без звукового воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

| (N)=20 | Mean | Std. Dv. | Diff. | Std. Dv. diff. | t | p |
|--------|--------|----------|-------|----------------|-------|-------------|
| 1 гр. | 98,35 | 4,15 | | | | |
| 2 гр. | 100,35 | 4,78 | -2 | 5,83 | -1,53 | 0,14 |
| 1 гр. | 98,35 | 4,15 | | | | |
| 3 гр. | 89,8 | 5,29 | 8,55 | 5,28 | 7,23 | 0,00 |
| 2 гр. | 100,35 | 4,78 | | | | |
| 3 гр. | 89,8 | 5,29 | 10,55 | 5,74 | 8,21 | 0,00 |

Примечание: значения PR в группе девушек-волейболисток: 1 гр. — без воздействия; 2 гр. — при прослушивании Rammstein; 3 гр. — при прослушивании Людвиг ван Бетховена; N — объем выборки; $Mean$ — среднее значение PR ; $Std. Dv.$ — стандартное отклонение выборки; $Diff.$ — средняя разница значений PR ; $Std. Dv. diff.$ — стандартное отклонение для средней разницы; t — значение t -критерия; p — вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу о том, что средние величины PR в сравниваемых группах не различаются.

Анализ табл. 3 показал, что при прослушивании индастриал-металл и Людвиг ван Бетховена статистически значимые различия в значениях PR в группе девушек-волейболисток были получены при сравнении PR без воздействия и во время прослушивания Rammstein ($p=0,00$), а также при сравнении тяжелого металла с классической музыкой ($p=0,00$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что различные типы звуковых стимулов существенно влияют на параметры ЧСС.

Анализ параметров когнитивной эффективности при выполнении задачи переписывания текста (количество написанных слов и число допущенных ошибок) также выявил значимые различия в зависимости от характера акустического воздействия. В результате эксперимента было собрано и проанализировано 60 работ (рис. 2–3).

На рисунке 2 показано, как изменяется количество написанных слов в группе девушек-волейболисток без акустического воздействия и при прослушивании музыкальных композиций. Полученные значения также проверялись на соответствие закону нормального распределения с помощью теста Колмогорова–Смирнова и Лиллифорса и W -теста Шапиро–Уилка (Shapiro–Wilk's W test). Было установлено, что данные распределены ненормально ($p < 0,05$), поэтому их значения представлены медианами и процентилями (5 и 95-й).

Анализ рис. 2 показал, что группа девушек-волейболисток в спокойном состоянии написала 572 слова, X_{cp} — 28 ($Me-30$), min количество слов — 12, max — 37; при прослушивании Rammstein наблюдается увеличение количества написанных слов — 618 слов всего, X_{cp} — 30 ($Me-30$), min — 10, max — 48; при прослушивании Людвиг ван Бетховена количество написанных слов также возрастает — 628 слов всего, X_{cp} — 31 ($Me-31$), min — 13, max — 41. Тихая обстановка для части людей может быть чересчур «пассивной»; звуковое воздействие добавляет сенсорной стимуляции и подводит уровень возбуждения к оптимуму, при котором моторная скорость и когнитивная гибкость увеличиваются [10, 11].

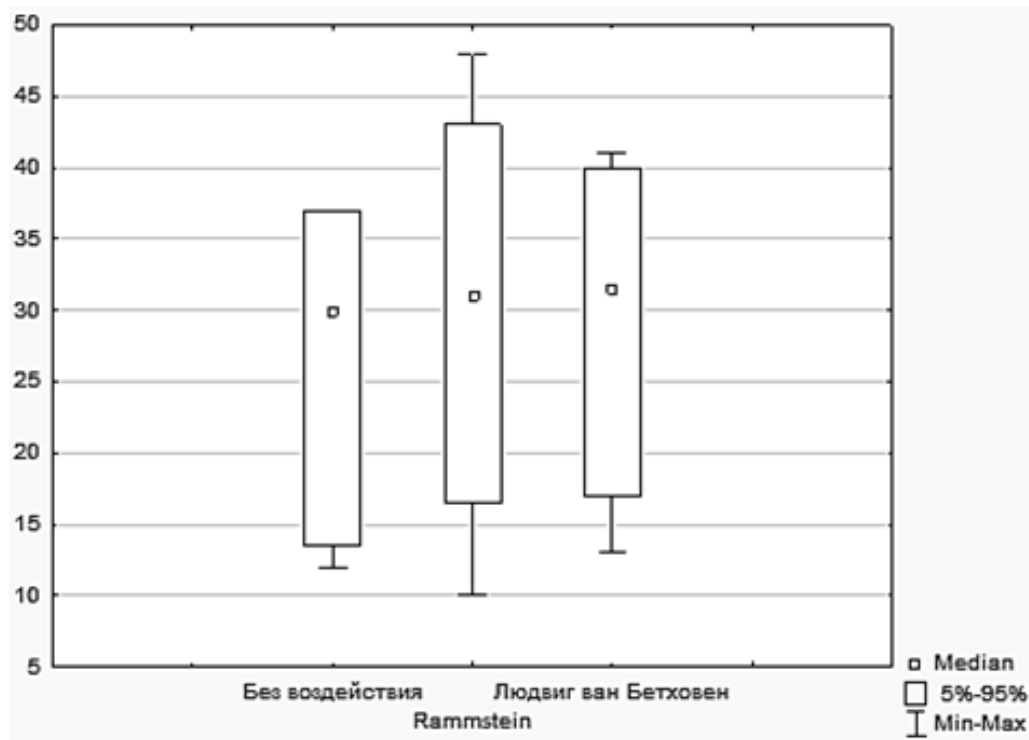


Рис. 2. Общее количество написанных слов в группе девушек-волейболисток ($n = 20$ человек) без звукового воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций. Median — медиана (5%; 95%): для описания асимметричных распределений использована медиана, а в качестве мер рассеяния проценти (5-й и 95-й). Min-Max — минимальное и максимальное значение количества написанных слов

Для выявления различий в количестве написанных слов у группы девушек-волейболисток без воздействия и при прослушивании музыкальных композиций был использован дисперсионный анализ Фридмана (Friedman ANOVA) (табл. 4).

Таблица 4

Результаты применения дисперсионного анализа Фридмана (Friedman ANOVA and Kendall's concordance) для оценки наличия различий в количестве написанных слов в группе девушек-волейболисток без звукового воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

| Состояние | Average Rank | Sum of Ranks | Mean | Std. Dev. |
|---------------------|--------------|--------------|-------|-----------|
| Спокойное состояние | 1,75 | 35,00 | 28,60 | 7,66 |
| Индастриал-металл | 1,90 | 38,00 | 30,90 | 7,58 |
| Классическая музыка | 2,35 | 47,00 | 31,40 | 6,28 |

Примечание: Average Rank — ранги; Sum of Ranks — полученные суммы рангов; Mean — среднее значение показателя; Std. Dev. — стандартное отклонение выборки.

Было установлено (табл. 4), что статистически значимых различий в количестве написанных слов в группе девушек-волейболисток без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций не выявлено, т.к. $p = 0,13534$, Kendall's coeff. of concordance = 0,1 (коэффициент согласованности Кендалла).

На рисунке 3 показано, как изменяется количество совершенных ошибок в группе девушек-волейболисток без акустического воздействия и при прослушивании музыкальных композиций.

Было установлено (рис. 3), что в группе девушек-волейболисток без звукового воздействия 10 человек совершили 17 ошибок, при прослушивании Rammstein 12 человек совершили 27 ошибок, при прослушивании Людвиг ван Бетховена 8 человек совершили 14 ошибок. Min количество ошибок во всех 3 сериях эксперимента — 0, max было установлено — 7, при прослушивании тяжелого металла.

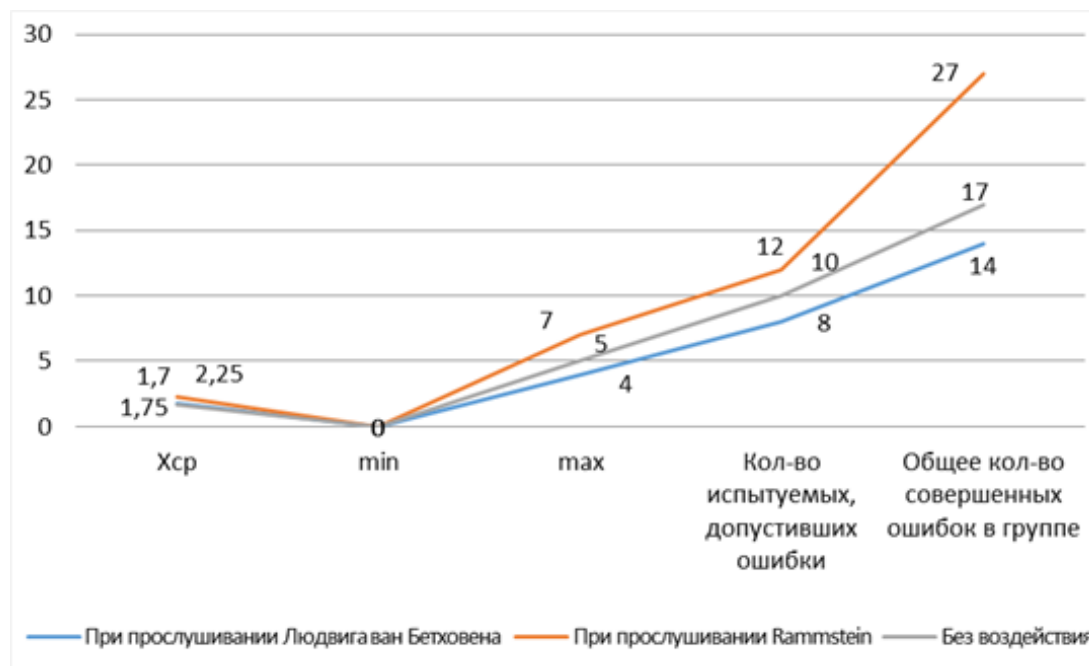


Рис. 3. Количество совершенных ошибок в группе девушек-волейболисток ($n=20$ человек) без звукового воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

Следует отметить, что именно при прослушивании «Лунной» сонаты общее количество девушек в группе, допустивших ошибки, было маленьким — 8 и всего ошибок было совершено 14, причем больше всего слов было написано именно при прослушивании классической музыки — 628. Это может свидетельствовать о том, что девушки под воздействием такой музыки могут чувствовать себя более расслабленно, что позволяет им лучше концентрироваться на задаче и допускать меньше ошибок. Улучшение показателей концентрации внимания и рабочей памяти после прослушивания классической музыки соответствует «эффекту Моцарта» и может быть объяснено оптимальной активацией лобных и височных долей коры головного мозга, ответственных за эти когнитивные функции [11, 12]. Данный эффект имеет особое значение для волейбола, где требуется высокая концентрация внимания и способность удерживать в рабочей памяти расположение игроков на площадке.

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о дифференцированном влиянии различных звуковых стимулов как на физиологические параметры, так и на когнитивные функции девушек-волейболисток.

Заключение

Полученные результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение. С теоретической точки зрения они расширяют представления о механизмах воздействия акустических стимулов на интегративные функции организма спортсменок и подтверждают наличие взаимосвязи между вегетативной регуляцией и когнитивным функционированием.

С практической точки зрения результаты могут быть использованы для оптимизации психофизиологической подготовки волейболисток путем целенаправленного применения музыкальных воздействий. В частности, классическая музыка может использоваться для улучшения концентрации внимания и точности технических действий, требующих высокого уровня когнитивного контроля (например, при отработке тактических схем, технических элементов). Тяжелый металл может применяться в ситуациях, требующих быстрой мобилизации физиологических ресурсов организма и повышения скорости моторных реакций (например, перед выполнением скоростно-силовых упражнений или в качестве краткосрочной стимуляции перед соревнованиями).

В целом, проведенное исследование демонстрирует перспективность использования музыкальных воздействий как неинвазивного и доступного метода оптимизации функционального состояния спортсменок и открывает перспективы для дальнейших исследований в области психофизиологии спорта и музыкальной терапии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Terry P. C., Karageorghis C. I., Curran M. L., Martin O. V., Parsons-Smith R. L. Effects of Music in Exercise and Sport: A Meta-Analytic Review. *Psychological Bulletin*. 2020;146(2):91–117. DOI: 10.1037/bul0000216.
2. Nakamura P. M., Pereira G., Papini C. B., Nakamura F. Y., Kokubun E. Effects of Preferred and Nonpreferred Music on Continuous Cycling Exercise Performance. *Perceptual and Motor Skills*. 2010;110(1):257–264. DOI: 10.2466/PMS.110.1.257-264.
3. Ströhle A. Sports Psychiatry: Mental Health and Mental Disorders in Athletes and Exercise Treatment of Mental Disorders. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*. 2019;269(5):485–498. DOI: 10.1007/s00406-018-0891-5.
4. Slevc L. R., Davey N. S., Buschkuehl M., Jaeggi S. M. Tuning the Mind: Exploring the Connections between Musical Ability and Executive Functions. *Cognition*. 2016;152:199–211. DOI: 10.1016/j.cognition.2016.03.017.
5. Kliuchko M., Heinonen-Guzejev M., Monacis L., Gold B. P., Heikkilä K. V., Spinosa V., Tervaniemi M., Brattico E. The Association of Noise Sensitivity with Music Listening, Training, and Aptitude. *Noise & Health*. 2015;17(78):350–357. DOI: 10.4103/1463-1741.165065.
6. Hallam S., MacDonald R. The Effects of Music in Community and Educational Settings. *The Oxford Handbook of Music Psychology*. Eds. S. Hallam, I. Cross, M. Thaut. Oxford University Press; 2008. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199298457.013.0044.
7. Mesagno C., Marchant D., Morris T. Alleviating Choking: The Sounds of Distraction. *Journal of Applied Sport Psychology*. 2009;21(2):131–147. DOI: 10.1080/10413200902795091.
8. Bishop D. T., Karageorghis C. I., Loizou G. A Grounded Theory of Young Tennis Players' Use of Music to Manipulate Emotional State. *Journal of Sport & Exercise Psychology*. 2007;29(5):584–607. DOI: 10.1123/jsep.29.5.584.
9. Хельсинкская декларация Всемирной медицинской ассоциации. Этические принципы проведения медицинских исследований с участием людей в качестве субъектов исследования. *Права и свободы человека в психиатрии*. Режим доступа: <http://www.psychepravo.ru/law/int/helsinki-deklaraciya.htm>.
10. Чжан И. Музыкальная терапия: влияние музыки на когнитивные и эмоциональные процессы человека. *Тенденции развития науки и образования*. 2024;116(3):163–165. DOI: 10.18411/trnio-12-2024-143.
11. Федотчев А. И., Радченко Г. С. Музыкальная терапия и «музыка мозга»: состояние, проблемы и перспективы исследований. *Успехи физиологических наук*. 2013;44(4):35–50.
12. Rauscher F. H., Shaw G. L., Ky K. N. Listening to Mozart Enhances Spatial-Temporal Reasoning: Towards a Neurophysiological Basis. *Neuroscience Letters*. 1995;185(1):44–47. DOI: 10.1016/0304-3940(94)11221-4.

О НАРУШЕНИИ ИНВАРИАНТНОСТИ УРАВНЕНИЯ ЭЙЛЕРА–ЛАГРАНЖА

В. П. Кошчев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал
«Стрела», г. Жуковский, Московская область, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0724-9760>, ✉ koshcheev1@yandex.ru

Аннотация: показано, что если при переходе к новой системе координат определитель Якоби равен нулю, то имеет место нарушение инвариантности уравнения Эйлера–Лагранжа.

Ключевые слова: уравнение Эйлера–Лагранжа, уравнение Гамильтона–Якоби, уравнение Гамильтона, дифференциальные формы, нарушение инвариантности.

Для цитирования: Кошчев В. П. О нарушении инвариантности уравнения Эйлера–Лагранжа. *Успехи кибернетики.* 2025;6(3):70–71.

Поступила в редакцию: 16.08.2025.

В окончательном варианте: 17.09.2025.

VIOLATION OF THE INVARIANCE OF THE EULER–LAGRANGE EQUATION

V. P. Koshcheev

Moscow Aviation Institute (National Research University), Strela branch, Zhukovsky, Moscow Region,
Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0724-9760>, ✉ koshcheev1@yandex.ru

Abstract: we showed that if, during the transition to a new coordinate system, the Jacobi determinant equals zero, so the invariance of the Euler–Lagrange equation is violated.

Keywords: Euler–Lagrange equation, Hamilton–Jacobi equation, Hamilton equation, differential forms, violation of invariance.

Cite this article: Koshcheev V. P. Violation of the Invariance of the Euler–Lagrange Equation. *Russian Journal of Cybernetics.* 2025;6(3):70–71.

Original article submitted: 16.08.2025.

Revision submitted: 17.09.2025.

Инвариантность уравнения Эйлера была доказана в [1] с помощью вариационной производной и сформулирована как свойство кривой быть (или не быть) экстремалью независимо от выбора системы координат. С помощью [2] покажем, что если при переходе к новой системе координат определитель Якоби равен нулю, то имеет место нарушение инвариантности уравнения Эйлера–Лагранжа.

Классическое действие для динамической системы с одной степенью свободы запишем в виде определенного интеграла с переменным верхним пределом

$$S(t) = \int_{t_0}^t L(t', q(t'), \frac{dq(t')}{dt'}) dt'. \quad (1)$$

Тогда

$$dS = L \left(t', q(t'), \frac{dq(t')}{dt'} \right) dt' \Big|_{t'=t} = L(t, q, \dot{q}) dt, \quad (2)$$

где $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$.

Построим дифференциал второго порядка

$$ddS = \left(\frac{\partial L}{\partial t} dt + \frac{\partial L}{\partial q} dq + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} d\dot{q} \right) \wedge dt. \quad (3)$$

Так как $dt \wedge dt = 0$ и $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} dq \right) = \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) dq + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} d\dot{q}$, то

$$d \left(dS - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} dq \right) = \left(-\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{\partial L}{\partial q} \right) dq \wedge dt. \quad (4)$$

Видно, что

$$d \left(dS - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} dq \right) = 0. \quad (5)$$

Дифференциальная 1-форма удовлетворяет лемме Пуанкаре, когда правая часть равенства (4) равна нулю:

$$\left(-\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{\partial L}{\partial q}\right) dq \wedge dt = 0. \quad (6)$$

Тогда из формулы (6) получим уравнение Эйлера–Лагранжа

$$-\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{\partial L}{\partial q} = 0, \quad (7)$$

так как $dq \wedge dt \neq 0$.

При переходе к новой системе координат

$$\begin{cases} q = q(u, v) \\ t = t(u, v) \end{cases} \quad (8)$$

Формула (6) преобразуется к виду

$$\left(-\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{\partial L}{\partial q}\right) \Big|_{\substack{t = t(u, v) \\ q = q(u, v)}} \det \begin{pmatrix} \frac{\partial q}{\partial u} & \frac{\partial q}{\partial v} \\ \frac{\partial t}{\partial u} & \frac{\partial t}{\partial v} \end{pmatrix} du \wedge dv = 0, \quad (9)$$

так как

$$dq \wedge dt = \det \begin{pmatrix} \frac{\partial q}{\partial u} & \frac{\partial q}{\partial v} \\ \frac{\partial t}{\partial u} & \frac{\partial t}{\partial v} \end{pmatrix} du \wedge dv, \quad (10)$$

где $\det \begin{pmatrix} \frac{\partial q}{\partial u} & \frac{\partial q}{\partial v} \\ \frac{\partial t}{\partial u} & \frac{\partial t}{\partial v} \end{pmatrix}$ — определитель Якоби.

Видно, что уравнение Эйлера–Лагранжа не является инвариантным при переходе к новой системе координат, когда определитель Якоби равен нулю. Рассмотрим, например, отображение Арнольда [3]

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1^2 - x_2^2 + ax_1 \\ y_2 &= 2x_1x_2 - ax_2, \end{aligned} \quad (11)$$

где a — параметр.

В [3] было показано, что на плоскости (x_1, x_2) определитель Якоби равен нулю на окружности

$$x_1^2 + x_2^2 = \frac{a^2}{4}. \quad (12)$$

Отображение этой окружности на плоскости (y_1, y_2) приводит к гипоциклоиде с тремя острями [3], в окрестности которых производная испытывает скачок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд И. М., Фомин С. В. *Вариационное исчисление*. М.: Физматгиз; 1961. 228 с.
2. Кошечев В. П. К задаче построения уравнения Эйлера–Лагранжа с помощью леммы Пуанкаре. *Успехи кибернетики*. 2025;6(2):40–43.
3. Арнольд В. И. Математика и физика: родитель и дитя или сестры? *Успехи физических наук*. 1999;169(12):1311–1323.

ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ КРУПНЫХ И СРЕДНИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С. Е. Засим^{1,а}, Р. Д. Гимранов^{2,3,б}

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

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

³ Публичное акционерное общество «Сургутнефтегаз», г. Сургут, Российская Федерация

^а ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2357-8409>, ✉ sergo210999@mail.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9928-8416>, gimranov_RD@mail.ru

Аннотация: в статье рассматривается актуальная проблема системного анализа логистических цепочек материальных ресурсов и принятия управленческих решений в условиях неопределенности на примере средних и крупных российских предприятий. Обоснована необходимость оптимизации и стабилизации логистических операций в условиях политики импортозамещения и ограничений внешней среды. Показано, что формирование эффективных логистических цепочек является ключевым фактором сокращения материальных и трудовых затрат. Выполнена декомпозиция понятия «логистика» на пять ключевых видов: закупочная, производственная, сбытовая (распределительная), складская и таможенная; для каждого вида кратко охарактеризованы его цель и основные задачи. Отмечается, что подходы к поиску и оптимизации логистических решений часто не универсальны и зависят от множества специфических переменных и факторов неопределенности, в результате чего предприятия вынуждены ежедневно адаптировать цепочки под новые обстоятельства. Статья акцентирует внимание на необходимости разработки гибких аналитических инструментов и методов, способных учитывать многовариантность факторов и обеспечивать оперативную поддержку управленческих решений.

Ключевые слова: логистические цепочки, импортозамещение, оптимизация, декомпозиция логистики, управление в условиях неопределенности.

Для цитирования: Засим С. Е., Гимранов Р. Д. Проблемы формирования и реализации логистических цепочек материальных ресурсов крупных и средних предприятий. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):72–78.

Поступила в редакцию: 03.09.2025.

В окончательном варианте: 23.09.2025.

BUILDING AND OPERATING MATERIAL SUPPLY CHAINS FOR LARGE AND MEDIUM-SIZED COMPANIES

S. E. Zasim^{1,а}, R. D. Gimranov^{2,3,б}

¹ Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

³ PJSC “Surgutneftegas”, Surgut, Russian Federation

^а ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2357-8409>, ✉ sergo210999@mail.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9928-8416>, gimranov_RD@mail.ru

Abstract: we analyzed material supply chains and managerial decision-making under uncertainty in medium and large-sized Russian companies. We demonstrated the need to optimize and stabilize logistics operations amid import substitution policies and international restrictions. We showed that properly designed supply chains reduce material consumption and labor costs. We outlined five principal types of logistics: procurement, production, distribution, warehousing, and customs, and characterized their objectives and core tasks. We found that methods for searching and optimizing logistics solutions are not universal and depend on specific variables and uncertainty factors, so companies must continuously adapt their chains to changing conditions. We emphasized the importance of developing flexible analytical tools that account for multiple factors and provide timely support for managerial decisions.

Keywords: supply chains, import substitution, optimization, logistics decomposition, decision-making under uncertainty.

Cite this article: Zasim S. E., Gimranov R. D. Building and Operating Material Supply Chains for Large and Medium-sized Companies. Russian Journal of Cybernetics. 2025;6(3):72–78.

Original article submitted: 03.09.2025.

Revision submitted: 23.09.2025.

Введение

Для современной России задачи системного анализа логистических цепочек материальных ресурсов и принятия управленческих решений в условиях неопределенности являются критически важными. Предприятия тратят огромное количество времени и ресурсов на ежедневное решение подобных задач. На данный момент очень остро стоит вопрос о необходимости оптимизации и стабилизации логистических операций в крупных и средних предприятиях и организациях. Российские компании внедряют политики импортозамещения и организуют работу по максимизации использования материальных ресурсов отечественных производителей. Формирование логистических цепочек для данных процессов является одним из ключевых факторов. Правильно сформированная логистическая цепочка экономит для предприятия огромное количество материальных ресурсов и человеческих трудозатрат.

Логистическая цепь — это линейно упорядоченное множество физических и (или) юридических лиц, осуществляющих логистические операции по проведению внешнего материального потока от одной логистической системы до другой в случае производственного потребления или до конечного потребителя в случае личного непроизводственного потребления [1, 17].

Логистической операцией называется любое элементарное действие, приводящее к преобразованию параметров материального и (или) связанных с ними информационных, финансовых, сервисных потоков [2].

Декомпозиция логистических цепочек

Логистические цепочки бывают разными по сложности, комплексности. Во многом формирование логистических цепочек для крупных и средних предприятий в современной России превращается в бесконечный процесс поиска решений и их оптимизаций [3]. Ключевая проблема — подходы и методы решения одной конкретной задачи по поиску и оптимизации логистической цепочки редко можно экстраполировать на другие цепочки, даже внутри одного предприятия. В каждом конкретном случае имеются свои переменные, свои факторы неопределенности, как следствие все предприятия в России вынуждены решать задачу по формированию логистических цепочек ежедневно, учитывая новые обстоятельства и факторы.

Выделяются 5 ключевых видов логистики:

- закупочная: в странах с рыночной экономикой основной целью закупочной логистики является удовлетворение потребностей производства в материалах с максимально возможной экономической эффективностью [10];
- производственная: материальный поток на своем пути от первичного источника сырья до конечного потребителя проходит ряд производственных звеньев. Управление материальным потоком на этом этапе имеет свою специфику и носит название производственной логистики [10];
- сбытовая (распределительная): является частью общей логистической системы, которая обеспечивает рационализацию физического перемещения продукции к потребителю. Основная цель распределительной логистики — обеспечение доставки нужных товаров в нужное место, в нужное время с минимальными затратами, распространить товары между поставщиками и продать их конечным потребителям [12–13];
- складская: ключевые вопросы складской логистики связаны с разработкой методов организации складского хозяйства, приемкой и отгрузкой товарно-материальных ценностей, комплектацией наборов товаров, а также с системой снабжения и управления материальными запасами в рамках цепочек складов или внутри одного склада/помещения [7–9, 11];
- таможенная: это комплекс мероприятий, обеспечивающий осуществление всех необходимых таможенных процедур при транспортировке грузов через таможенные границы. Основная задача таможенной логистики — обеспечить плавный и эффективный экспорт и импорт товаров через границы [14–15].

Факторы

Для каждого вида логистики можно выделить отдельные проблемы и факторы, влияющие на логистические цепочки и их эффективность. Но есть и общие факторы и проблемы для всех видов, которые играют ключевую роль при формировании и реализации логистических цепочек.

Рассмотрим основные факторы, которые выделяют в современной литературе [4-6]:

- структурные — описывают количество, расположение и производственную мощность заводов, складских помещений и других объектов в логистической системе;
- коммерческие — связаны со стратегиями снабжения компании и политикой дальнейшей дистрибуции;
- операционные — влияют на планирование материального потока;
- функциональные — связаны с управлением транспортными ресурсами и возникают, как правило, при выборе типа транспортного средства, планировании загрузки транспортного средства и определении маршрута поставок.

Проблемы и риски

Каждый из факторов имеет свои проблемы и риски. На данный момент большинство крупных и средних российских предприятий и иностранных предприятий, оставшихся в России или частично продавших свой бизнес российским компаниям, сталкиваются со схожими проблемами в области формирования логистики для каждого из факторов. Выделим основные проблемы внутри каждого, опираясь на имеющиеся статьи и реальный практический опыт работы в сфере логистики [4-6, 16, 18-20].

Для структурных факторов можно выделить следующие проблемы:

- зависимость от международных поставок: Россия продолжает зависеть от импорта определенных товаров, оборудования и технологий. Проблемы с международной логистикой, включая санкции, ограничения на поставки и проблемы с транспортными маршрутами, создают перебои и нестабильность в цепочках;
- нехватка инфраструктуры: несмотря на значительные усилия, направленные на развитие инфраструктуры, в некоторых регионах России недостаточно развита современная транспортная инфраструктура и логистические хабы, что затрудняет перемещение товаров;
- низкая степень внедрения автоматизации: российская логистика во многом опирается на традиционные методы управления. В значительном числе организаций отсутствует применение современных цифровых решений — от систем управления складом до аналитики больших данных и алгоритмов машинного обучения, что замедляет процессы и снижает их эффективность;
- риски, связанные с экологией и устойчивостью: повышенные требования к экологии и вопросы устойчивости логистики, в том числе связанные с климатическими изменениями и международной ситуацией, требуют превратить текущие процессы и стратегии в более экологичные и устойчивые, чтобы уменьшить потенциальные риски.

Для коммерческих факторов:

- высокая стоимость логистических услуг: значительная часть затрат компаний уходит на транспортировку, хранение и обработку груза. Причины — ограниченная инфраструктура, дорогой топливно-энергетический ресурс и нестабильность на внешних рынках, что влечет за собой удорожание перевозок;
- проблемы с оплатой и финансированием: организациям непросто привлекать средства для модернизации логистики или покрытия операционных расходов. Дополнительную нестабильность создают задержки во взаиморасчетах между партнерами, что нарушает бесперебойность работы цепочек поставок;
- валютные риски: колебания валютных курсов повышают коммерческие риски для компаний, сотрудничающих с зарубежными контрагентами: они отражаются на цене импортных компонентов и стоимости логистических услуг;
- нарушения качества и сроков поставок: проблемы у поставщиков или сбои в коммерческих цепочках приводят к задержкам и поставкам ненадлежащего качества, что вызывает дополнительные расходы на возвраты, доработки и логистические корректировки;
- отсутствие надежных партнерств: в условиях санкций и внешнеэкономической нестабильности компании сталкиваются с проблемами выбора надежных коммерческих партнеров. Это связано с рисками разрыва контрактов, несоответствия требований или сужения круга поставок.

Для операционных факторов:

- низкая скорость обработки грузов: в некоторых случаях процессы на таможенных постах, в портах и на складах остаются медленными. Это связано с недостаточной автоматизацией и высокими

бюрократическими барьерами, что приводит к заторам и задержкам в цепочке поставок;

- неоптимальное использование транспортных ресурсов: часто наблюдается недостаточная загрузка транспортных средств (поезда, грузовики, суда), что приводит к увеличению стоимости транспортировки. Это связано с нехваткой информации о реальном состоянии грузопотоков и неправильным планированием маршрутов;

- проблемы с управлением запасами: во многих компаниях недостаточно точные системы прогнозирования потребности и управления запасами. Это может приводить к избыточным или, наоборот, недостаточным запасам, что негативно сказывается на стоимости хранения и недоступности товаров для конечных потребителей;

- проблемы с ресурсами и персоналом: дефицит квалифицированных кадров в сфере логистики, особенно в управлении операциями, ведет к ухудшению качества обслуживания, низкой эффективности и ошибкам в обработке заказов. Кроме того, высокая текучесть кадров и нехватка специалистов затрудняют внедрение лучших практик в операционное управление;

- медленные процессы адаптации к изменениям в рыночной среде: из-за недостаточной гибкости логистических процессов российские компании зачастую медленно реагируют на изменения спроса, а также на внешние угрозы (например, изменения в международной политике или экономике), что снижает устойчивость логистических цепочек.

Для функциональных факторов:

- недостаточная интеграция и координация: логистические цепочки часто состоят из множества отдельных этапов (транспортировка, складирование, таможенное оформление и т.д.), которые плохо интегрированы друг с другом. Это приводит к проблемам с координацией между различными участниками цепочек, что, в свою очередь, вызывает задержки и ошибки в процессе доставки;

- низкий уровень автоматизации и цифровизации: несмотря на то, что многие компании внедряют новые технологии, уровень автоматизации в российской логистике все еще остается низким. Отсутствие современных систем управления цепочками поставок (SCM), автоматизированных складских решений и инструментов для отслеживания грузов через IoT (Интернет вещей) ограничивает возможности повышения эффективности и прозрачности операций;

- проблемы с управлением данными: часто в логистических системах в России не хватает точных, актуальных данных для принятия решений. Отсутствие единой базы данных, низкая степень обмена информацией между участниками цепочек, а также низкий уровень аналитики и прогнозирования — все это снижает оперативность и точность логистических процессов;

- проблемы с управлением рисками: российские компании сталкиваются с трудностью идентификации, оценки и минимизации рисков в логистике. Это связано с недостаточной проработкой процессов предсказания и управления рисками, такими как изменения в законодательстве, таможенные проблемы или непредсказуемые внешнеэкономические события.

Реальный опыт

Существуют особенности и проблемы в каждом отдельном предприятии, обусловленные спецификой работы этого предприятия и отрасли производства. Многие из них вынуждены адаптировать свои логистические стратегии под изменения в окружающей среде, не имея при этом возможности планировать на долгосрочную перспективу.

Также современные предприятия вынуждены учитывать и экологические факторы, влияющие на формирование и реализацию логистических цепочек [21]. В России данный вопрос, конечно, ставится не так остро, как например в Европе, но контролируется и регулируется на государственном уровне, поэтому данные факторы также нельзя исключать из рассмотрения при дальнейшем анализе.

Современные отечественные программные продукты пытаются решить возникающие проблемы, но, в основном, точно, по конкретному блоку проблем. Не учитываются постоянно меняющиеся условия, как внутренние, так и внешние, которые влияют на предприятие.

Такие системы и сами по себе, внутри, имеют малую гибкость и часто требуют постоянных программных доработок под определенные ситуации, а это значит, что скорость решения возникающих проблем существенно снижается.

На примере 1С:Предприятие мы можем выделить две основные сложности адаптации системы в условиях неопределенности:

1. Системные данные. Их актуализация, формализация и оперативное изменение.

Сложность в том, что нынешние системы плохо адаптируемы к необходимости изменения базисных данных этой самой системы. Если сегодня предприятие передумало выпускать продукт «А» в коробках, а вместо него хочет выпустить продукт «А» в палетах, недостаточно просто создать единицу измерения «Палета» в системе. Ведь цена на такой продукт, его сроки и способы доставки, реализация, договоры, соглашения с партнерами и прочее, завязаны на старой единице измерения, на коробках. А значит, для любого подобного процесса необходимо запускать определенные процедуры по миграции/актуализации новых данных для новой единицы измерения.

2. Все формы, документы, обработки и прочее жестко прописаны в коде.

Изменив что-либо, необходимо к этому изменению подготовить и систему, ведь совсем не факт, что все документы смогут «прочитать» наше нововведение. Большинство минорных и даже часть мажорных изменений, конечно, не должны влиять на работоспособность системы, если разработка выполнялась качественно и делалась под универсальные требования. Но в случае банальной смены продукта реализации, например, с «шоколадки» на «подгузник», характеристики продукта будут существенно изменяться, а значит, и все готовые формы и документы для «шоколадки», ее закупки, перемещения, сбыта необходимо будет переделать или вовсе создать с нуля. А для любого предприятия это значит только одно: необходима доработка системы специалистами, то есть новый проект внедрения или поддержки.

Иными словами, современные системы и программные обеспечения, которые используются крупными и средними предприятиями в России, являются детерминированными. Системы не способны реагировать и обрабатывать «нестандартные» ситуации, слабоадаптивны к отклонению от заложенных шаблонов и изменению входящих данных. Альтернатив фактически нет. Программное обеспечение не готово к реальности, ведь все больше и больше предприятий в России сталкивается с проблемами детерминированности систем. В полной мере уходить от детерминированности нельзя, ведь большинство процессов все же остаются предсказуемыми и абсолютно определенными, но возникает немаленькая часть ситуаций и обстоятельств, с которыми нужно и можно бороться оперативно, не по накатанной дорожке.

Современное решение

Если укрупненно представить логистическую цепочку, начиная от потребности в материальных ресурсах до их реализации, применения в производстве или использования внутри компании, можно построить схему, которая показана на рисунке 1.

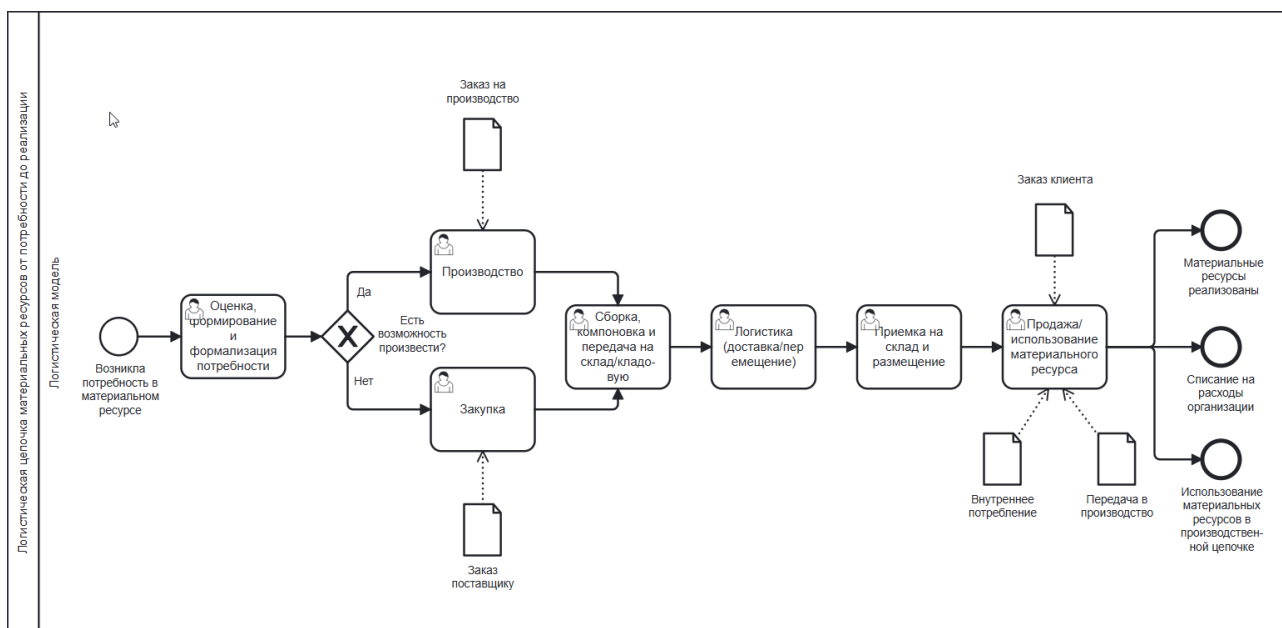


Рис. 1. Логистическая цепочка материальных ресурсов

На нем хорошо видно, что есть множество узлов/мест, где человек принимает определенное решение. Будь то оптимизация, анализ, формирование или любой другой процесс, не всегда есть воз-

возможность учесть все факторы, более того, не всегда это необходимо. Каждое предприятие видит риски в своих направлениях, задачах, процессах, опираясь на опыт работы или, наоборот, его отсутствие.

В настоящее время активно развивается направление искусственного интеллекта. Одно из предложений — подключить ко всем процессам внутри логистической цепочки ИИ для помощи в принятии управленческих и оперативных решений. Ответственность за решение всегда остается за человеком, но у него появится инструмент, который оценит реальную обстановку по каждому процессу, даст рекомендации и приведет весомые аргументы в их пользу.

В этом случае укрупненная схема логистической цепочки от потребности до реализации будет выглядеть, как показано на рисунке 2.

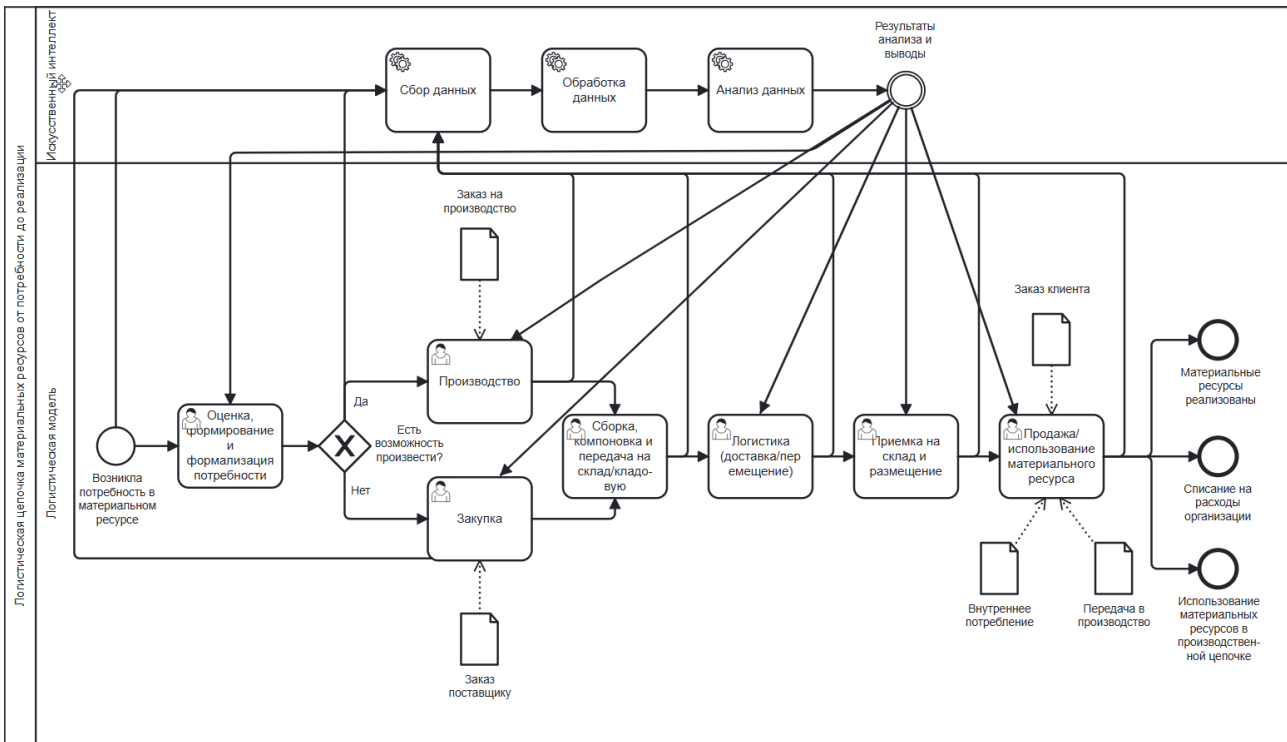


Рис. 2. Логистическая цепочка материальных ресурсов с ИИ

Заключение

Таким образом, в формировании логистических цепочек материальных ресурсов в России существует целый ряд структурных, операционных, коммерческих и функциональных проблем, которые создают серьезные препятствия для эффективного функционирования логистической системы. Также важно преодолеть существующие административные и экономические барьеры, что позволит повысить гибкость и устойчивость российских логистических цепочек в условиях изменяющегося мирового рынка. Современные программные продукты сложно адаптируемы к быстрым изменениям среды, многие проекты по внедрению делятся годами, а после еще несколько лет идет поддержка пользователей.

Для решения этих проблем предлагается провести системный анализ современных логистических цепочек материальных ресурсов, выявить ключевые задачи и факторы, которые оказывают наибольшее влияние на результат их выполнения, и уже на основании полученных данных выдвинуть свои требования к программному продукту на основе искусственного интеллекта для логистики крупных и средних предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова Э. Р., Антинескул Е. А., Киченко Л. П. *Логистика: учебное пособие*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2021. 188 с.
2. Левкин Г. Г. *Логистика: теория и практика*. М.: Директ-Медиа; 2009. 271 с.

3. Карпова Н. П. *Стратегическое планирование снабжения организаций на логистических принципах (теория и методология)*. Самара: Самарский государственный экономический университет; 2011. 342 с.
4. Постникова Т. В. Анализ факторов, влияющих на построение цепи поставки с учетом ограничений логистической инфраструктуры. *Наука и образование*. 2012;5:434–444.
5. Максимова-Кулиева Е. А., Лепетюх А. Я. Проблемы и тенденции развития логистики в России. *Вектор экономики*. 2018;6:6–16.
6. Сказкоподателева Е. А. Системный анализ в логистике воздушных пассажирских перевозок. *Вестник науки и образования*. 2015;10:26–28.
7. Дмитриев А. В. Цифровизация транспортно-логистических услуг в цепях поставок. *Логистика и управление цепями поставок*. 2018;2:65–76.
8. Маликова Т. Е. *Склады и складская логистика*. М: Издательство Юрайт; 2021. 157 с.
9. Смольянинова Е. Н., Полищук Е. В. Проблема современной складской логистики в России. *Азимут научных исследований: экономика и управление*. 2019;8:292–294.
10. Маймакова Л. В. *Логистика: курс лекций*. Казань: Казанский государственный энергетический университет; 2012. 116 с.
11. Приклад И. С. Оптимизация складской логистики. *Научный журнал*. 2018;5:84–86.
12. Непарко А. А., Алдакушева А. Б. Сбытовая логистика. *Наука сегодня: теоретические и практические аспекты*. М.: Перо; 2015:375–378.
13. Розина Т. *Распределительная логистика*. Минск: Высшая школа; 2016. 319 с.
14. Вахрушев В. Ю., Худжатов М. Б. Таможенная логистика в санкционных условиях. *Маркетинг и логистика*. 2022;3:12–24.
15. Петрушина О. М., Меркулова А. И., Тер-Оганесян К. А. К вопросу об особенностях таможенной логистики. *Вестник Калужского университета*. 2020;4:14–16.
16. Гоголин С. С., Фаддеева Е. Ю. Повышение эффективности принятия управленческих решений в логистике на основе применения информационно-аналитических систем. *Вестник Академии знаний*. 2018;6:111–117.
17. Simchi-Levi D. et al. *The Logic of Logistics. Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management*. Springer Science Business Media, Inc.; 2005. 355 p.
18. Jarżemskis A. *The Research of the Influence of Logistical Factors on Transport Flows Distribution*. Scipedia S.L.; 2004. 132 p.
19. Loi N. T., Hoa H. T. T., Danh N. T. Factors Affecting the Development of a Logistics Service Chain for Agricultural Products in the Mekong Delta, Vietnam. *Transportation Research Procedia*. 2024;80:127–136.
20. Rao K., Young R. R. Global Supply Chains: Factors Influencing Outsourcing of Logistics Functions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 1994;24(6):11–19.
21. Emmett S., Sood V. *Green Supply Chains: An Action Manifesto*. John Wiley & Sons; 2010. 293 p.

АДЕКВАТНОСТЬ СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Д. В. Горбунов^{1,2,a}, С. Г. Еловой^{1,2,b}

¹ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4420-9343>, ✉ gorbunov.dv@mail.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1860-9303>, s.elovoy@yandex.ru

Аннотация: одним из вариантов изучения сложных систем является разработка и исследование симуляционной модели. В основе рассматриваемой модели лежит теория дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Такой подход необходим, так как решить задачу воспроизведения хаотической динамики произвольных и непроизвольных движений методами детерминистской или стохастической науки не удастся ввиду сложности исследуемой подсистемы. Следует обратить внимание и на то, что если речь идет о сложной системе и хаотической динамике, то и проверить адекватность модели стандартными методами тоже весьма затруднительно в классической интерпретации результатов расчета. В работе продемонстрирован подход к проверке адекватности модели для подобных систем на основе стандартных методов с учетом хаотической динамики результатов реальной и моделируемой системы. В результате проведенной проверки адекватности разработанной симуляционной модели можно сделать вывод, что модель адекватна и ее результаты можно использовать для проведения дополнительных исследований, в которых тремор является важным и неотъемлемым компонентом.

Ключевые слова: тремор, теппинг, симуляционная модель, адекватность модели, методы проверки адекватности.

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: Горбунов Д. В., Еловой С. Г. Адекватность симуляционной модели биомеханической системы человека. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):79–85.

Поступила в редакцию: 08.08.2025.

В окончательном варианте: 18.09.2025.

VALIDITY OF THE SIMULATION MODEL OF THE HUMAN BIOMECHANICAL SYSTEM

D. V. Gorbunov^{1,2,a}, S. G. Elovoy^{1,2,b}

¹ Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4420-9343>, ✉ gorbunov.dv@mail.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1860-9303>, s.elovoy@yandex.ru

Abstract: an effective approach to studying complex systems is the use of simulation models. We developed a model of the human biomechanical system based on differential equations with a discontinuous right-hand side. This approach was required because reproducing the chaotic dynamics of voluntary and involuntary movements cannot be achieved with deterministic or stochastic methods due to the complexity of the subsystem under study.

We also noted that validating such models is difficult when using standard methods in the classical interpretation of calculation results, since chaotic dynamics complicate direct comparisons. Therefore, we demonstrated an approach to validating the model that applies standard methods while accounting for chaotic dynamics in the outputs of both real and simulated systems.

Our validation showed that the proposed simulation model is valid, and its results can be used for further research in which tremor is a significant and integral component.

Keywords: tremor, tapping, simulation model, model validity, validity verification methods.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Gorbunov D. V., Elovoi S. G. Validity of the Simulation Model of the Human Biomechanical System. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):79–85.

Original article submitted: 08.08.2025.

Revision submitted: 18.09.2025.

Введение

Исследования сложных биологических систем на основе систем моделирования являются одним из ключевых направлений для изучения динамики их поведения. Одна из проблем моделирования подобных систем или подсистем — это хаотическая динамика, которая проявляется на разных уровнях [1, 2]. Более того, сложность моделирования значительно возрастает ввиду наличия у сложных биологических систем самоорганизации. Этот процесс самоорганизации нельзя игнорировать, а природа его до конца не изучена. В этой связи остается открытым вопрос, каким образом можно оценить адекватность разработанной модели для сложной хаотической динамической системы с самоорганизацией [3–9].

В работе представлен подход к проверке адекватности симуляционной модели для биомеханической системы человека по воспроизведению динамики произвольных и непроизвольных движений. Предлагаемый подход основан на адаптации методов к реальным данным и модельным данным. Следует отметить, что для проверки адекватности в таком случае необходимо увеличить требования к количеству выборок, как реальных, так и модельных.

Стандартные методы проверки адекватности для моделей сложных биологических систем

На данный момент существует несколько алгоритмов проверки адекватности модели, но они опираются на конкретные меры, что не может быть использовано для моделей сложных биологических систем. Например, один из методов — средняя абсолютная ошибка (MAE). Указанный метод используется как метрика качества прогнозной модели, но среднее абсолютное отклонение между фактическими значениями и предсказанными моделью будет значительным из-за хаотической динамики сложной системы. Более того, если провести регистрацию реальных данных (не меняя начальных условий регистрации данных) и проверить на однородность, то результат будет не однозначный (пример представлен в таблице 1). Таким образом, на основе подобного рода исследований (таблица 1) можно сделать вывод, что данные одной модели не адекватны по отношению к данным этой же системы.

Таблица 1

Результаты проверки на адекватность реальных данных с неизменными начальными условиями методом MAE

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | | .022 | .013 | .026 | .015 | .032 | .029 | .035 | .031 | .042 | .046 | .020 | .039 | .037 | .051 |
| 2 | .022 | | .029 | .044 | .019 | .031 | .030 | .028 | .027 | .032 | .042 | .022 | .032 | .031 | .043 |
| 3 | .013 | .029 | | .028 | .021 | .037 | .028 | .034 | .034 | .044 | .044 | .020 | .038 | .039 | .050 |
| 4 | .026 | .044 | .028 | | .031 | .046 | .053 | .060 | .056 | .066 | .070 | .045 | .064 | .061 | .075 |
| 5 | .015 | .019 | .021 | .031 | | .034 | .033 | .036 | .030 | .040 | .045 | .022 | .040 | .037 | .049 |
| 6 | .032 | .031 | .037 | .046 | .034 | | .046 | .050 | .046 | .056 | .062 | .038 | .053 | .051 | .063 |
| 7 | .029 | .030 | .028 | .053 | .033 | .046 | | .016 | .027 | .031 | .023 | .016 | .024 | .031 | .037 |
| 8 | .035 | .028 | .034 | .060 | .036 | .050 | .016 | | .021 | .025 | .020 | .018 | .017 | .021 | .027 |
| 9 | .031 | .027 | .034 | .056 | .030 | .046 | .027 | .021 | | .018 | .024 | .021 | .022 | .018 | .022 |
| 10 | .042 | .032 | .044 | .066 | .040 | .056 | .031 | .025 | .018 | | .025 | .029 | .024 | .016 | .020 |
| 11 | .046 | .042 | .044 | .070 | .045 | .062 | .023 | .020 | .024 | .025 | | .028 | .026 | .029 | .027 |
| 12 | .020 | .022 | .020 | .045 | .022 | .038 | .016 | .018 | .021 | .029 | .028 | | .023 | .024 | .036 |
| 13 | .039 | .032 | .038 | .064 | .040 | .053 | .024 | .017 | .022 | .024 | .026 | .023 | | .022 | .024 |
| 14 | .037 | .031 | .039 | .061 | .037 | .051 | .031 | .021 | .018 | .016 | .029 | .024 | .022 | | .018 |
| 15 | .051 | .043 | .050 | .075 | .049 | .063 | .037 | .027 | .022 | .020 | .027 | .036 | .024 | .018 | |

Можно выделить еще один метод проверки модели на адекватность — коэффициент детерминации. В данном методе используется статистическая мера, которая может продемонстрировать, насколько хорошо модель объясняет вариацию зависимой переменной. Если провести сравнение данных, как в разобранный примере выше для MAE, то результаты будут схожи. Указанный метод покажет неадекватность данных одной системы (таблица 2).

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента детерминации для проверки на адекватность реальных данных с неизменными начальными условиями

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | 1,0 | -3,9 | -2,8 | -1,6 | -0,6 | -1,0 | -1,2 | -3,7 | -0,6 | -5,1 | -3,6 | -1,0 | -4,4 | -0,7 | -0,5 |
| 2 | -0,9 | 1,0 | -1,0 | 0,0 | -0,1 | -2,1 | -0,2 | -0,4 | -0,3 | -2,0 | -1,7 | 0,0 | -1,6 | -1,3 | -0,2 |
| 3 | -1,6 | -2,5 | 1,0 | 0,0 | -0,3 | -2,8 | -2,6 | -0,4 | 0,2 | -0,1 | -0,7 | -0,3 | -2,0 | -1,2 | -1,2 |
| 4 | -2,8 | -2,8 | -1,2 | 1,0 | 0,0 | -6,6 | -2,6 | -1,7 | -0,4 | -5,1 | -4,8 | -0,5 | -6,1 | -4,1 | -1,6 |
| 5 | -3,9 | -7,5 | -4,7 | -1,1 | 1,0 | -8,8 | -3,4 | -5,2 | -1,0 | -13 | -10 | -1,8 | -12 | -6,8 | -1,6 |
| 6 | 0,1 | -2,5 | -1,4 | -1,2 | -0,4 | 1,0 | -0,6 | -2,2 | -0,5 | -2,5 | -1,8 | -0,6 | -1,8 | 0,0 | -0,2 |
| 7 | -0,4 | -1,0 | -2,3 | -0,5 | 0,1 | -1,3 | 1,0 | -1,5 | -0,6 | -5,1 | -3,1 | -0,1 | -3,5 | -1,9 | 0,0 |
| 8 | -2,4 | -1,6 | -0,5 | -0,3 | -0,5 | -4,4 | -2,0 | 1,0 | -0,6 | -2,5 | -0,7 | -0,3 | -2,4 | -3,2 | -1,2 |
| 9 | -3,2 | -7,8 | -2,2 | -1,5 | -0,7 | -8,1 | -5,6 | -4,8 | 1,0 | -7,5 | -7,0 | -1,7 | -9,5 | -3,9 | -2,1 |
| 10 | -0,9 | -1,4 | 0,5 | -0,2 | -0,4 | -1,5 | -2,0 | -0,5 | 0,0 | 1,0 | -0,2 | -0,4 | -0,7 | -0,2 | -0,9 |
| 11 | -0,8 | -1,7 | 0,0 | -0,5 | -0,4 | -1,5 | -1,6 | 0,1 | -0,2 | -0,6 | 1,0 | -0,2 | -0,5 | -0,8 | -0,5 |
| 12 | -3,2 | -4,6 | -2,9 | -1,1 | -0,9 | -6,7 | -2,6 | -2,7 | -1,2 | -8,5 | -5,3 | 1,0 | -8,5 | -4,7 | -1,5 |
| 13 | -1,0 | -1,4 | -0,6 | -0,7 | -0,6 | -1,4 | -1,6 | -0,7 | -0,5 | -1,0 | -0,4 | -0,7 | 1,0 | -0,6 | -0,2 |
| 14 | -1,6 | -8,2 | -4,0 | -4,3 | -3,0 | -2,6 | -6,2 | -7,9 | -1,9 | -5,3 | -6,3 | -3,2 | -5,7 | 1,0 | -2,3 |
| 15 | -1,4 | -4,0 | -4,2 | -1,8 | -0,4 | -3,4 | -1,5 | -3,8 | -0,9 | -8,8 | -5,4 | -0,9 | -4,2 | -2,5 | 1,0 |

Симуляционная модель биомеханической системы человека

Прежде чем приступить к проверке на адекватность, необходимо сразу представить модель, которую необходимо оценить. Симуляционная модель разработана с использованием математического обеспечения, представленного ранее в статье [10]. В основе математического обеспечения лежит теория дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, что, с одной стороны, существенно осложняет процесс моделирования и оценку адекватности, а с другой стороны, в полной мере может воспроизвести хаотическую динамику системы с механизмом самоорганизации. Система дифференциальных уравнений с разрывной правой частью для описания динамики движений человека имеет вид [10]:

$$\begin{aligned}
 dx/dt = & f(t, x, u_1^{br}(t, x), u_2^{br}(t, x), u_1^{ibr}(t, x, Q^+(t, x)), u_2^{ibr}(t, x, Q^-(t, x)), \\
 & u_{tr}(t, x, Q(t, x)), u_{1,o}^+(x, t, m_{1,o}^+(t, x), t_{se}^+(x, t)), u_{2,w}^+(x, t, m_{2,w}^+(t, x), t_{ak}^+(x, t)), \\
 & u_{3,s}^+(x, t, m_{3,s}^+(t, x), t_{ij}^+(x, t)), u_{1,o}^-(x, t, m_{1,o}^-(t, x), t_{se}^-(x, t)), \\
 & u_{2,w}^-(x, t, m_{2,w}^-(t, x), t_{ak}^-(x, t)), u_{3,s}^-(x, t, m_{3,s}^-(t, x), t_{ij}^-(x, t)), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где o, w, s — количество мышечных волокон определенного типа, $u_1^{br}(t, x), u_2^{br}(t, x)$ осуществляют установку верхней и нижней границы, являются непрерывными и пробегают множества $U_1^{br}(t, x), U_2^{br}(t, x)$. Особое внимание необходимо обратить на функции $u_1^{ibr}(t, x, Q^+(t, x)), u_2^{ibr}(t, x, Q^-(t, x))$, отвечающие за формирование коридора, в котором генерируется линия разрыва (траектория движения), при ее пересечении происходит переключение работы мышечных пучков. Эти функции являются разрывными и пробегают соответствующие множества $U_1^{ibr}(t, x, Q^B), U_2^{ibr}(t, x, Q^H)$, здесь решением Q^B считаются значения из множества $Q_{i-1}^+(t, x)$, а решение Q^H формируем на основе множества $Q_{i-1}^-(t, x)$.

Решением системы дифференциальных уравнений (1) называется дифференциальное

включение:

$$F_1(t, x) = f \left(t, x, U_1^{br}, U_2^{br}, U_1^{ibr}, U_2^{ibr}, U_{Tr}(t, x, QQq), U_{1,o}^+ \left(t, x, M_{1,o}^+, T_{se}^+ \right), \right. \\ \left. U_{2,\omega}^+ \left(t, x, M_{2,\omega}^+, T_{ak}^+ \right), U_{3,s}^+ \left(t, x, M_{3,s}^+, T_{lj}^+ \right), U_{1,o}^- \left(t, x, M_{1,o}^-, T_{se}^- \right), \right. \\ \left. U_{2,\omega}^- \left(t, x, M_{2,\omega}^-, T_{ak}^- \right), U_{3,s}^- \left(t, x, M_{3,s}^-, T_{lj}^- \right) \right). \quad (2)$$

В соответствии с математическим обеспечением в работе задействованы мышечные волокна мышечного пучка (POS или NEG), который нужен для самоорганизации системы по удержанию траектории движения. Уровень удержания должен задаваться хаотически (рис.).

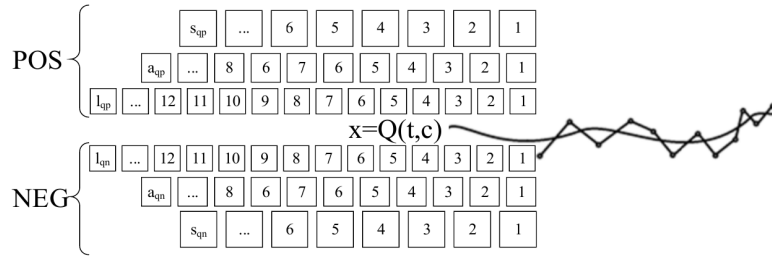


Рис. Схематическое изображение симуляционной модели в интерпретации машинного алгоритма

В соответствии с биологической составляющей функционирования мышечных пучков работа мышц представлена в численной форме:

$$S_i = \begin{cases} S_{i-1} + \sum_{e=1}^{s_{qp}} \sum_{k=1}^{a_{qp}} \sum_{j=1}^{l_{qp}} f_1(m_{pe}^+, t_{se}^+) f_2(m_{pk}^+, t_{ak}^+) f_3(m_{pj}^+, t_{lj}^+), \\ S_i \leq g_z(t), \quad m_{pe}^+ - 1, m_{pk}^+ - 1, \quad m_{pj}^+ - 1, \quad z \in N, \quad z < h, \quad h \in N; \\ S_{i-1} + \sum_{e=1}^{s_{qn}} \sum_{k=1}^{a_{qn}} \sum_{j=1}^{l_{qn}} f_4(m_{ne}^+, t_{se}^-) f_5(m_{nk}^+, t_{ak}^-) f_6(m_{nj}^+, t_{lj}^-), \\ S_i > g_z(t), \quad m_{ne}^+ - 1, \quad m_{nk}^+ - 1, \quad m_{nj}^+ - 1, \quad z \in N, \quad z < h, \quad h \in N, \end{cases} \quad (3)$$

где S_i — моделируемый сигнал; $s_{qp}, a_{qp}, l_{qp}, s_{qn}, a_{qn}, l_{qn}$ — количество мышечных волокон определенной группы мышц, которые могут быть включены в работу модели; $f_i, i = 1 \dots 6$ — функция включения определенной группы мышц и генерации потенциала усилия; $m_{pe}^+, m_{pk}^+, m_{pj}^+, m_{ne}^+, m_{nk}^+, m_{nj}^+$ — значения счетчика, отслеживающего утомление определенного мышечного волокна из определенной группы мышц; $t_{se}^+ \in [x_{se}; y_{se}], t_{ak}^+ \in [x_{ak}; y_{ak}], t_{lj}^+ \in [x_{lj}; y_{lj}]$ — случайное значение потенциала мышечного волокна из определенного диапазона; $t_{se}^- \in [x_{se}; y_{se}], t_{ak}^- \in [x_{ak}; y_{ak}], t_{lj}^- \in [x_{lj}; y_{lj}]$ — случайное «отрицательное» значение потенциала мышечного волокна из определенного диапазона; $g_z(t)$ — генерация уровня удержания определенной позиции на i -ой итерации; h — значения счетчика удержания позиции $g_z(t)$. Счет удержаний h жизненно необходим для адекватной работы модели, т.к. хаотический принцип организации функциональных систем не позволяет на длительном интервале времени Δt удерживать изолинию, т.е. уровень удержания позиции $g_z(t) \neq const$ на определенном Δt .

Уровень удержания позиции $g_z(t)$ устанавливается по формуле:

$$g_z(t) = Q(t, c), \quad S_i < g_z(t), \quad z = 0, \quad h \in N, \quad z + 1, \quad z < h, \quad (4)$$

где $Q(t)$ — случайное значение из определенного диапазона. Функция $Q(t)$ производит генерацию нового уровня при $z=h$, или при условии $g_z(t) < S_i$ при включенных в работу «отрицательных» мышцах, или при условии $g_z(t) > S_i$ при работе «положительных» мышц.

Диапазон генерации траектории варьируется на каждой итерации для $g_z(t)$. Смещение диапазона генерации уровня удержания устанавливается по формуле:

$$Q(c) = \begin{cases} A \in [-x + \Delta t; y + \Delta t], & A(t) \geq \frac{g_{z-1}(t)}{2}, & \Delta t = g_{z-1}(t), & y < y_0 = \text{const} \\ A \in [-x - \Delta t; y - \Delta t], & A(t) < \frac{g_{z-1}(t)}{2}, & \Delta t = g_{z-1}(t), & x > -x_0 = \text{const} \end{cases}, \quad (5)$$

где A — значение уровня удержания позиции, x и y — нижняя и верхняя границы генерации траектории, Δt — приращение к границам траектории.

Проверка адекватности результатов вычислительного эксперимента

Аналогичные расчеты проводились и для модельных данных. Результаты метода MAE представлены в таблице 3, а расчет коэффициента детерминации — в таблице 4. Как видно из этих таблиц, результаты коррелируют с данными, полученными на основе реальных экспериментов, несмотря на то, что значения существенно отличаются от теоретических по этим методам.

Таблица 3

Результаты проверки на адекватность модельных данных с неизменными начальными условиями методом MAE

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | .000 | .029 | .045 | .044 | .044 | .035 | .039 | .045 | .034 | .042 | .046 | .045 | .037 | .048 | .033 |
| 2 | .029 | .000 | .057 | .053 | .057 | .042 | .042 | .052 | .034 | .049 | .046 | .061 | .052 | .051 | .046 |
| 3 | .045 | .057 | .000 | .035 | .048 | .045 | .058 | .028 | .040 | .043 | .054 | .025 | .038 | .047 | .054 |
| 4 | .044 | .053 | .035 | .000 | .041 | .033 | .049 | .036 | .036 | .039 | .039 | .031 | .031 | .034 | .052 |
| 5 | .044 | .057 | .048 | .041 | .000 | .036 | .027 | .035 | .050 | .044 | .037 | .037 | .035 | .036 | .025 |
| 6 | .035 | .042 | .045 | .033 | .036 | .000 | .040 | .044 | .038 | .042 | .042 | .032 | .036 | .041 | .043 |
| 7 | .039 | .042 | .058 | .049 | .027 | .040 | .000 | .047 | .047 | .046 | .028 | .047 | .039 | .032 | .027 |
| 8 | .045 | .052 | .028 | .036 | .035 | .044 | .047 | .000 | .042 | .045 | .051 | .031 | .035 | .044 | .044 |
| 9 | .034 | .034 | .040 | .036 | .050 | .038 | .047 | .042 | .000 | .050 | .047 | .043 | .035 | .048 | .046 |
| 10 | .042 | .049 | .043 | .039 | .044 | .042 | .046 | .045 | .050 | .000 | .045 | .045 | .042 | .038 | .044 |
| 11 | .046 | .046 | .054 | .039 | .037 | .042 | .028 | .051 | .047 | .045 | .000 | .047 | .035 | .027 | .042 |
| 12 | .045 | .061 | .025 | .031 | .037 | .032 | .047 | .031 | .043 | .045 | .047 | .000 | .031 | .039 | .045 |
| 13 | .037 | .052 | .038 | .031 | .035 | .036 | .039 | .035 | .035 | .042 | .035 | .031 | .000 | .039 | .040 |
| 14 | .048 | .051 | .047 | .034 | .036 | .041 | .032 | .044 | .048 | .038 | .027 | .039 | .039 | .000 | .041 |
| 15 | .033 | .046 | .054 | .052 | .025 | .043 | .027 | .044 | .046 | .044 | .042 | .045 | .040 | .041 | .000 |

Таблица 4

Результаты расчета коэффициента детерминации для проверки на адекватность реальных данных с неизменными начальными условиями

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | 1,0 | -2,5 | -0,2 | -1,1 | -1,4 | -0,4 | -2,1 | -2,5 | -3,4 | -0,9 | -1,1 | -1,0 | -1,7 | -3,4 | -1,3 |
| 2 | -4,7 | 1,0 | -6,2 | -5,1 | -1,0 | -3,5 | -2,9 | -1,1 | -1,3 | -3,4 | -6,0 | -4,4 | -0,9 | -1,7 | -6,9 |
| 3 | -0,8 | -5,3 | 1,0 | -2,1 | -3,8 | -0,4 | -3,0 | -5,0 | -5,7 | -2,3 | -3,0 | -1,1 | -4,5 | -6,3 | -1,5 |
| 4 | -1,7 | -3,8 | -1,8 | 1,0 | -3,5 | -1,7 | -1,2 | -3,0 | -5,1 | -3,6 | -3,3 | -3,0 | -4,4 | -3,9 | 0,3 |
| 5 | -1,9 | -0,6 | -3,2 | -3,5 | 1,0 | -1,9 | -2,7 | -1,6 | -2,5 | -2,4 | -2,5 | -2,9 | -1,4 | -1,5 | -4,3 |
| 6 | -0,8 | -2,5 | -0,3 | -1,7 | -1,9 | 1,0 | -1,2 | -2,1 | -3,0 | -1,3 | -3,7 | -0,4 | -2,8 | -4,3 | -1,7 |
| 7 | -1,5 | -0,9 | -1,3 | -0,4 | -1,4 | -0,4 | 1,0 | 0,1 | -1,0 | -1,3 | -3,0 | -0,7 | -1,9 | -1,1 | -1,1 |
| 8 | -2,4 | -0,2 | -3,1 | -2,1 | -1,0 | -1,3 | 0,0 | 1,0 | -0,6 | -1,9 | -3,9 | -1,9 | -1,4 | -0,8 | -3,4 |
| 9 | -1,9 | 0,1 | -2,0 | -2,1 | -0,8 | -1,0 | -0,5 | -0,1 | 1,0 | -0,3 | -2,3 | -1,3 | -1,0 | -0,5 | -2,6 |
| 10 | -0,3 | -0,8 | -0,5 | -1,4 | -0,8 | -0,2 | -0,9 | -1,0 | -0,3 | 1,0 | -0,7 | -0,4 | -1,0 | -1,1 | -1,5 |
| 11 | 0,0 | -1,1 | -0,4 | -0,7 | -0,4 | -0,9 | -1,5 | -1,6 | -1,6 | -0,3 | 1,0 | -1,5 | -1,1 | -0,7 | -0,7 |
| 12 | -0,5 | -1,5 | -0,1 | -1,3 | -1,3 | 0,2 | -0,6 | -1,2 | -1,7 | -0,5 | -2,7 | 1,0 | -1,2 | -2,6 | -1,4 |
| 13 | -1,5 | -0,1 | -2,6 | -2,9 | -0,8 | -1,8 | -2,3 | -1,3 | -1,9 | -1,8 | -2,8 | -1,8 | 1,0 | -1,5 | -4,0 |
| 14 | -5,5 | -1,5 | -6,7 | -4,8 | -2,0 | -5,2 | -2,8 | -1,7 | -2,6 | -3,7 | -4,0 | -6,3 | -2,9 | 1,0 | -6,8 |
| 15 | -2,4 | -6,3 | -1,6 | 0,1 | -5,3 | -2,1 | -2,9 | -5,8 | -7,3 | -4,6 | -4,2 | -3,8 | -7,0 | -6,8 | 1,0 |

Для удобства восприятия в таблице 5 представлены результаты расчета статистических показателей для таблиц 1-4. Из этой таблицы можно сделать вывод, что реальные данные сопоставимы с модельными, например, по среднему значению: $\langle MAE_p \rangle = 0,034$, а $\langle MAE_m \rangle = 0,41$; $\langle R_p^2 \rangle \approx \langle R_m^2 \rangle \approx -2,29$. Причем разброс по интервалу (min;max) по MAE и R^2 незначителен. Следует отметить, что подобные расчеты справедливы только для большого набора данных, по разовой выборке сделать выводы нельзя.

Таблица 5
Статистические показатели для двух методов проверки адекватности реальных данных с неизменными начальными условиями

| | Реальные данные | | Модельные данные | |
|----------------|-----------------|----------|------------------|----------|
| | MAE_p | R_p^2 | MAE_m | R_m^2 |
| среднее | 0,034 | -2,29265 | 0,041 | -2,29123 |
| мин | 0,013 | -13,197 | 0,024 | -6,90289 |
| макс | 0,075 | 0,175279 | 0,061 | 0,250222 |
| макс-мин | 0,062 | 13,37231 | 0,036 | 7,153108 |
| станд. отклон. | 0,014 | 2,697277 | 0,007 | 1,599994 |
| дисперсия | 0,00019 | 7,275305 | 0,000059 | 2,55998 |
| медиана | 0,031 | -1,47724 | 0,042 | -1,88383 |

Для подтверждения корреляции реальных и модельных данных представлена таблица 6, в которой отражены результаты расчетов MAE для проверки согласованности реальных и модельных данных. Очевидно, что средние показатели коррелируют с данными, представленными в табл. 1 и табл. 3. Здесь среднее значение $\langle MAE_{pm} \rangle = 0,036$, а вариационный размах составляет $R=0.042$.

Таблица 6
Результаты проверки на адекватность реальных (1–15) и модельных данных (16–30) с неизменными начальными условиями методом MAE

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 1 | .025 | .035 | .032 | .033 | .032 | .031 | .034 | .042 | .040 | .026 | .030 | .037 | .036 | .036 | .038 |
| 2 | .026 | .034 | .026 | .034 | .031 | .020 | .028 | .033 | .040 | .030 | .042 | .022 | .036 | .045 | .033 |
| 3 | .022 | .042 | .022 | .027 | .036 | .021 | .036 | .046 | .046 | .032 | .035 | .030 | .043 | .049 | .025 |
| 4 | .031 | .045 | .029 | .022 | .038 | .035 | .037 | .046 | .051 | .043 | .037 | .040 | .047 | .049 | .023 |
| 5 | .029 | .038 | .032 | .026 | .032 | .037 | .034 | .041 | .043 | .041 | .032 | .043 | .038 | .034 | .032 |
| 6 | .026 | .046 | .028 | .022 | .038 | .033 | .039 | .047 | .050 | .041 | .033 | .041 | .046 | .048 | .024 |
| 7 | .026 | .042 | .025 | .037 | .039 | .014 | .029 | .037 | .046 | .031 | .046 | .022 | .040 | .054 | .036 |
| 8 | .031 | .052 | .027 | .024 | .043 | .032 | .041 | .051 | .053 | .045 | .035 | .045 | .056 | .055 | .019 |
| 9 | .024 | .046 | .023 | .024 | .039 | .025 | .037 | .046 | .052 | .038 | .037 | .031 | .044 | .055 | .024 |
| 10 | .027 | .038 | .027 | .024 | .033 | .029 | .034 | .042 | .044 | .035 | .034 | .035 | .039 | .043 | .027 |
| 11 | .033 | .047 | .030 | .030 | .042 | .028 | .036 | .047 | .050 | .031 | .042 | .029 | .047 | .054 | .028 |
| 12 | .027 | .049 | .021 | .033 | .039 | .029 | .045 | .053 | .056 | .038 | .036 | .032 | .045 | .054 | .031 |
| 13 | .027 | .045 | .024 | .022 | .039 | .031 | .035 | .047 | .050 | .034 | .033 | .036 | .046 | .050 | .024 |
| 14 | .030 | .046 | .026 | .022 | .040 | .029 | .032 | .043 | .051 | .042 | .039 | .032 | .045 | .051 | .025 |
| 15 | .025 | .030 | .031 | .042 | .026 | .021 | .038 | .035 | .039 | .027 | .040 | .026 | .029 | .040 | .041 |

Заключение

На основе проведенного исследования возможной применимости методов MAE и расчета коэффициента детерминации R^2 в качестве мер оценки адекватности модели биомеханической системы человека с хаотической динамикой и механизмом самоорганизации можно сделать вывод, что адекватность подтверждена. Следует отметить, что применимость ограничена количеством выборок, полученных от реальной системы и в результате проведения вычислительного эксперимента. Для разовых выборок такой подход не сможет продемонстрировать достоверные результаты, на основе которых можно было бы сделать вывод об адекватности модели. Необходимо обратить внимание и на то, что

подобный подход может быть использован и для других подсистем сложной биологической системы, т.к. большинство из них обладает хаотической динамикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коннов П. Е., Еськов В. М., Кухарева А. Ю., Самойленко И. С. Существуют ли математические различия между произвольными и непроизвольными движениями? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2024;(3):57–68. DOI: 10.12737/2306-174X-2024-3-54-63.
2. Зинченко Ю. П., Еськов В. М., Филатов М. А., Григорьева С. В. Стохастика и хаос в организации движений. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(2):101–106. DOI: 10.24411/1609-2163-2019-16376.
3. Thelen D. G. Adjustment of Muscle Mechanics Model Parameters to Simulate Dynamic Contractions in Older Adults. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2003;125(1):70–7. DOI: 10.1115/1.1531112.
4. *Biomechanics of the Musculo-skeletal System* / Ed. B. M. Nigg, W. Herzog. 3rd ed. Chichester: Wiley; 2007. 688 p.
5. Dariush B. Human Motion Analysis for Biomechanics and Biomedicine. *Machine Vision and Applications*. 2003;14:202-205. DOI: 10.1007/s00138-002-0108-8.
6. Nasr A., Hashemi A., Mcphee J. Scalable Musculoskeletal Model for Dynamic Simulations of Upper Body Movement. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2023;27(3):306-337. DOI: 10.1080/10255842.2023.2184747.
7. Sylvester A. D., Lautzenheiser S. G., Kramer P. A. A Review of Musculoskeletal Modelling of Human Locomotion. *Interface Focus*. 2021;11(5):20200060. DOI: 10.1098/rsfs.2020.0060.
8. Liu L., Cooper J. L., Ballard D. H. Computational Modeling: Human Dynamic Model. *Frontiers in Neurorobotics*. 2021;15:723428. DOI: 10.3389/fnbot.2021.723428.
9. Correia Ramos C. Kinematics in Biology: Symbolic Dynamics Approach. *Mathematics*. 2020;8(3):339. DOI: 10.3390/math8030339.
10. Горбунов Д. В., Гавриленко Т. В. Математическое моделирование динамических процессов организма человека на основе дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):15–20. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-02.

АНАЛИЗ ДАННЫХ О КОГНИТИВНЫХ СПОСОБНОСТЯХ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ ЧЕЛОВЕКА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ МУЗЫКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Д. В. Белощенко^{1,а}, Р. А. Чирко^{1,б}, Т. В. Гавриленко^{1,2,в}

¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

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

^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7584-7124>, ✉ d.beloshhenko@mail.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7581-918X>, chirko-99@mail.ru

^в ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Аннотация: в данной работе проведен анализ влияния различных типов звуковых стимулов на выполнение когнитивных задач, таких как письмо, а также на физиологические показатели человека (частота пульса). Обнаружены различия в количестве написанных слов и количестве допущенных грамматических ошибок в переписанном тексте у молодых мужчин в условиях отсутствия акустического воздействия и при прослушивании различных музыкальных композиций. Установлено, что музыкальные предпочтения оказывают существенное влияние на когнитивную деятельность и частоту пульса.

Мужчины, являющиеся поклонниками группы Rammstein, при прослушивании их любимой музыки написали больше слов и допустили меньше ошибок, что может быть связано с повышенной мотивацией, эмоциональной вовлеченностью и привычкой работать под любимую музыку. При прослушивании ритмической музыки участники допустили больше ошибок, вероятно, из-за отвлекающего эффекта ярко выраженных ритмических структур, которые привлекали внимание и снижали концентрацию на задаче. Классическая музыка способствовала улучшению памяти и скорости обработки информации, что привело к увеличению количества написанных слов благодаря более эффективной работе мозга.

Изменения частоты пульса соответствовали типу прослушиваемой музыки: энергичная и интенсивная музыка повышала частоту пульса на 4–13 уд/мин, а классическая — способствовала ее снижению на 5–13 уд/мин, что отражает физиологический отклик на эмоциональное состояние.

На основе анализа данных, которые поступают от пользователя в режиме реального времени, разработана интеллектуальная система оценки состояния человека под воздействием музыкальных композиций. Сопоставляя частоту пульса пользователя с конкретными музыкальными композициями, система сможет предсказывать реакцию пользователя и его эмоциональное состояние при прослушивании различных музыкальных произведений.

Ключевые слова: музыка, частота пульса, когнитивные функции.

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: Белощенко Д. В., Чирко Р. А., Гавриленко Т. В. Анализ данных о когнитивных способностях и физиологических реакциях человека на воздействие музыкальных композиций. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):86–95.

Поступила в редакцию: 26.06.2025.

В окончательном варианте: 19.09.2025.

ANALYSIS OF COGNITIVE ABILITIES AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES IN HUMANS LISTENING TO MUSIC

D. V. Beloshchenko^{1,а}, R. A. Chirko^{1,б}, T. V. Gavrilenko^{1,2,в}

¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation

² Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre «Kurchatov Institute», Surgut, Russian Federation

^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7584-7124>, ✉ d.beloshhenko@mail.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7581-918X>, chirko-99@mail.ru

^в ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Abstract: we analyzed the effects of different types of sound stimuli on cognitive task performance, such as writing, and on physiological parameters, specifically pulse rate, in office workers performing text-based tasks. We examined differences in the number of written words and grammatical errors in rewritten texts produced by young men under silence and while listening to different types of music.

Our findings show that musical preferences significantly affect cognitive activity and pulse rate. Men who preferred the band Rammstein wrote more words and made fewer errors when listening to their favorite music, likely due to increased motivation, emotional engagement, and the habit of working while listening to familiar music. When listening to fast-tempo music, participants made more errors, probably because pronounced rhythmic structures distracted attention and reduced concentration. Classical music improves memory and information processing speed, leading to a higher number of written words through more efficient brain function.

Pulse rate changes correspond to the type of music: fast-tempo and intense music increases pulse rate by 4–13 beats/min, while classical music decreases it by 5–13 beats/min, reflecting the physiological response to emotional state.

Keywords: music, pulse rate, cognitive functions.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Beloshchenko D. V., Chirko R. A., Gavrilenko T. V. Analysis of Cognitive Abilities and Physiological Responses in Humans Listening to Music. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):86–95.

Original article submitted: 26.06.2025.

Revision submitted: 19.09.2025.

Введение

Технический прогресс и увеличение интереса к психологическому и физиологическому состоянию человека дают возможность более детально изучить поставленную проблему. Несколько научных изысканий о влиянии музыки на человека доказывают, что аудиосигналы могут вызывать сильные эмоции и активировать разные зоны мозга. Одной из основных идей данных трудов является то, что мелодия, ритм и темп звука могут вызвать позитивные или негативные чувства [1, 2]. Так, быстрая музыка вызывает радость и бодрость, в то время как медленная музыка способствует расслаблению и спокойствию.

В данной статье авторы рассматривают влияние различных аудиосигналов на эмоциональное и физическое состояние человека (изменение частоты биения сердца в зависимости от прослушиваемой композиции). Сердце — чувствительный индикатор эмоционального статуса человека, поскольку является рефлекторным органом под контролем центральной нервной системы и, по существу, играет роль в отражении процессов, происходящих в головном мозге [3, с. 344].

Известно, что музыкальные ритмы способны влиять на природные биоритмы человека, такие как: ритм движений, сна и бодрствования, ритм дыхания, ритм сердечных сокращений, ритм ходьбы и другие.

Ритм музыки, звучание, вырабатываемое звуковыми колебаниями, воздействует на эмоциональное состояние и реакцию человеческого организма на процесс прослушивания музыки. Происхождение эмоций начинается от физиологического состояния организма и только затем мозг формирует реакцию к этому состоянию, в подтверждение чего выводится четкое определение «психофизиологическое» [4]. Важное значение уделяется как музыке, так и звукам природного происхождения, в частности, звуку дождя, ветра, пения птиц.

Согласно результатам исследования [5] звуки природы могут снижать уровень стресса и тревожности, способствуя общему улучшению психоэмоционального состояния. Это подтверждается данными, полученными в результате экспериментов, где участники, находясь в среде с природными звуками, демонстрировали снижение уровня кортизола — гормона стресса.

Не стоит, однако, думать, что все аудиосигналы способствуют положительному воздействию на человека. Сильные и резкие звуки могут вызвать стрессовую реакцию, снижать способность концентрироваться и повышать агрессию. Было продемонстрировано, что воздействие шума чрезмерной

продолжительности может иметь крайне негативные последствия для здоровья: нарушения сна, повышение артериального давления, сердечно-сосудистые проблемы [6, с. 159]. Шум как фактор окружающей среды является причиной 15% всех профессиональных заболеваний.

Шум, даже если он слабый, быстро и значительно утомляет нервную систему людей и оказывает психическое воздействие. Современные исследования также рассматривают влияние аудиосигналов в рамках терапии. Музыкаотерапия и терапия звуком все больше применяются в психологии и психиатрии. Эти терапии основаны на звучании музыки и определенной последовательности звуковых частот для настроения на терапевтическую волну, которая помогает улучшить настроение и снимает симптомы различных расстройств [7].

Разработка и внедрение носимых устройств, например, умных часов и браслетов, привели к упрощению процесса наблюдения пользователем за своим состоянием сердечно-сосудистой системы (ССС) в режиме реального времени. Данные устройства способны отслеживать частоту сердечных сокращений (ЧСС), уровень кислорода в крови, давление, температуру тела и даже уровень стресса, позволяя пользователям давать оценку своему состоянию здоровья и предлагая рекомендации по улучшению этого состояния.

Например, из-за стресса или физической активности у человека повышается ЧСС, носимые устройства обнаруживают это и сообщают пользователю в виде пуш-уведомлений, далее пользователь может принять меры, чтобы, например, успокоиться, слушая успокаивающую музыку, которая поможет снизить частоту сердечных сокращений. Данная взаимная интеграция аудиосигналов и носимых технологий создает уникальные возможности для оптимизации показателей здоровья человека.

Объединив две эти технологии, пользователи смогут не только отслеживать и улучшать свое здоровье в режиме реального времени, но и более активно участвовать в его улучшении, даже, например, при подсчете суточного количества шагов. Программа на часах рекомендует суточную норму по количеству шагов в день, в зависимости от индивидуальных показателей человека, ведет подсчет и всячески мотивирует достичь дневной цели по количеству шагов путем поддерживающих уведомлений или открытием новых «цифровых» достижений. Такой подход поможет улучшить показатели здоровья человека и повысить качество жизни в целом.

Более того, использование носимых устройств и аудиосигналов в связке может способствовать составлению персонализированных рекомендаций по здоровью, адаптированных к конкретным потребностям и предпочтениям человека. Носимое устройство может определять уровень физической активности пользователя и предоставлять персональные рекомендации по музыке, чтобы улучшить качество тренировки или способствовать скорейшему расслаблению после нее.

Потенциальные преимущества и задел данной интеграции технологий огромны, также стоит отметить, что множество опубликованных научных трудов демонстрируют, что акустические сигналы обладают многопрофильным воздействием на психофизиологическое состояние человека, оказывая влияние как на эмоциональную сферу, так и на когнитивные процессы.

Значимость аудиальной среды в жизнедеятельности человека подтверждается многообразием эмоциональных и когнитивных эффектов, вызываемых звуковыми сигналами.

Актуальность дальнейшего изучения данной темы становится все более очевидной, особенно учитывая современные условия жизни, характеризующиеся высоким уровнем стресса, при котором вопросы сохранения здоровья выходят на первый план. Понимание механизмов воздействия различных звуковых сигналов на психоэмоциональное состояние позволяет нам принимать более обоснованные решения относительно выбора музыкальных композиций и акустической среды, окружающей нас в повседневности, что потенциально способствует повышению общего уровня благополучия и качества жизни.

Объект и методы исследования

В исследовании приняли участие 20 мужчин в возрасте 20 лет. Все испытуемые были правши, не имели хронических заболеваний, вредных привычек и не высказывали жалоб на состояние здоровья. Каждый участник заполнил и подписал информированное согласие на участие в исследовании, а также получил полную информацию о характере, длительности и цели эксперимента; о методах и способах его проведения; о возможных последствиях для физического или психического здоровья, которые могут возникнуть в результате участия в эксперименте [8].

Обследование участников проводилось с использованием неинвазивных методов [9] и строго соответствовало этическим нормам, установленным Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (2008 г.) [8], Нюрнбергским кодексом (1947 г.) [10].

Для анализа изменений в когнитивных функциях (точности исполнения задачи) и параметров ССС в зависимости от характера прослушиваемой музыки или звукового фона участникам эксперимента предлагалось переписать специализированный текст объемом 3000 символов. В течение трех минут они должны были переписать этот текст в двух условиях: без акустического воздействия и при прослушивании музыкальных композиций. При этом фиксировалось количество написанных слов и число допущенных грамматических ошибок с использованием стандартизированной системы оценки.

Эксперимент состоял из четырех этапов, между этапами испытуемым предоставлялось время для восстановления ($T \geq 15$ мин):

1. Первый этап: переписывание текста в спокойной обстановке без музыки.
2. Второй этап: переписывание текста под прослушивание тяжелой металлической музыки (группа Rammstein).
3. Третий этап: переписывание текста при прослушивании классической музыки (произведения Людвига ван Бетховена).
4. Четвертый этап: переписывание текста под ритмическую музыку.

Параллельно на указательный палец кисти левой руки каждого участника крепился пальцевой пульсоксиметр HealthTree JKS50B (рис. 1), который регистрировал показатели SpO_2 (уровень кислорода в крови) и PR (частоту пульса).



Рис. 1. Пальцевой пульсоксиметр HealthTree JKS50B

Следует отметить, что музыкальное сопровождение подавалось на среднем уровне громкости, при котором участники не испытывали дискомфорта, связанного с высокой интенсивностью звука.

Анализ и обработка собранных данных проводились с использованием программных приложений MS Office Excel 2016 и Statistica 10.

Результаты исследования и их обсуждение

В общей сложности было собрано 80 работ от 20 испытуемых, находившихся в различных состояниях. Все эти письменные работы были тщательно обработаны и проанализированы. Установлено, что в группе молодых мужчин (рис. 2) в спокойном состоянии 12 человек (60%) совершили 19 ошибок, при прослушивании «тяжелого» металла 11 человек (55%) совершили 15 ошибок, при прослушивании классической музыки 10 человек (50%) совершили 13 ошибок и при прослушивании ритмической музыки 13 человек (65%) совершили 21 ошибку.

Анализ рисунка 2 показал, что 50–65% испытуемых совершили ошибки при написании одного и того же текста в разных состояниях. Количество ошибок в группе молодых мужчин при прослушивании различных музыкальных композиций и в спокойном состоянии варьировало от 0 до 2. Минимальное количество ошибок во всех 5 сериях эксперимента — 0, максимальное — 4 в спокойном состоянии.

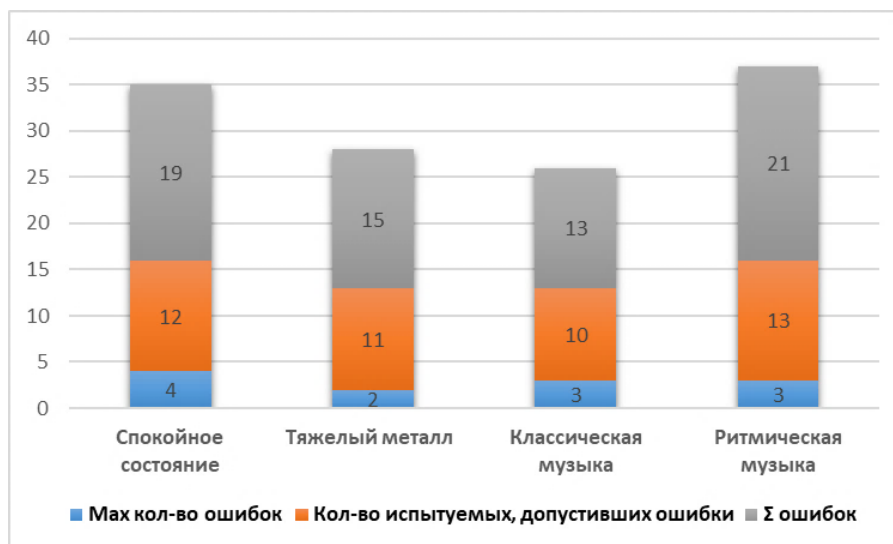


Рис. 2. Количество ошибок в группе испытуемых ($n = 20$ человек) без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

При прослушивании ритмической музыки было зафиксировано наибольшее количество ошибок (21 ошибка), а число участников, допустивших ошибки, также оказалось самым высоким — 13 человек. Это может быть объяснено тем, что ритмическая музыка с ярко выраженными музыкальными элементами может невольно привлекать внимание и отвлекать от концентрации на тексте [11]. Когда мозг переключается на ритм музыки, снижается сосредоточенность на основной задаче — переписывании текста, что повышает вероятность допущения ошибок. Далее производился анализ количества написанных слов (рис. 3).

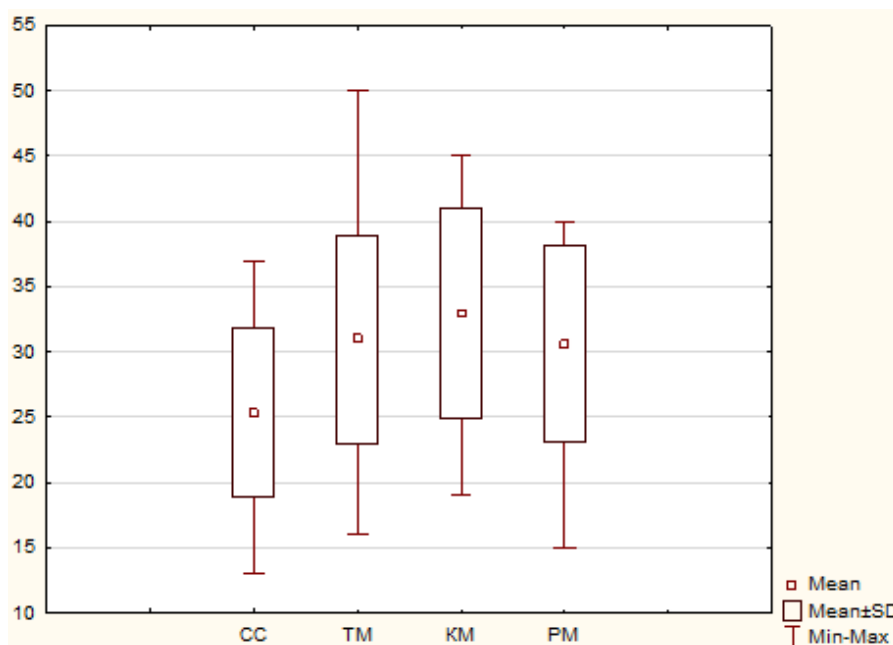


Рис. 3. Количество написанных слов в группе испытуемых ($n = 20$ человек) без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций. CC — в спокойном состоянии; при прослушивании: TM — тяжелого металла, KM — классической музыки, PM — ритмической музыки

Анализ рисунка 3 показал, что в группе молодых мужчин *тах* количество слов было написано при воспроизведении тяжелого металла — 50 слов и классической музыки — 45 слов. В среднем больше всего слов также было написано при прослушивании классической музыки $\bar{X}_{cp} = 33$. Прослушивание классической музыки может способствовать улучшению памяти и ускорению обработки информации,

что, в свою очередь, приводит к увеличению количества написанных слов за счет более эффективной работы мозга [12, 13]. Аналогичная динамика прослеживалась и при анализе общего количества написанных слов за 3 минуты.

Было установлено, что группа молодых мужчин в спокойном состоянии написала 507 слов, $X_{cp} = 25$; при прослушивании тяжелого металла — 619 слов, $X_{cp} = 31$; при прослушивании классической музыки — 659 слов, $X_{cp} = 33$; при прослушивании ритмической музыки — 612 слов, $X_{cp} = 31$. Больше всего слов было написано при прослушивании классической музыки — 659 слов, а также тяжелого металла — 619 слова. Интересен тот факт, что 45% мужчин предпочитают слушать тяжелый метал и многие оказались фанатами группы Rammstein. Прослушивание любимой музыки могло привести к увеличению продуктивности в количественном выражении, что проявляется в увеличении количества написанных слов за единицу времени [14]. Мужчины, которые являются поклонниками группы Rammstein, могли написать больше слов при прослушивании такой музыки благодаря сочетанию эмоциональной вовлеченности, повышенной мотивации, физиологических реакций и привычки работать под любимую музыку.

Полученные значения количества написанных слов в группе молодых мужчин проверялись на соответствие закону нормального распределения с помощью теста Колмогорова–Смирнова и Лиллифорса, Шапиро–Уилка. Данные имеют нормальный тип распределения ($p > 0,05$), поэтому дальнейшие сравнения производили с помощью парного критерия Стьюдента (табл. 1).

Таблица 1

Результаты применения парного критерия Стьюдента (*t*-тест для зависимых выборок) для оценки наличия различий в количестве написанных слов в группе испытуемых без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

| N=20 | X_{cp} | Std. Dv. | Diff. | Std. Dv. diff. | t | p |
|-------------|----------|-----------------|--------------|-----------------------|----------|--------------|
| CC | 25,35 | 6,51 | | | | |
| с ТМ | 30,95 | 7,97 | -5,6 | 8,29 | -3,02 | 0,007 |
| с КМ | 32,95 | 8,03 | -7,6 | 8,61 | -3,94 | 0,000 |
| с РМ | 30,6 | 7,5 | -5,25 | 9,18 | -2,55 | 0,019 |
| | | | | | | |
| ТМ | 30,95 | 7,97 | | | | |
| с КМ | 32,95 | 8,03 | -2 | 7,64 | -1,17 | 0,256 |
| с РМ | 30,6 | 7,5 | 0,35 | 6,58 | 0,23 | 0,814 |
| | | | | | | |
| КМ | 32,95 | 8,03 | | | | |
| с РМ | 30,6 | 7,5 | 2,35 | 9,29 | 1,13 | 0,272 |

Примечание: CC — в спокойном состоянии; при прослушивании: ТМ — тяжелого металла, КМ — классической музыки, РМ — ритмической музыки. X_{cp} — среднее количество написанных слов; *Std. Dv.* — стандартное отклонение выборки; *Diff.* — средняя разница количества написанных слов; *Std. Dv. diff.* — стандартное отклонение для средней разницы; *t* — значение *t*-критерия; *p* — вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу о том, что средние величины количества написанных слов в сравниваемых группах не различаются

Diff. — стандартное отклонение для средней разницы; *t* — значение *t*-критерия; *p* — вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу о том, что средние величины количества написанных слов в сравниваемых группах не различаются

Анализ таблицы 1 показал, что значимыми были различия, полученные при сравнении количества написанных слов в спокойном состоянии, с количеством слов, написанных при прослушивании тяжелого металла ($p = 0,007$), классической музыки ($p = 0,000$) и ритмической музыки ($p = 0,019$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что различные звуковые стимулы значительно влияют на когнитивные функции и производительность труда при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности.

Далее был выполнен анализ показателей ЧСС молодых мужчин. Было установлено, что на всех этапах эксперимента SpO_2 составляло 94-98%, что, в принципе, является нормой сатурации для здорового человека (при которой 95% и больше гемоглобина связано с кислородом). Анализ значений PR представлен на рис. 4.

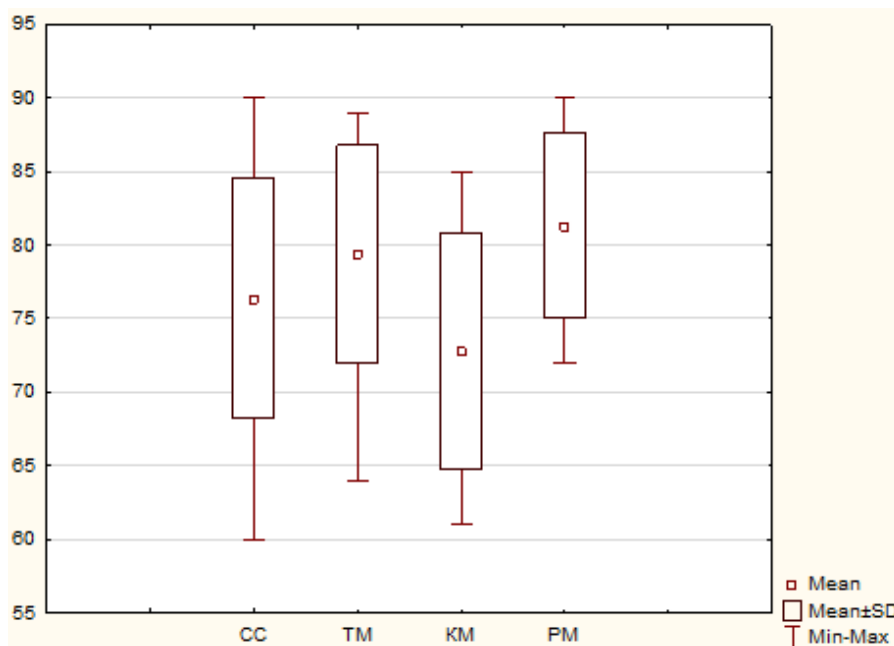


Рис. 4. Результаты PR в группе испытуемых ($n = 20$ человек) без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций. CC – в спокойном состоянии; при прослушивании: TM – тяжелого метала, KM – классической музыки, PM – ритмической музыки

Было установлено (рис. 4), что в группе мужчин в среднем PR составляет в спокойном состоянии 76 уд/мин, при прослушивании тяжелого метала – 79 уд/мин, при прослушивании классической музыки – 72 уд/мин и при прослушивании ритмической музыки 81 уд/мин. Минимальное значение PR было установлено в спокойном состоянии – 60 уд/мин, максимальное – в спокойном состоянии и при прослушивании ритмической музыки – 90 уд/мин.

В группе у 50% мужчин наблюдалось увеличение PR при прослушивании тяжелого метала на 3–7 уд/мин, прослушивание этого жанра музыки может приводить к повышению ЧСС, что связано с сильной эмоциональной и физиологической реакцией организма. При прослушивании ритмической музыки у 80% мужчин также наблюдалось увеличение PR на 4–13 уд/мин. Ритмическая музыка, отличающаяся четким и повторяющимся тактом, способна стимулировать физиологические процессы в организме и приводить к повышению частоты пульса. Сердце может невольно стремиться синхронизироваться с внешним ритмом музыки, что вызывает изменение сердечного ритма [2].

Однако при прослушивании классической музыки у 65% мужчин PR становилась ниже на 5–13 уд/мин. Классическая музыка с медленным темпом и мягкой мелодией может приводить к снижению ЧСС, что связано с активацией парасимпатической нервной системы, которая отвечает за расслабление и восстановление организма [12–14].

В ходе исследования было установлено, что в группе испытуемых есть мужчины (45%), которые предпочитают музыку группы Rammstein. У этих мужчин частота пульса либо не изменялась, либо незначительно увеличивалась (≈ 3 –4 уд/мин). Для поклонников тяжелого метала такая музыка может служить средством эмоциональной регуляции. Важно отметить, что реакция на музыку является индивидуальной и зависит от личных предпочтений, опыта и эмоционального состояния.

Полученные значения PR в группе молодых мужчин проверялись на соответствие закону нормального распределения с помощью теста Колмогорова–Смирнова и Лиллифорса, Шапиро–Уилка. Данные имеют нормальный тип распределения ($p > 0,05$), поэтому дальнейшие сравнения производили с помощью парного критерия Стьюдента (табл. 2).

Анализ таблицы 2 показал, что значимыми были различия, полученные при сравнении значе-

Таблица 2

Результаты применения парного критерия Стьюдента (*t*-тест для зависимых выборок) для оценки наличия различий в *PR* в группе испытуемых без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

| N=20 | X_{ср} | Std. Dv. | Diff. | Std. Dv. diff. | t | p |
|-------------|-----------------------|-----------------|--------------|-----------------------|----------|--------------|
| СС | 76,4 | 8,13 | | | | |
| с ТМ | 79,4 | 7,37 | -3 | 8,59 | -1,56 | 0,134 |
| с КМ | 72,75 | 8 | 3,65 | 5,11 | 3,19 | 0,004 |
| с РМ | 81,3 | 6,28 | -4,9 | 3,14 | -6,97 | 0,000 |
| | | | | | | |
| ТМ | 79,4 | 7,37 | | | | |
| с КМ | 72,75 | 8 | 6,65 | 7,31 | 4,06 | 0,000 |
| с РМ | 81,3 | 6,28 | -1,9 | 6,74 | -1,26 | 0,222 |
| | | | | | | |
| КМ | 72,75 | 8 | | | | |
| с РМ | 81,3 | 6,28 | -8,55 | 4,08 | -9,36 | 0,000 |

Примечание: СС – в спокойном состоянии; при прослушивании: ТМ – тяжелого металла, КМ – классической музыки, РМ – ритмической музыки. *X_{ср}* – средняя *PR*; *Std. Dv.* – стандартное отклонение выборки; *Diff.* – средняя разница *PR*; *Std. Dv. Diff.* – стандартное отклонение для средней разницы; *t* – значение *t*-критерия; *p* – вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу о том, что средние величины *PR* в сравниваемых группах не различаются

ний *PR* при прослушивании классической музыки с тяжелым металлом ($p = 0,000$), с ритмической музыкой ($p = 0,000$) и в спокойном состоянии ($p = 0,004$), а также при сравнении значений *PR* в спокойном состоянии с ритмической музыкой ($p = 0,000$).

Результаты нашего исследования показывают, что разные музыкальные композиции значительно влияют на когнитивные функции, физиологические показатели человека и эффективность работы при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности. При правильном использовании предпочитаемой (любимой) музыки можно добиться повышения эффективности труда, улучшения психоэмоционального состояния и создания комфортной рабочей атмосферы. Однако важно учитывать индивидуальные особенности и специфические требования рабочего процесса, чтобы музыка способствовала достижению поставленных целей и не снижала качество работы или безопасность. Для этого была разработана интеллектуальная система оценки состояния человека под воздействием музыкальных композиций.

Разработка интеллектуальной системы основывается на анализе данных, которые поступают от пользователя в режиме реального времени. На вход система будет получать два ключевых параметра: текущую *PR* пользователя и его музыкальный плейлист. Каждый человек – личность, обладающая своим уникальным набором музыкальных предпочтений, который формируется и может меняться в течение всей жизни. Сопоставляя *PR* пользователя с конкретными музыкальными композициями, система сможет предсказывать реакцию пользователя и его эмоциональное состояние при прослушивании различных музыкальных произведений.

Проектирование

Схема бизнес-логики концепта интеллектуальной системы показана на рисунке 5.

Входные данные: *PR* и пользовательский плейлист

Алгоритмы начинают работу с получения данных о *PR* пользователя в реальном времени. Для этого применяются смарт-часы или фитнес-браслеты, постоянно регистрирующие физиологические

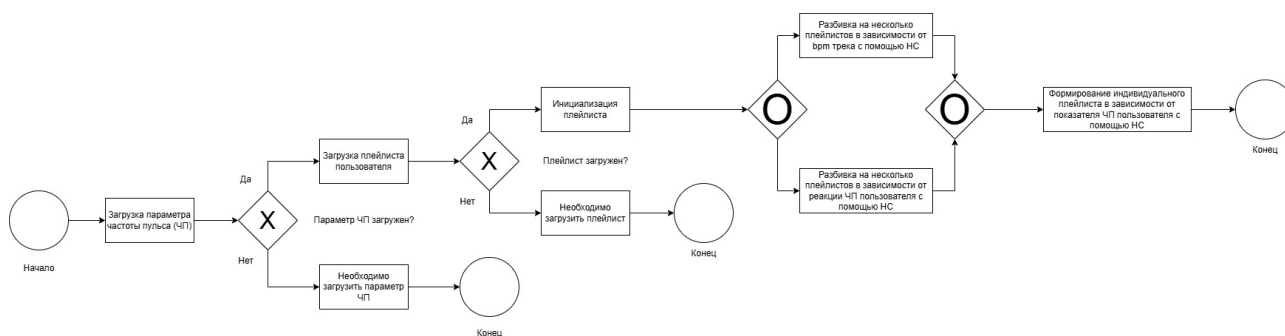


Рис. 5. Схема в нотации *brtl* интеллектуальной системы оценки состояния человека под воздействием музыкальных композиций

показатели. Одновременно с этим пользователь загружает свой плейлист, включающий композиции, которые он предпочитает слушать в повседневных делах. Интеллектуальная система проводит анализ изменений *PR* на протяжении всего процесса прослушивания, фиксируя реакцию на каждую отдельную мелодию.

На основе этих данных система применяет методы машинного обучения, чтобы создать персональную модель взаимодействия между музыкальными произведениями и физическим состоянием пользователя. Пример: если данные о *PR* показывают, что определенная композиция вызывает увеличение *PR*, сопровождающееся приливом энергии или улучшением настроения, система сформирует отдельный плейлист и добавит туда эту композицию, а также будет предлагать ее в аналогичных ситуациях.

Полученные результаты можно применять в разнообразных областях. Музыкаотерапия, основанная на принципах данной интеллектуальной системы, сможет предлагать индивидуальные лечебные программы, варьируя музыкальные композиции в зависимости от состояния пациента. Эти технологии также могут быть внедрены в фитнес и спорт, где часто используется музыка во время тренировок. Оптимальное сочетание энергичных треков может повысить эффективность занятий спортом и улучшить общее самочувствие спортсменов. Кроме того, на производственных процессах музыка может способствовать снижению уровня стресса и утомляемости, что, в свою очередь, уменьшает вероятность ошибок и несчастных случаев. Безопасность — важнейший фактор любой производственной деятельности. Применение музыки в качестве инструмента управления стрессом и негативными эмоциями может способствовать созданию более безопасной среды.

Помимо этого, использование этой интеллектуальной системы в повседневной жизни обычным пользователем может оптимизировать процесс выбора музыки для релаксации, отдыха или повышения производительности труда.

Заключение

Музыка способна создавать оптимальные условия для повышения производительности, если она соответствует личным предпочтениям и не является отвлекающим фактором. Использование любимой музыки в рабочей среде может способствовать повышению эффективности труда. Музыка может улучшать настроение, увеличивать мотивацию и снижать ощущение монотонности при выполнении рутинных задач.

Понимание того, как любимая музыка влияет на количество ошибок и объем выполненной работы при написании текста, а также на частоту пульса и ЧСС, позволяет разработать эффективные стратегии ее использования в офисной и производственной среде. Это открывает возможности для повышения производительности и общего благополучия сотрудников, что в конечном итоге приносит пользу как самим работникам, так и организации в целом.

Концепция интеллектуальной системы, оценивающей состояние человека в ответ на музыкальные произведения, представляет собой многообещающее направление, сочетающее в себе музыку, психологию и современные технологии. С помощью анализа данных о ЧСС и личных музыкальных предпочтениях данная система способна не просто улучшать эмоциональное самочувствие пользователей, но и положительно влиять на их физическое здоровье. Слияние научных знаний и искусства способно

выступать не только в качестве средства для приятного времяпрепровождения, но и как эффективный инструмент для улучшения общего качества жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин В.И. Возможности музыкально-интегральной психотерапии в профилактике городских неврозов. *Вестник МГУКИ*. 2016;4:124–130. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27296964>.
2. Хайт Г. А. Музыка и здоровье. *Медицинские, социальные и философские аспекты здоровья человека в современном обществе: опыт междисциплинарных исследований*. Т. 2. Орел: Орловский гос. ун-т; 2015:143–148.
3. Красноперова М. Н. Влияние шумового воздействия на организм человека. *Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия*: материалы Международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре; 2022:344–345. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48152739>.
4. Бехтерева А. И. Влияние музыки на человека. *Избранные доклады 61-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та; 2015:893–896. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23708084>.
5. Hunter M. R., Gillespie B. W., Chen S. Yu-Pu. Urban Nature Experiences Reduce Stress in the Context of Daily Life Based on Salivary Biomarkers. *Front Psychol*. 2019;10:722. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.00722.
6. Ефанов А. М., Ляхова О. Л., Мезенцева О. А. Влияние шумового воздействия на здоровье человека. *Наука-2020*. 2019;11(36):158–162. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-shumovogo-vozdeystviya-na-zdorovie-cheloveka-1>.
7. Самсонова Г. О. *Системные психофизиологические механизмы афферентно-эфферентного воздействия музыки*: автореф. дис. канд. биол. наук. Тула; 2002. 24 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002897759.
8. Хельсинкская декларация Всемирной медицинской ассоциации. Этические принципы проведения медицинских исследований с участием людей в качестве субъектов исследования. *Права и свободы человека в психиатрии*. Режим доступа: <http://www.psychopravo.ru/law/int/helsinki-deklaraciya.htm>.
9. *Конституция Российской Федерации*. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/e7fbd40d5c89c3066eab2473bcaac30880b58eb3.
10. Нюрнбергский кодекс 1947 год. *Права и свободы человека в психиатрии*. Режим доступа: <http://www.psychopravo.ru/law/int/nyurnbergskij-kodeks.htm>.
11. Федотчев А. И., Радченко Г. С. Музыкальная терапия и «музыка мозга»: состояние, проблемы и перспективы исследований. *Успехи физиологических наук*. 2013;44(4):35–50. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20589136>.
12. Матохина А. А. Исследование влияния классической музыки на функциональное состояние людей различных профессий. *Грани познания*. 2013;2(22):69–72. Режим доступа: <http://grani.vspu.ru/files/publics/1367241239>.
13. Хрущ О. И., Саранская Н. В. Методы регуляции эмоционального состояния. *Амурский научный вестник*. 2013(3):190–196. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21128643>.
14. Киреева Л. А., Яковлев В. Н., Дорохов Е. В. и др. Влияние прослушивания музыки Моцарта и рок-музыки на умственную работоспособность у студентов с различными типами высшей нервной деятельности. *Прикладные информационные аспекты медицины*. 2015;18(1):102–105. Режим доступа: <https://goo.su/5A4mC9>.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ГОЛОСОВЫЕ ПОМОЩНИКИ ДЛЯ СЛУЖБ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ

В. А. Орлов^{1,a}, А. В. Гавриленко^{2,b}

¹ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6742-1289>, ✉ upsvadim@gmail.com

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1837-5698>, gavrilenko.anna.v@gmail.com

Аннотация: в статье проведен комплексный обзор теоретических аспектов проектирования интеллектуальной автоматизированной системы — голосового помощника для служб технической поддержки. Рассмотрены ключевые компоненты голосового взаимодействия: автоматическое распознавание речи (ASR), обработка естественного языка (NLP), механизмы диалогового управления и синтеза речи (TTS). Особое внимание уделено архитектурным подходам к построению подобных систем, включая монолитную, клиент-серверную и микросервисную архитектуры, с выделением преимуществ и ограничений каждой. На основе анализа современных технологических решений обоснована целесообразность применения микросервисного подхода в условиях высоконагруженных сервисных сред. Проведен сравнительный анализ существующих голосовых ассистентов, адаптированных под русскоязычную аудиторию, с точки зрения их применимости в автоматизации процессов технической поддержки.

Ключевые слова: голосовой помощник, техническая поддержка, автоматизированная система, обработка естественного языка, микросервисная архитектура.

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: Орлов В. А., Гавриленко А. В. Интеллектуальные голосовые помощники для служб технической поддержки. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):96–104.

Поступила в редакцию: 03.08.2025.

В окончательном варианте: 11.09.2025.

INTELLIGENT VOICE ASSISTANTS FOR TECHNICAL SUPPORT SERVICES

V. A. Orlov^{1,a}, A. V. Gavrilenko^{2,b}

¹ Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6742-1289>, ✉ upsvadim@gmail.com

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1837-5698>, gavrilenko.anna.v@gmail.com

Abstract: we reviewed the theoretical foundations of designing an intelligent automated system – a voice assistant for technical support services. We examined the key components of voice interaction: automatic speech recognition (ASR), natural language processing (NLP), dialog management, and text-to-speech (TTS). We analyzed architectures of such systems, including monolithic, client-server, and microservice architectures, and highlighted the advantages and limitations of each. Based on this analysis, we validated the use of a microservice approach in high-load service environments. We also conducted a comparative analysis of existing voice assistants adapted for Russian-speaking users in terms of their applicability to technical support automation.

Keywords: voice assistant, technical support, automated system, natural language processing, microservice architecture.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Orlov V. A., Gavrilenko A. V. Intelligent Voice Assistants for Technical Support Services. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):96–104.

Original article submitted: 03.08.2025.

Revision submitted: 11.09.2025.

Введение

Сегодня мы становимся свидетелями переломного момента: общение человека с машиной все больше напоминает диалог с живым собеседником. Если раньше обращение в службу поддержки ассоциировалось с долгим ожиданием на линии и частым переключением между специалистами, то уже завтра на вопросы пользователей сможет мгновенно отвечать интеллектуальный голосовой помощник — быстрый, точный и всегда готовый к диалогу.

Рост потока обращений в ИТ-подразделения крупных предприятий закономерен. Цифровизация охватывает все новые процессы, расширяется спектр сервисов, растет число пользователей. При этом большая доля запросов остается типовой: она не требует тщательной экспертизы, но ежедневно отнимает часы труда операторов.

Есть и другая проблема, которая редко упоминается. На крупных предприятиях десятилетиями формировались колоссальные базы знаний — инструкции, регламенты, решения типовых ошибок. Эти массивы данных — настоящие «кладовые опыта», но зачастую они используются в ручном режиме. Сотруднику приходится искать нужную информацию в некоторой базе знаний, по ключевым словам, после чего предоставлять клиенту содержащееся там решение в ручном режиме.

В связи с этим был разработан подход — подключение интеллектуального голосового ассистента напрямую к корпоративным базам знаний. В этом случае пользователь получает не сухую ссылку на документ, а конкретный ответ в привычной речевой форме, а оператор освобождается от рутинных операций, связанных с поиском. Такой симбиоз технологий ASR, NLP и TTS с корпоративными базами знаний позволяет превратить накопленный опыт предприятия в живой инструмент.

В центре внимания настоящей работы — процессы технической поддержки и их трансформация под воздействием голосовых интерфейсов, интегрированных с корпоративными базами знаний.

Материалы и методы

В центре внимания авторов данной статьи находится программная архитектура голосового помощника, ориентированная на функционирование в условиях высоконагруженных служб технической поддержки. Выдвигается гипотеза, что сочетание микросервисной организации, современных методов распознавания речи и унифицированных стандартов интеграции позволит разработать решение, которое обеспечит высокую точность ответов, удобство взаимодействия с пользователями и при этом минимальные затраты на масштабирование.

Главными методами исследования выступили системно-структурный анализ, позволяющий описать логику работы ключевых модулей и их взаимосвязей, сравнительный обзор существующих технологических стеков, а также обзорно-аналитический метод — для систематизации теоретических знаний о технологиях распознавания, синтеза речи и обработки естественного языка. Источниками информации послужили научные статьи, техническая документация платформ ASR/NLP/TTS, а также данные об архитектурных паттернах, применяемых в промышленности.

Механизмы функционирования служб технической поддержки

Службы технической поддержки реализуют многоуровневую модель обработки запросов (L1–L3), рекомендованную ITIL:

1. L1 — первичный контакт с пользователем, регистрация и классификация запроса.
2. L2 — углубленная диагностика и устранение инцидентов.
3. L3 — привлечение экспертов и разработчиков для решения нестандартных задач.

Схематично порядок обращения пользователей в службу технической поддержки посредством системы Service Desk можно представить в общем виде (рис. 1).

Технологии распознавания речи (ASR)

В классической архитектуре систем автоматического распознавания речи принято выделять три взаимосвязанных функциональных блока.



Рис. 1. Порядок исполнения обращения в службу технической поддержки

В первом блоке происходит предварительная аудиообработка. Сырые данные, поступающие с микрофона, проходят каскад фильтрации, в который, помимо подавления стационарных и импульсных помех, обычно включают выравнивание динамического диапазона и компенсацию канал-зависимых искажений. Целью служит формирование максимально чистого сигнала для дальнейшего анализа.

Вторым этапом идет параметризация (извлечение акустических признаков). После предварительной очистки речевой поток разбивается на перекрывающиеся кадры, каждый из которых описывается компактным вектором дескрипторов. Наиболее распространенным выбором остаются мел-частотные кепстральные коэффициенты, дополненные дельта- и дельта-дельта-параметрами, однако все чаще используют и альтернативные спектро-темпоральные представления, адаптированные под конкретное оборудование и акустические условия.

Заключительным действием является лингвистическое декодирование. На этом этапе система отыскивает такую последовательность лексических единиц, которая с наибольшей апостериорной вероятностью объясняет наблюдаемые векторы признаков. Оптимизационная задача решается одной из модификаций алгоритма Витерби, а для ограничения вычислительных затрат применяют лучевой поиск и прочие эвристики. Итоговый гипотезный граф содержит не только финальный транскрипт, но и альтернативные пути, что упрощает постфактискую переоценку.

Современные алгоритмы автоматического распознавания речи (АРР) базируются на статистических моделях и методах машинного обучения. Классическая формулировка задачи распознавания — найти такую последовательность слов W , которая максимизирует вероятность $P(X|W)$ при данном акустическом наблюдении X . Согласно правилу Байеса это эквивалентно максимизации произведения $W = \operatorname{argmax} P(W) P(X|W)$, где $P(X|W)$ — вероятность порождения акустического наблюдения при данной словесной гипотезе (так называемая акустическая модель), а $P(W)$ — языковая модель, отражающая априорную вероятность данной последовательности слов в языке [1]. Иначе говоря, $P(X|W)$ моделирует соответствие звуков и фонем/слов, а $P(W)$ — частотность и связность слов в речи. Такой подход позволяет разделить проблему на две части: акустическое моделирование и языковое моделирование.

Обработка естественного языка

После этапа автоматического распознавания речи, приводящего акустический сигнал к текстовому представлению, выполняется многоуровневая обработка естественного языка (Natural Language Processing, NLP). Задача данного блока заключается в формировании формализованной репрезентации исходного текста, пригодной для последующего информационно-аналитического этапа системы.

В общем случае лингвистический конвейер русскоязычных систем включает три последовательно выполняемых процедуры:

- морфологический анализ;
- синтаксический разбор;
- семантическую интерпретацию.

Совокупность исполнения этих этапов обеспечивает формирование структурированного представления транскрибированного текста, что является необходимым условием для эффективного функционирования последующих когнитивных модулей (диалогового менеджера, модулей рекомендаций, аналитических подсистем).

Механизмы рассуждения и принятия решений

После того как модуль понимания речи сформировал семантически размеченную реплику пользователя, система переходит к этапу решения (reasoning). Именно на данной стадии определяется, какое действие необходимо выполнить либо какой текст следует сгенерировать в ответ. В литературе такой компонент нередко обозначается термином «диалоговый управляющий» или «процессор рассуждения».

В наиболее общем виде задача сводится к выбору реакции r из множества возможных R , максимизирующей некоторый критерий серьезности/полезности:

$$\hat{r} = \arg \max_{r \in R} F(r, c, \delta),$$

где c — контекст диалога, а δ — текущая семантическая репрезентация реплики. На практике функционал F варьируется от простого сопоставления с шаблоном до сложного стохастического функционала, включающего прагматические факторы и вероятностные оценки успешности.

Существующие решения условно группируются в две большие категории, каждая из которых имеет собственные достоинства и ограничения. Описание категорий представлено в таблице 1.

Таблица 1

Категории механизмов принятия решений

| Категория | Основная идея | Типичные инструменты |
|----------------------------------|--|--|
| Экспертные (правилловые) системы | Расчет реакции по набору детерминированных правил IF–THEN, организованных в дерево или граф знаний | Продукционные системы, Prolog-подобные движки, Graph-based dialog managers |
| Нейросетевые (обучаемые) модели | Выбор или генерация ответа осуществляется нейросетью, обученной на парах «ситуация–действие» либо «контекст–ответ» | Seq2Seq LSTM, Transformer (GPT-семейство), Reinforcement Learning-based DM |

В современных промышленных ассистентах чаще встречается гибридный вариант: экспертное ядро отвечает за критично важные сценарии (оплата, подписка), а нейросетевой компонент покрывает свободный разговор и обрабатывает непредусмотренные запросы.

Синтез речи

Последним этапом голосового интерфейса является синтез речи, или технология Text-to-Speech (TTS) — преобразование произвольного текста в искусственно сгенерированную устную речь. Именно благодаря синтезу речи голосовые помощники могут общаться с пользователем в привычной акустической форме. К синтезу предъявляются высокие требования: речь на выходе должна быть разборчивой, естественной и интонационно выразительной, чтобы пользователь воспринимал голос ассистента комфортно. Разработка систем TTS — сложная инженерная задача, в которой сочетаются знания лингвистики (фонетики, просодии) и методы цифровой обработки сигналов и машинного обучения.

Примерно с 2016 года происходит революция в TTS благодаря глубокому обучению. Появляются нейросетевые модели, способные напрямую преобразовывать текст в звучание, минуя разбиение на фрагменты. Одной из первых прорывных разработок стал алгоритм Tacotron (Google, 2017), а затем

Tacotron 2 (2018) — нейросетевая архитектура, которая принимает на вход текст и вырабатывает спектрограмму (представление звука) с заданным произношением и интонацией. По сути Tacotron заменил собой классический каскад «фонетический анализ → просодика → генерация сигналов» на единую нейросеть последовательного декодирования [2]. Для получения конечного звука спектрограмма затем прогоняется через нейросетевой вокодер — например, алгоритм WaveNet (DeepMind, 2016) или его упрощенные варианты (Parallel WaveGAN, WaveRNN). WaveNet — это глубокая сверточная сеть, генерирующая аудиосигнал по одной выборке за раз, способная создавать очень натуральное звучание. Комбинация Tacotron 2 + WaveNet задала новый стандарт: качество синтезированной речи стало сопоставимо с записью человека по критерию MOS (Mean Opinion Score) в пределах 4.0–4.5 из 5.0. Позже появились улучшения: FastSpeech (Microsoft, 2019) — модель, убирающая авторегрессию Tacotron и позволяющая синтезировать речь значительно быстрее, Flowtron и др.

Отдельно исследуются способы управления голосовыми параметрами: например, задавать эмоциональную окраску, стиль речи, голосовой тембр. Для русского языка многие из этих архитектур были адаптированы энтузиастами и компаниями. Так, в 2020 г. компанией Tinkoff были открыты модели на базе Tacotron для русского языка (проект Tinkoff TTS на GitHub), появились голоса на основе VITS (2021, объединенная энд-ту-энд модель спектрограммы и вокодера на основе VAE-GAN). В академической среде упоминаются эксперименты с GAN-сетью WGANSing для синтеза речи, но пока нейросети GAN показали менее устойчивое качество по сравнению с авторегрессивными и поточными моделями. Как работает современный синтез речи? Он тоже модульный, хотя модули теперь могут быть внутри одной нейросети. Сначала выполняется предобработка текста: нормализация (преобразование чисел, сокращений в развернутый вид — например, «стр. 5» → «страница пятая»), расстановка ударений. Последнее для русского языка критично: от позиции ударения зависит звучание гласных.

Некоторые системы используют словари ударений, другие — обучают модель предсказывать ударение в слове по контексту. Далее текст разбивается на последовательность входных символов — чаще всего букв (графемы), иногда с пометками ударений, или сразу в фонемы. Затем основной блок — акустическая модель TTS — преобразует последовательность символов в акустические признаки речи. Современные Tacotron-подобные модели генерируют мел-спектрограмму (распределение энергии по частотам во времени). Этот выход далее поступает в вокодер, который преобразует спектрограмму в звуковую волну (PCM-сигнал). Вокодеры могут быть классическими (гриффин-лимовский алгоритм и фильтрация) или нейросетевыми (WaveNet, WaveGlow, HiFi-GAN и т.д.). Нейровокодеры, обученные на реальных аудио, как правило, дают гораздо более естественный тембр и интонационные нюансы. Например, WaveNet генерирует микроскопические особенности голоса человека, делая речь практически неотличимой на слух.

Сравнительный анализ голосовых помощников для служб технической поддержки

Для сравнительного обзора были взяты следующие системы голосового взаимодействия для служб технической поддержки:

1. Алиса — голосовой помощник, запущенный Яндексом 10 октября 2017 года.
2. Ассистенты Джой и Афина из семейства Салют, которые стали первыми в России виртуальными ассистентами, способными разговаривать при помощи генеративной модели естественного языка ruGPT-3 с 760 млн параметров.
3. Голосовой помощник Олег от Т-Банка, который появился в июне 2019 года.

Для сравнения данных решений была составлена таблица 2, в которой описаны ключевые достоинства и недостатки представленных в анализе систем.

Все три решения демонстрируют высокую эффективность в автоматизации клиентских коммуникаций и пользовательской поддержки. Яндекс Алиса выигрывает благодаря широкому кругозору и способности вести гибкие диалоги; ее разумно выбирать, когда важны эрудиция ассистента и высокая узнаваемость бренда. Салют от Сбера выделяется глубокой интеграцией с государственными и корпоративными сервисами, поэтому подходит для проектов, где критична локальная адаптация и тесная связь с обширной экосистемой, а также возможность варьировать голосовой образ. Олег от Тинькофф — узкоспециализированный ассистент, идеально заточенный под финансовую поддержку и телефонные сценарии: его стоит рассматривать, если приоритетом являются точность распознавания речи и выверенные скрипты звонков. При выборе платформы для технической поддержки важно учитывать специфику задач. При этом ни одно из существующих сегодня решений не удовлетворяет

Таблица 2

Сравнительный анализ аналогов

| Критерии сравнения | Яндекс Алиса | Олег (Тинькофф) | Сбер Салют |
|--|--------------|-----------------|------------|
| 1. Понимание русского языка (естественная речь) | + | + | + |
| 2. Наличие офлайн-режима | - | - | - |
| 3. Открытость платформы (доступность SDK/навыков) | + | - | + |
| 4. Интеграция с экосистемой (банковской / государственной) | +/- | + | + |
| 5. Универсальность использования (вне родной экосистемы) | + | - | +/- |
| 6. Качество синтеза речи (натуральность голоса) | + | + | +/- |
| 7. Адаптация под бренд (возможность изменить голос/образ) | - | + | +/- |
| 8. Специализация на бизнес-сценарии | +/- | + | + |
| 9. Точность АРР (автоматическое распознавание речи) | + | + | + |
| 10. Удобство разработки (низкий порог входа) | + | - | - |

требованиям к автономной офлайн-работе и бесшовному внедрению в ИТ-инфраструктуру промышленного предприятия.

Выбор и обоснование архитектуры системы

При разработке архитектуры голосового помощника для внутренней службы поддержки необходимо рассмотреть несколько вариантов архитектурных подходов: монолитная архитектура, классическая клиент-серверная модель и современная микросервисная архитектура. Ниже проводится сравнительный анализ этих вариантов с точки зрения требований системы, после чего обосновывается выбор оптимального решения.

Исходя из предъявляемых к системе требований: селективное масштабирование компонентов, бесшовная интеграция с внешними сервисами и управляемое развитие функционала — наиболее адекватным решением видится микросервисная архитектура. Для подтверждения этого вывода произведен сопоставительный анализ преимуществ и ограничений монолитного и микросервисного подходов. В таблице 3 представлено влияние каждой архитектуры на производительность, поддерживаемость, гибкость масштабирования и стойкость к изменениям окружения.

Таким образом, альтернативные подходы либо слишком монолитны (затрудняют масштабирование и модификацию), либо не обеспечивают достаточной модульности. Микросервисы позволяют естественно разделить функциональность голосового помощника на самостоятельные части и получить требуемую гибкость. В дальнейшем изложении в качестве целевого решения рассматривается микросервисная архитектура, а все компоненты системы будут выступать как отдельные сервисы, взаимодействующие по внутренним API.

Результаты

В итоге можно сделать вывод, что наилучшие показатели устойчивости и качества работы голосового помощника достигаются при использовании микросервисной архитектуры, где каждый функциональный модуль — от распознавания речи до аналитики пользовательских запросов — существует в виде отдельного сервиса. Такой подход обладает следующими преимуществами:

1. Гибкое масштабирование: при увеличении потока обращений можно оперативно добавить вычислительные ресурсы только для тех модулей, которые испытывают повышенную нагрузку.
2. Отказоустойчивость: выход из строя одного модуля не приводит к полной недоступности системы, что критично для служб технической поддержки.
3. Упрощение обновлений: модернизация или дообучение языковых моделей может производиться без остановки всего комплекса.

Предлагаемая архитектура голосового помощника состоит из цепочки связанных микросервисов (рис. 2):

1. Сервис распознавания речи.
2. Сервис обработки естественного языка.

Таблица 3

Сравнение архитектурных подходов к построению ПО

| Критерий сравнения | Монолитная архитектура | Клиент-серверная архитектура | Микросервисная архитектура |
|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Масштабируемость | Ограниченная | Средняя | Высокая |
| Отказоустойчивость | Низкая | Средняя | Высокая |
| Гибкость обновления | Низкая | Средняя | Высокая |
| Сложность разработки | Низкая (на начальных этапах) | Средняя | Высокая (на начальных этапах) |
| Сложность поддержки | Высокая | Средняя | Средняя |
| Использование ресурсов | Эффективное на малых проектах | Среднее | Среднее |
| Применимость для голосового помощника | Простые решения | Средние решения | Сложные решения |
| Производительность системы | Высокая | Высокая на сервере, возможны задержки | Средняя, возможны задержки |
| Легкость интеграции | Низкая | Средняя | Высокая |

3. Диалоговый менеджер.
4. API шлюз.
5. Сервис генерации голоса.
6. Файловое хранилище.

Голосовой запрос от пользователя поступает в первый сервис, в котором голос преобразуется в текст, который подается на вход в сервис обработки естественного языка. В данном микросервисе происходит обработка текста, результатом работы которого являются выделенные смысловые объекты, которые подаются в диалоговый менеджер. В диалоговом менеджере происходит основная работа с полученной информацией. Именно в нем осуществляется поиск решения в имеющейся базе знаний, создается тикет в систему поддержки пользователей, определяется ответ пользователю. Полученная информация затем передается в сервис генерации ответов, на выходе из которого пользователь уже может получить готовый ответ в виде сгенерированного голоса. Таким образом реализуется полный цикл взаимодействия пользователя с системой: вопрос пользователя (голосом) — автоматический поиск ответа — голосовой ответ пользователю с возможностью эскалации при отсутствии ответа.

Также с целью разрешения спорных ситуаций предусмотрена система хранения диалога между пользователем и системой. Сервисом распознавания речи и сервисом генерации ответов сохраняются имеющиеся в них аудиопотоки в систему хранения данных. Это является наиболее подходящей структурой, потому что не требует необходимости передавать данные по всей сети системы.

Разработанная концептуальная модель демонстрирует целостный и логически выстроенный процесс обработки обращения от пользователя. Каждый сервис системы выполняет определенную задачу и передает результаты далее по цепочке, что обеспечивает гибкость и масштабируемость решения. За счет прозрачности, последовательности операций и строгого разграничения обязанностей между модулями система остается управляемой и удобной для дальнейшей модификации. Таким образом, предложенная архитектура создает надежный фундамент для построения эффективных и адаптируемых голосовых помощников, способных обрабатывать значительные объемы запросов, интегрироваться с различными внешними системами и эволюционировать в соответствии с изменяющимися требованиями бизнеса и пользователей.

Кроме того, выявлено, что индекс процентной ошибки распознавания слов (Word Error Rate) существенно снижается при регулярном дообучении моделей на отраслевых терминах и реальных

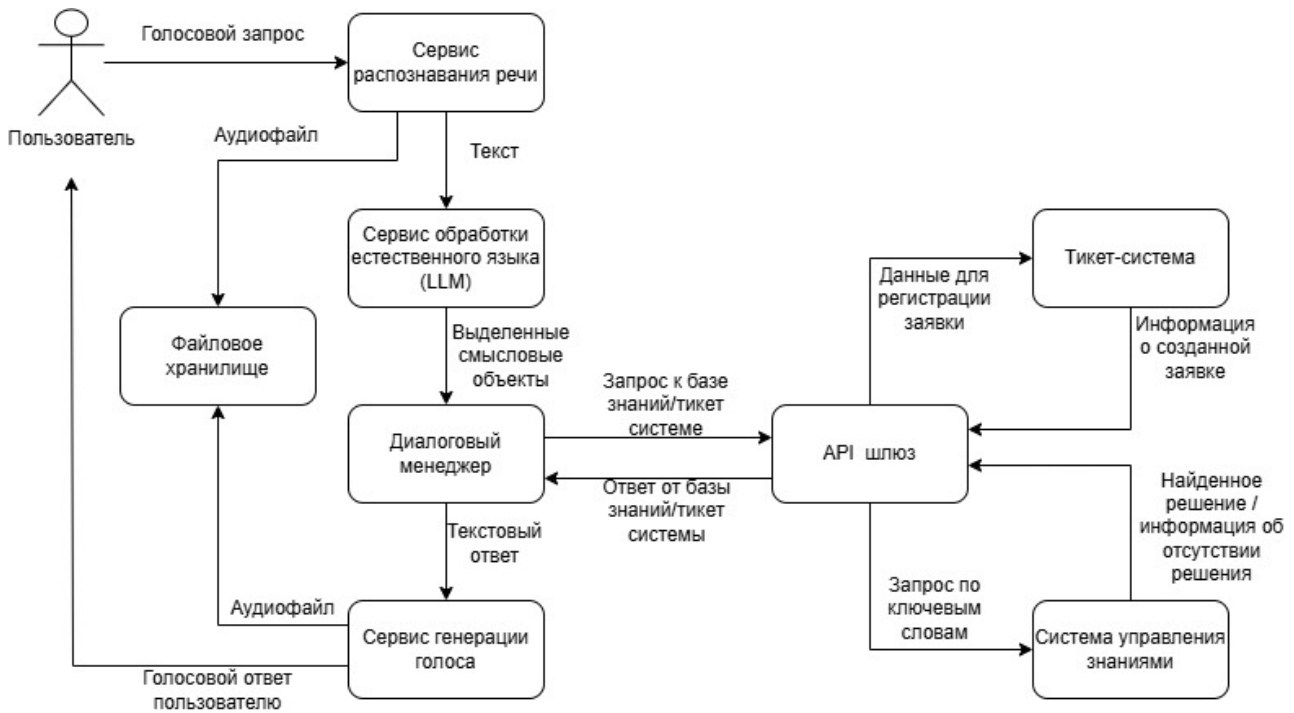


Рис. 2. Концептуальная модель системы

пользовательских диалогах. В среднем, если показатель ошибок уменьшается на 5–10 процентов, это благоприятно сказывается на качестве обслуживания и восприятии голосового помощника пользователями.

Интеграцию с корпоративными базами знаний и системами управления заявками (система управления взаимоотношениями с клиентами, тикет-сервисы и другие) рекомендуется осуществлять через единый шлюз приложений (API-шлюз), использующий REST или gRPC. Это упрощает архитектуру и дает возможность подключать новые сервисы с минимальными изменениями в существующих модулях. Крайне важно обеспечить защиту передаваемых данных, особенно если речь идет о конфиденциальной информации клиентов, например, путем шифрования соединений и разграничения прав доступа.

Сопоставление полученных данных с результатами предыдущих исследований подтверждает, что заявленная гипотеза о высокой эффективности комплексного подхода при проектировании голосового помощника, в целом, верна. Новизна представленных решений заключается в комплексном учете специфики технических запросов и необходимости обеспечения масштабируемости и надежности в условиях реального бизнеса.

Заключение

Исследование охватило несколько ключевых направлений. Прежде всего, был выполнен всесторонний анализ предметной области и существующих подходов к автоматизации служб поддержки. Подробно изучены механизмы их функционирования, что позволило выделить типовые сценарии обработки обращений. Отдельное внимание уделено современным технологиям распознавания и синтеза речи, а также инструментам обработки естественного языка, которые сегодня формируют основу эффективного голосового взаимодействия.

Кроме того, был проведен сравнительный обзор уже существующих решений, что дало возможность выявить их сильные и слабые стороны. На этой базе разработана собственная концепция: спроектирована автоматизированная система, обоснован выбор архитектуры, подготовлены концептуальная и функциональная модели.

Перспективы развития проекта связаны с расширением языковых моделей на основе отраслевых текстовых корпусов, внедрением методов активного обучения для оперативного пополнения базы сценариев, а также интеграцией с системами телефонной аналитики. Последнее направление открывает новые возможности. Оценка эмоций и уровня удовлетворенности абонента позволит превратить

голосового помощника из инструмента автоматизации в полноценного участника диалога, способного не только решать задачи, но и учитывать эмоциональный контекст общения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тампель И. Б., Карпов А. А. *Автоматическое распознавание речи*: учеб. пос. СПб: Университет ИТМО; 2017. 152 с.
2. Как устроена Алиса. Лекция Яндекса. *Сообщество IT-специалистов Хабр*. Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/349372/>.
3. Кравченко Д. А. Микросервисная архитектура. *Интерактивная наука*. 2022;4. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikroservisnaya-arhitektura>.
4. Пацей Н. В., Шитько А. М. Интеграция микросервисов на основе RPC. *Эпоха науки*. 2021;27:32–37.
5. Бужин И. Г., Деревянкин А. Ю., Антонова В. М., Перевалов А. П., Миронов Ю. Б. Эффективность фреймворков для передачи информации в виртуализированной сети связи с микросервисной архитектурой. *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2023;2:23–31.
6. Бондаренко Д., Данилов А. В. Виртуальные ассистенты Сбер и их особенность. *Экономика и инновации*: сб. ст. участников межвузовской научно-практической конференции. В 3 т. Т. 3. Москва: РЭУ им. Г. В. Плеханова; 2023:11–16.
7. Как в Тинькофф разрабатывают навыки голосового ассистента Олега. *Сообщество IT-специалистов Хабр*. Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/tbank/articles/650381/>.
8. Chandler H. Microservices vs. Monolithic Architecture. *Atlassian*. Режим доступа: <https://www.atlassian.com/microservices/microservices-architecture/microservices-vs-monolith>.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОМ ПИТАНИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОСТАВА ПРОДУКТОВ

Э. Г. Тунян^{1,2,3,a}, Р. С. Сазиков^{1,2,3,b}, С. А. Харламов^{1,2,c}

¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

² ООО «ЕДРО», г. Сургут, Российская Федерация

³ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатowski институт», г. Сургут, Российская Федерация

^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/0009-0000-5605-0531>, harlamov_sa@surgu.ru

Аннотация: системы поддержки принятия решений в области индивидуализированного питания развиваются на стыке ИИ и нутрициологии, опираясь на разнообразные данные: от химического состава продуктов и биомаркеров до изображений блюд и пользовательских предпочтений. В фокусе — создание рекомендаций, адаптированных к особенностям организма и реальному пищевому поведению, включая скрытое переедание вредных компонентов.

Современные архитектуры таких систем задействуют языковые модели, методы машинного обучения, компьютерное зрение и обработку естественного языка. Используются как классические пищевые базы, так и данные с носимых сенсоров, микробиота и визуальные сигналы. Заметна тенденция к объединению различных типов данных — от биомедицинских до визуальных — в рамках одной аналитической структуры, пусть и не всегда с заранее определенной архитектурой.

Публикации последних лет (2018–2025) свидетельствуют: при использовании персонализированных данных продвинутые алгоритмы демонстрируют более высокую точность оценок и зачастую оказываются результативнее в генерации диетических рекомендаций. Клинические наблюдения, проведенные в ряде проектов, фиксируют значимые улучшения: снижение выраженности симптомов СРК почти на 40 % и достижение ремиссии диабета 2 типа примерно у 73 % испытуемых.

В работе рассмотрены как практические решения — чат-боты с языковыми моделями и системы оценки нутриентного состава по фото, так и концептуальные сдвиги в понимании роли ИИ в питании. Основной вектор — переход от шаблонных рекомендаций к тонко настроенным вмешательствам, способным учитывать не только биометрию, но и повседневные контексты выбора пищи.

Ключевые слова: индивидуализированное питание, интеллектуальные системы поддержки принятия решений, персонализированная диета, искусственный интеллект, машинное обучение, большие данные в питании, анализ состава пищевых продуктов, пищевые добавки, переедание, рекомендательные системы, носимые устройства, нутригеномика, пищевые базы данных, профилактика хронических заболеваний, визуально-языковые модели, цифровое здоровье, пищевое поведение, метаболический профиль, сенсоры и трекинг питания, этика и приватность в ИИ.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатowski 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., Харламов С. А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в персонализированном питании на основе анализа состава продуктов. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):105–111.

Поступила в редакцию: 25.07.2025.

В окончательном варианте: 08.09.2025.

INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR PERSONALIZED NUTRITION BASED ON THE ANALYSIS OF FOOD COMPOSITION

E. G. Tunyan^{1,2,3,a}, R. S. Sazikov^{1,2,3,b}, S. A. Kharlamov^{1,2,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/0009-0000-5605-0531>, harlamov_sa@surgu.ru

Abstract: personalized nutrition does not align well with traditional disciplinary boundaries, and attempts to define it narrowly have often failed. We analyzed how artificial intelligence and nutrition intersect and found that most current approaches operate as context-specific solutions rather than coherent systems. Existing platforms draw on diverse data sources such as food composition metrics, biometric updates, meal images, and user preferences, but their effective integration remains uncertain.

We observed a shift from fixed system architectures to modular and flexible configurations. Language models, probabilistic classifiers, and computer vision algorithms are increasingly combined to enhance responsiveness, though often at the expense of structural consistency.

The body of evidence for AI-driven personalized nutrition is expanding but remains inconsistent. Reported outcomes include reductions of up to 40% in irritable bowel syndrome symptoms and partial diabetes remission in more than 70% of participants. However, these results vary considerably across studies and are often influenced by external factors unrelated to nutrition.

Despite these limitations, the field continues to advance. Personalized nutrition is emerging not only as a technical application but also as a redefinition of dietary advice in a digital, data-driven environment.

Keywords: personalized nutrition, intelligent decision support systems, personalized diet, artificial intelligence, machine learning, big data in nutrition, food composition analysis, food additives, overeating, recommender systems, wearable devices, nutrigenomics, food databases, chronic disease prevention, visual-language models, digital health, eating behavior, metabolic profile, nutrition sensing and tracking, ethics and privacy in AI.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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., Kharlamov S. A. Intelligent Decision Support Systems for Personalized Nutrition Based on the Analysis of Food Composition. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):105–111.

Original article submitted: 25.07.2025.

Revision submitted: 08.09.2025.

Введение

Питание остается одним из ключевых факторов, определяющих состояние здоровья, однако в повседневной практике нередко недооцениваются риски, связанные с систематическим избытком соли, сахара и насыщенных жиров. Даже при наличии официальных рекомендаций большая часть этих веществ поступает в организм незаметно, через промышленно обработанные продукты. Самоконтроль в таких условиях оказывается затруднительным: добавленные сахара и трансжиры часто не распознаются потребителем [1].

Это делает особенно актуальным поиск инструментов, позволяющих не просто фиксировать пищевые привычки, но и соотносить их с индивидуальными показателями метаболического состояния. Персонализированное питание предлагает такой подход, опираясь не на усредненные нормы, а на адаптацию рекомендаций под генетику, микробиоту, биомаркеры и образ жизни. Тем не менее традиционные диетологические практики по-прежнему ориентированы на «среднего» пациента и не учитывают физиологическую разнородность.

Кроме физиологии, важным остается и поведенческий фактор: люди склонны занижать объемы потребляемого. Это усиливает интерес к цифровым решениям, способным интерпретировать рацион с опорой на объективные данные. Интеллектуальные системы могут восполнять ограниченные аналитические возможности человека: выявлять риски, распознавать связи между рационом и состоянием здоровья, адаптировать рекомендации под текущую картину.

Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) значительно расширило возможности обработки пищевых данных. Современные системы обучаются на многомодальных источниках — от

таблиц состава продуктов до показаний сенсоров и лабораторных анализов. Благодаря этому удается выявлять устойчивые, но слабо различимые закономерности. Так, система может зафиксировать хроническое превышение уровня потребления соли и предложить вмешательство до наступления клинически выраженных последствий.

Сегодня ИИ в питании — не просто технологическая новинка, а потенциальный инструмент профилактики хронических заболеваний, связанных с образом жизни. Диабет, гипертония, ожирение — лишь часть проблем, на которые можно повлиять через своевременные и точные рекомендации. Интеллектуальные системы становятся посредниками между человеком и сложной биомедицинской информацией [2]. Интерес к таким решениям проявляют не только ученые и врачи, но и разработчики food-tech-платформ.

В работе рассматривается, как именно подходы к созданию интеллектуальных систем применяются в задачах персонализированного питания и на чем они основаны. Рассмотрены архитектурные решения (модульные и интегрированные), алгоритмические подходы — от классических моделей до языковых трансформеров, а также типы данных, формирующие базу рекомендаций: биомаркеры, поведенческие паттерны, визуальные сигналы, анамнез. Обсуждаются методы оценки эффективности интеллектуальных систем поддержки принятия решений на техническом и клиническом уровне. В финальной части рассматриваются конкретные примеры применения, позволяющие увидеть как реализованный потенциал технологий, так и те барьеры, с которыми сталкиваются подобные решения на практике. Отдельно рассматривается возможность использования ИИ для выявления «скрытого» передания — феномена, часто остающегося за пределами непосредственного наблюдения, но имеющего пролонгированное воздействие на обмен веществ.

Материалы и методы

Отправной точкой для анализа послужили как общедоступные, так и специализированные научные ресурсы, охватывающие публикации примерно с 2018 года и далее — с явным акцентом на свежие разработки, отражающие текущее состояние дисциплины [3]. Ключевые слова, примененные при поиске, варьировались от «персонализированное питание» и «искусственный интеллект и диета» до англоязычных выражений наподобие «nutrition recommender system» и «precision nutrition AI». В обзор включены как результаты рецензируемых исследований (в том числе систематических обзоров и эмпирических работ), так и сведения о функционирующих программных решениях [4]. Всего было проанализировано порядка полусотни материалов. Однако в итоговую версию обзора вошли лишь те, в которых прослеживается либо новизна подхода, либо концептуальная полнота, позволяющая судить о трендах в данной предметной области.

В целях придания логической стройности материалу была предложена классификация подходов по ряду ключевых параметров. Один из них — архитектурная организация систем. Отмечается широкий диапазон решений: от традиционных экспертных систем и относительно простых мобильных приложений до разветвленных облачных платформ, интегрирующих несколько специализированных модулей ИИ. Среди повторяющихся конфигураций — модульные структуры, включающие оркестраторы, персонализированные модели, популяционные базы знаний и диалоговые интерфейсы на базе LLM. Показательно, что встречаются и менее модульные конфигурации — те, где пользовательский ввод (скажем, фото с телефона) обрабатывается «насквозь» и почти без промежуточных этапов приводит к выдаче рекомендаций. Хотя подобные «сквозные» схемы и выглядят технологически изящно, отношение к ним в профессиональной среде остается, мягко говоря, неоднозначным.

Следующий аналитический фокус — используемые алгоритмические решения. Здесь различаются несколько методологических направлений: машинное обучение (включая глубокие нейросети), применяемое в задачах регрессии и классификации пищевых данных; обработка естественного языка, задействованная при анализе текстовых описаний, пищевых дневников и пользовательских запросов; методы компьютерного зрения, демонстрирующие высокую точность в идентификации и сегментации продуктов на изображениях [5]. Любопытны решения, где попытались объединить визуальные нейросети с физическим сенсингом, — например, с помощью глубинных камер для пространственной оценки еды на тарелке. Получилось своеобразное сращение двух подходов — довольно инженерное, но, по видимому, рабочее [6]. Кроме того, внимание уделено языковым моделям последнего поколения — GPT-подобным архитектурам, адаптированным под задачи генерации объясняющих рекомендаций, включая приемы prompt engineering. Любопытны и более амбициозные гибридные решения: в частности, инте-

грация казуальных моделей с языковыми, направленная на обеспечение интерпретируемости и более точной индивидуализации рекомендаций.

Особое место занимает анализ типов данных, используемых для построения систем персонализированного питания. Прежде всего, это базы данных пищевого состава — как государственные (напр., USDA FoodData Central), так и коммерческие. Обнаруженные ограничения традиционных баз (фрагментарность, устаревание, редкая актуализация) побудили к разработке новых ресурсов. В качестве иллюстрации — UMDFood-90k, представленный в 2023 году. Это не просто таблица с питательными значениями: в нее включены изображения упаковок, расшифровка ингредиентов, а местами — и химический анализ. В каком-то смысле — почти «цифровой двойник» потребительского продукта [7]. Почти 90 тысяч наименований, если верить авторам. Материал внушительный — и, судя по цитируемости, востребованный. Именно на таких массивах, как UMDFood, сегодня обучаются модели, способные оценивать состав блюда, даже если перед ними не формула, а фото из кафе.

Не менее значимы сенсорные и физиологические данные. Персональные трекеры активности, умные браслеты, неинвазивные глюкомониторы (CGM), умные весы — все это предоставляет высококачественную информацию о физиологическом состоянии пользователя.

В отдельную категорию выделены данные, поступающие от пользователей через приложения для отслеживания питания. Среди популярных инструментов — тот же Cronometer или MyFitnessPal. Некоторые пользователи предпочитают вносить все вручную, другие — полагаются на камеру: сфотографировал тарелку — и система уже распознала, что там было. Дополнительно рассматриваются биомедицинские параметры — биохимические анализы, микробиота, генетические тесты. Некоторые системы (напр., Viome, Eubiosis) включают микробиологический профиль кишечника в алгоритм формирования диет, опираясь на все более обоснованные взаимосвязи между микрофлорой, метаболизмом и пищевой чувствительностью.

Контекстуальные факторы — режим сна, уровень стресса, пищевые предпочтения и ограничения — также оказываются значимыми. Такие параметры — вроде уровня стресса, нарушений сна или просто измененного режима из-за переезда — часто оказываются критичными. Игнорировать их — значит предложить универсальный совет, к которому человек в реальности вряд ли прислушается.

Оценка эффективности систем производится на двух уровнях. Первый — технический: применяются традиционные метрики машинного обучения (ML) (Accuracy, F1-score, AUROC и др.) в задачах классификации, регрессии и прогнозирования. Выбор метрики зависит от типа задачи и структуры данных; универсального решения не выявлено. Второй уровень — прикладной: оценивается влияние рекомендаций на состояние здоровья и поведение пользователей. Рандомизированные исследования сравнивают ИИ-поддерживаемые диеты с контрольными, измеряя такие параметры, как гликемический профиль, липидный статус, масса тела, субъективное самочувствие. Немаловажны и показатели соблюдения рекомендаций, а также субъективная удовлетворенность пользователей. Вопрос доверия к системе и объяснимости ее работы остается критически важным: наличие интерпретируемых объяснений способствует устойчивости к отказу от следования рекомендациям.

Используемый статистический аппарат — от вполне ожидаемых t-тестов до GRADE-методологии — скорее подтверждает общую строгость подхода, хотя и не дает ощущения радикальной новизны. В разделе, посвященном результатам, приведены как метрики точности, так и конкретные изменения в показателях здоровья.

Результаты и их обсуждение

Современные ИИ-системы персонализированного питания строятся на модульной архитектуре: от сбора и анализа данных о рационе до формирования рекомендаций. Базовые решения включают мобильные приложения с ML-моделями, позволяющими, например, по фото еды оценить отклонения от нормы. В новых разработках все чаще появляются решения, сочетающие языковые модели, визуально-текстовый анализ и персонализированные симуляции организма.

Так, в архитектуре ChatDiet ключевую роль играет модуль-координатор, выстраивающий взаимодействие между персонализированными данными, общими диетологическими принципами и языковой моделью, формирующей рекомендации [9]. Подобный подход снижает ошибки, обеспечивает персонализацию и сохраняет интерактивность. В системах типа UMDFood-VL визуальная информация и текст о составе продуктов анализируются совместно, что позволяет достовернее оценивать нутриентный профиль.

Наблюдается сдвиг в сторону композитных архитектур: IoT-устройства, сенсоры, базы данных и модели работают синхронно. Цифровой двойник позволяет спрогнозировать реакцию организма на пищу, а предварительные расчеты проводятся офлайн. Онлайн-часть — диалог и рекомендации — реализуется через LLM под контролем оркестратора.

Алгоритмически применяются CNN, трансформеры, LSTM, методы оптимизации (fuzzy АНР, эволюционные алгоритмы), а также подходы на основе кластеризации и ассоциаций [10]. В числе применений — разбор пищевых дневников, генерация рационов с учетом индивидуальных ограничений и предпочтений, а также адаптация моделей на базе мультиомных показателей (например, гликемии или микробиоты).

Источники знаний варьируются: от USDA до пользовательских анкет и сенсорных потоков. Используются экспертные правила, графы знаний (напр., EICombo), усиливающие интерпретируемость рекомендаций [11].

Оценка эффективности проводится по точности моделей (MAE, precision@k), клиническому влиянию (снижение HbA1c, ИМТ, симптомов СРК), поведенческим изменениям и UX. Успешные системы демонстрируют сочетание высокой аналитической точности и прозрачности, что способствует формированию устойчивых пищевых привычек.

Для лучшего понимания масштабов и направлений развития интеллектуальных систем в области персонализированного питания целесообразно обратиться к конкретным случаям их реализации (см. таблицу). Приведенные кейсы иллюстрируют разнонаправленные подходы — от инициатив, опирающихся на клиническую верификацию, до решений, разрабатываемых в рамках коммерческих цифровых сервисов, нередко находящихся на различных стадиях технологического становления.

Таблица

Примеры интеллектуальных систем персонализированного питания

| Система (год) | Методы ИИ | Источники данных | Основные особенности и результаты |
|-----------------------------|---|---|---|
| ChatDiet (2024) | Языковая модель + причинно-ориентированное ML | Данные с трекеров, дневники питания, справочные базы | Диалоговые рекомендации с объяснениями; 92% согласованности; улучшение сна на персонализированной диете |
| Viome (2023) | Анализ микробиоты + модели оценки риска | Кал, кровь, анкеты | Снижение симптомов СРК (–39%), депрессии и тревожности (–31%); улучшение метаболизма [12] |
| PPGR-диета (2015–2021) | Ансамбли ML + сенсоры (CGM) | Глюкоза, микробиота, анкеты | Существенное снижение HbA1c, триглицеридов и гликемических скачков по сравнению с контрольной диетой [13] |
| UMDFood-VL (2023) | CV + NLP (Vision-Language, CLIP) | Фото продуктов и списки ингредиентов из большого датасета | AUC до 0.921 по жиру; 82% точность <10% ошибки; обновление пищевых баз |
| Azzimani et al. (2022) [15] | CV (глубина) + DL (многозадачная FCN) | Комбинация визуальных данных и анкетных профилей | Автоматическая оценка блюда; учет аллергий; валидация диетологами; применение в стационарах |

Среди представленных решений — разные по логике и глубине применения ИИ в сфере питания. В ChatDiet основное внимание уделено взаимодействию языковой модели с личными данными, что позволяет реализовать базовый, но объяснимый самоконтроль. Viome и подходы на основе постпрандиальных реакций (PPGR) делают ставку на анализ скрытых физиологических параметров — от

микробиома до индивидуальных гликемических профилей — и в ряде случаев демонстрируют значимые клинические сдвиги [14].

UMDFood-VL работает с другим пластом — качеством баз данных о продуктах, что критично для любых последующих интерпретаций. В системе Azzimani соединены сенсоры и нейросети: задача — измерять съеденное с точностью, недоступной на глаз, что особенно важно, например, для контроля белка или натрия [15].

Есть и другая категория — менее технократическая. Lark, Noom, а также устройства вроде «умных» бутылок или вилок — это уже про повседневность и поведение. Не данные как таковые, а способы их подачи и мягкого вмешательства: напоминание, фиксация, подсказка.

Иногда достаточно обнаружить устойчивую связку: сладкий напиток — каждый перекус. Или кофе вечером — проблемы со сном. Именно такие «мелочи» ускользают, а система фиксирует. Она не диктует, но показывает, где точка перегиба. В этом и ценность: не в замене суждения, а в его расширении — пока не поздно.

Заключение

ИИ-системы позволяют выявлять скрытые дисбалансы в рационе — например, регулярное превышение допустимых уровней соли, сахара или трансжиров, которое зачастую остается незамеченным без внешнего анализа. Анализ, основанный на совмещении визуальных, текстовых и сенсорных источников, обеспечивает более достоверную реконструкцию рациона, приближая выводы моделей к уровню экспертного заключения. Это дает возможность отслеживать питание без необходимости ручного ввода.

Диалоговые интерфейсы делают систему более «человекоподобной»: рекомендации становятся прозрачнее, а пользователь вовлекается в процесс. Масштабируемость и способность к обучению на новых данных расширяют охват без ущерба качеству.

Тем не менее сохраняется ряд нерешенных задач. Оценка действенности подобных решений требует длительного эмпирического наблюдения: важно не столько зафиксировать первоначальный отклик, сколько проследить, формируются ли стабильные и воспроизводимые поведенческие изменения. Интеграция с клинической практикой предъявляет требования к совместимости, защищенности данных и объяснимости алгоритмов. Вопрос этической устойчивости остается принципиальным: при обучении на узких или социально однородных массивах данных алгоритмы нередко закрепляют уже существующие смещения. Это, в свою очередь, снижает релевантность рекомендаций для тех групп, чьи особенности изначально были слабо представлены — по возрасту, культурному контексту или уровню доступа к технологиям.

Снижение нагрузки на пользователя — необходимое условие: чем незаметнее процесс сбора данных (например, через фото или сенсоры), тем выше вероятность устойчивого использования. При этом точность рекомендаций должна строго контролироваться: даже редкие ошибки способны серьезно подорвать доверие.

Вектор развития постепенно смещается от задач контроля веса к более комплексным целям — улучшению когнитивного состояния, иммунной устойчивости, снижению долгосрочных рисков. Для этого необходимо связывать питание с биомаркерами и иными физиологическими показателями.

В целом ИИ в диетологии — не альтернатива специалисту, а инструмент дополнения. Он структурирует рутину, снижает вероятность субъективных искажений и позволяет взглянуть на собственное питание без иллюзий. Особенно это значимо в условиях избыточного потребления скрытых добавок и утраты пищевой осознанности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Limit Fat, Salt, and Sugar Intake. *World Health Organization, Eastern Mediterranean Region*. Режим доступа: <https://www.emro.who.int/nutrition/reduce-fat-salt-and-sugar-intake/>.
2. Huang L., Li J., Zhang Y., Chen X. The Role of Artificial Intelligence in Obesity Risk Prediction and Management: Approaches, Insights, and Recommendations. *Medicina*. 2025;61(2):358. DOI: 10.3390/medicina61020358.

3. Theodore Armand T. P., Nfor K. A., Kim J-I., Kim H.-C. Applications of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Nutrition: A Systematic Review. *Nutrients*. 2024;16(7):1073. DOI: 10.3390/nu16071073.
4. Agrawal K., Goktas P., Kumar N., Leung M.-F. Artificial Intelligence in Personalized Nutrition and Food Manufacturing: A Comprehensive Review of Methods, Applications, and Future Directions. *Frontiers in Nutrition*. 2025;12. DOI: 10.3389/fnut.2025.1636980.
5. Yang Z., Khatibi E., Nagesh N., Abbasian M., Azimi I., Jain R., Rahmani A. *ChatDiet: Empowering Personalized Nutrition-Oriented Food Recommender Chatbots through an LLM-Augmented Framework*. arXiv:2403.00781. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.00781>.
6. Lee D.-S., Kwon S.-K. Amount Estimation Method for Food Intake Based on Color and Depth Images through Deep Learning. *Sensors*. 2024;24(7):2044. DOI: 10.3390/s24072044.
7. Ma P., Wu Y., Yu N., Zhang Y., Backes M., Wang Q., Wei C.-I. *UMDFood: Vision-Language Models Boost Food Composition Compilation*. arXiv:2306.01747. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.01747.
8. Arefeen A., Fessler S., Mostafavi S. M., Johnston C. S., Ghasemzadeh H. *MealMeter: Using Multimodal Sensing and Machine Learning for Automatically Estimating Nutrition Intake*. arXiv:2503.11683. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.11683>.
9. Yang Z., Khatibi E., Nagesh N., Abbasian M., Azimi I., Jain R., Rahmani A. M. *ChatDiet: Empowering Personalized Nutrition-Oriented Food Recommender Chatbots through an LLM-Augmented Framework*. arXiv:2403.00781. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.00781>.
10. Rao S., Neethirajan S. Computational Architectures for Precision Dairy Nutrition Digital Twins: A Technical Review and Implementation Framework. *Sensors*. 2025;25(16):4899. DOI: 10.3390/s25164899.
11. Xu Z., Gu Y., Xu X., Topaz M., Guo Z., Kang H., Sun L., Li J. Developing a Personalized Meal Recommendation System for Chinese Older Adults: Observational Cohort Study. *JMIR Formative Research*. 2024;8:e52170. DOI: 10.2196/52170.
12. Tunali V., Arslan N. Ç., Ermiş B. H. et al. A Multicenter Randomized Controlled Trial of Microbiome-Based Artificial Intelligence-Assisted Personalized Diet vs Low-Fermentable Oligosaccharides, Disaccharides, Monosaccharides, and Polyols Diet: A Novel Approach for the Management of Irritable Bowel Syndrome. *The American Journal of Gastroenterology*. 2024;119(9):1901–1912. DOI: 10.14309/ajg.0000000000002862.
13. Tay J., Thompson C. H., Luscombe-Marsh N. D., Wycherley T. P., Noakes M., Buckley J. D., Wittert G. A., Yancy W. S. Jr., Brinkworth G. D. Effects of an Energy-Restricted Low-Carbohydrate, High Unsaturated Fat/Low Saturated Fat Diet Versus a High-Carbohydrate, Low-Fat Diet in Type 2 Diabetes: A 2-Year Randomized Clinical Trial. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2018;20(4):858–871. DOI: 10.1111/dom.13164.
14. Tily H., Partridge E., Cai Y., et al. Gut Microbiome Activity Contributes to Prediction of Individual Variation in Glycemic Response in Adults. *Diabetes Therapy*. 2022;13(1):89–111. DOI: 10.1007/s13300-021-01174-z. Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC8776936>.
15. Azzimani K., Bihri H., Dahmi A., Azzouzi S. An AI-Based Approach for Personalized Nutrition and Food Menu Planning. *Proc. of 2022 IEEE 3rd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*. Fez, Morocco, 2022:1–5. DOI: 10.1109/ICECOCS55148.2022.9983099.

АЛГОРИТМ СВЕРТКИ 2D ОБЪЕКТОВ В ИНВАРИАНТНЫЙ И ВЕРОЯТНОСТНЫЙ «ГЕНЕТИЧЕСКИЙ КОД»

Р. Ф. Хаматнуров^{1,a}, Т. В. Гавриленко^{1,2,b}

¹ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4239-8720>, ✉ ruslan.khamatnuroff@yandex.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Аннотация: в статье представлен авторский алгоритм свертки двумерных объектов (изображений) в компактный, линейный и вероятностный «генетический код», основанный на биологических механизмах хранения и передачи наследственной информации. Представленный подход имитирует процессы клеточного деления, дифференциации и мутаций, рассматривая пиксель двумерного изображения как условную клетку, а его цвет — как тип клетки. Алгоритм реализует вероятностный обход изображения с использованием случайного выбора направления, что обеспечивает инвариантность к порядку обработки и моделирует стохастичность биологических систем. Каждый элемент кодируется в виде правила, содержащего идентификатор цвета, ссылки на соседние элементы и специальные маркеры для обозначения тупиковых состояний. Представлен метод оптимизации за счет отсечения нулевых значений, перехода к относительным ссылкам и фиксации длины строк для эффективного доступа. В алгоритм введены два типа мутаций: параметрические (изменение цвета) и привнесенные (нарушение топологии), позволяющие моделировать эволюцию структуры. Результатом работы алгоритма является текстовый файл, содержащий правила деления, палитру цветов и метаинформацию, достаточные для точного воспроизведения исходного объекта. Эксперименты на изображениях различной сложности подтвердили корректность свертки и возможность моделирования мутаций. Разработанный метод открывает перспективы для применения в биоинформатике, робототехнике и адаптивных системах, включая создание самоорганизующихся и самовоспроизводящихся структур.

Ключевые слова: алгоритм свертки, изображения, генетический код, мутации.

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: Хаматнуров Р. Ф., Гавриленко Т. В. Алгоритм свертки 2D объектов в инвариантный и вероятностный «генетический код». *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):112–122.

Поступила в редакцию: 03.08.2025.

В окончательном варианте: 09.09.2025.

CONVOLUTION OF 2D OBJECTS INTO AN INVARIANT AND PROBABILISTIC “GENETIC CODE”

R. F. Khamatnurov^{1,a}, T. V. Gavrilenko^{1,2,b}

¹ Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4239-8720>, ✉ ruslan.khamatnuroff@yandex.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Abstract: we developed an algorithm for convolving two-dimensional images into a compact, linear, and probabilistic “genetic code” inspired by biological mechanisms of storing and transmitting hereditary information. Our approach simulated processes of cell division, differentiation, and mutation by treating each pixel of a two-dimensional image as a conditional cell and its color as a cell type. The algorithm implemented a probabilistic image traversal with random direction selection, which ensured invariance to processing order and reproduced the stochasticity of biological systems. Each element was encoded as a rule containing a color identifier, links to neighboring elements, and special markers indicating dead ends.

We proposed an optimization method that removed zero values, switched to relative links, and fixed string length to improve access efficiency. We also introduced two types of mutations: parametric (color changes) and structural (topology violations), which allowed us to model structural evolution. The algorithm produced a text file containing division rules, a color palette, and meta-information sufficient to reconstruct the original image. Experiments with images of varying complexity confirmed the correctness of the convolution and demonstrated the possibility of modeling mutations. This method creates prospects for applications in bioinformatics, robotics, and adaptive systems, including the development of self-organizing and self-reproducing structures.

Keywords: convolution algorithm, images, genetic code, mutations.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Khamatnurov R. F., Gavrilenko T. V. Convolution of 2D Objects into an Invariant and Probabilistic “Genetic Code”. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):112–122.

Original article submitted: 03.08.2025.

Revision submitted: 09.09.2025.

Современные исследования в области вычислительных систем все чаще опираются на междисциплинарные подходы, сочетающие идеи биологии, кибернетики и информатики. Биологические системы обладают уникальными механизмами хранения, передачи и воспроизведения информации, которые обеспечивают формирование сложных топологических структур и их эволюцию. Одним из наиболее показательных примеров является молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), содержащая наследственный код организма. Благодаря процессу репликации и деления клеток информация передается с высокой точностью, при этом допускаются незначительные отклонения, что обуславливает появление мутаций и биологическое разнообразие.

Особый интерес вызывает механизм, обеспечивающий из ограниченного набора элементарных правил в живых организмах воспроизведение сложных форм и функций. ДНК представляет собой систему инструкций, задающих правила построения организма. Клетка хранит полный набор этих данных и передает их при делении, что обеспечивает точное воспроизведение топологии (рис. 1).

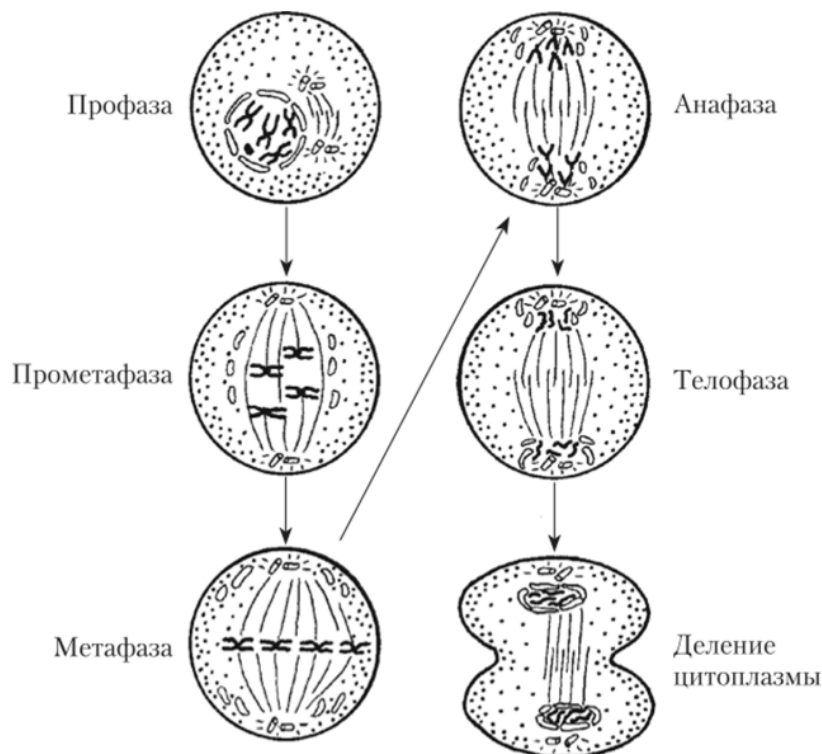


Рис. 1. Деление клетки [1]

В процессе деления клетки генетическая информация полностью копируется и передается дочерним клеткам, что обеспечивает развитие организма и передачу наследственных признаков [2]. Одной из ключевых особенностей является воспроизведение заданной топологии, по мере формирования которой организм приобретает функциональные характеристики. Структура распределения клеток определяет взаимосвязи между элементами, обеспечивая форму, координацию и возможности организма. В качестве примера можно рассмотреть развитие насекомых. Так, оса формируется из одной клетки путем последовательных делений, что приводит к появлению целостного организма с характерными морфологическими и функциональными признаками, включая способность к полету и ориентации в пространстве, которую она приобретает сразу после окончания формирования конечной топологии. Стадии развития осы представлены на рис. 2.



Рис. 2. Стадии формирования тела осы [3]

Подобный подход может быть использован в моделировании данных, где возникает необходимость эффективного кодирования и восстановления сложных структур.

В исследовании рассматривалась возможность построения универсальных алгоритмов кодирования информации, позволяющих кодировать исходные 2D и 3D объекты в компактный, линейный набор правил, аналогичных «генетическому коду». Такой подход открывает возможности для исследования следующих процессов:

- имитация биологических процессов (деление клеток, наследование, мутации);
- создание адаптивных самоорганизующихся систем;
- разработка методов эффективного кодирования и передачи информации;
- моделирование робототехнических комплексов, способных воспроизводить и при необходимости изменять структуру и топологию в зависимости от задачи.

Биологические системы обладают уникальной способностью к воспроизведению и саморегуляции, одним из ключевых процессов является деление клетки, в ходе которого наследственная информация копируется и передается дочерним клеткам. Этот процесс обеспечивает сохранение общей структуры и топологии организма и одновременно допускает возможность появления незначительных изменений.

В основе наследования лежит молекула ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), представляющая собой двухцепочечную спираль, образованную нуклеотидами. Каждая цепь формируется последовательностью азотистых оснований: аденина (А), тимина (Т), гуанина (G) и цитозина (С) (рис. 3). Благодаря принципу комплементарности (А–Т и G–С) обеспечивается точное копирование информации при репликации. Последовательность нуклеотидов задает структуру белков, которые, в свою очередь, определяют структуру, топологию и функции каждой отдельной клетки.

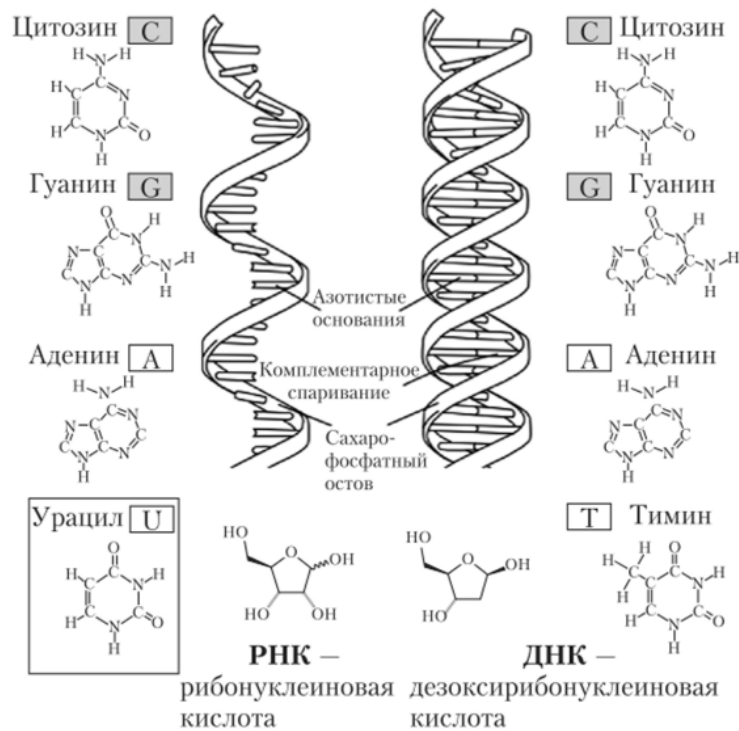


Рис. 3. Структура ДНК [4]

Мутации играют особую роль в формировании разнообразия живых систем. Их можно разделить на:

- параметрические — небольшие изменения, не нарушающие целостность структуры (например, вариации в окраске, форме или размере);
- привнесенные — затрагивающие топологию организма (например, перестройки хромосом или аномалии развития органов).

С точки зрения моделирования данные биологические механизмы можно интерпретировать как алгоритмы свертки и развертки информации. Каждая клетка хранит полный набор правил, необходимых для воспроизведения организма. Деление клетки соответствует процессу копирования правил и передачи их новым элементам системы. Мутации вносят вероятностные изменения, обеспечивая вариативность и возможность адаптации [5].

В контексте вычислительных систем в качестве аналога клетки будем рассматривать агента. Совокупность агентов образует мультиагентную систему, где каждый элемент выполняет локальные действия, но в совокупности они формируют сложную структуру. Таким образом, в разработанной модели:

- агент — условная клетка;
- правило — условный ген;
- обход объекта — процесс деления и дифференцирования клеток;
- мутация — вариация в наборе правил.

Предложенный алгоритм основан на имитации биологических принципов наследования информации и построения топологии организма. В качестве модели организма и исходных данных используется двумерное изображение в формате BMP. При этом каждый элемент изображения рассматривается как условная клетка, а цвет элемента — как тип клетки (по аналогии с дифференциацией). Первоначально был разработан алгоритм, позволяющий преобразовать исходный объект в набор правил, аналогичных «генетическому коду», обеспечивающий возможность в дальнейшем воспроизведения исходной формы и внесения мутаций.

Алгоритм обхода изображений

Обход изображения реализован по вероятностному принципу. На каждом шаге выбирается случайное направление движения (вверх, вниз, влево, вправо). Такой подход обеспечивает вариативность

структуры выходного кода и моделирует стохастический характер наследования в биологических системах.

В процессе обхода выполняются следующие шаги:

1. Определение текущего элемента (пикселя).
2. Считывание его характеристик (цвет, положение, соседи).
3. Формирование правила и его запись в промежуточную структуру.
4. Перемешивание массива направлений и переход к следующему элементу.
5. Реализация мутаций.

В самом начале имеется массив с возможными ходами: вверх, вниз, влево и вправо. За один проход цикла может обработаться до 4 пикселей. Перед каждой итерацией цикла данный массив перемешивается, и таким образом порядок обхода меняется. Более подробно алгоритм представлен на блок-схеме ниже (рис. 4). На вход методу подается матрица, заполненная нулями, размером, равным размеру входного изображения. Из стартовой точки начинается формирование пути. На выходе мы получим массив, который будет содержать сформированный путь. В самом методе присутствует массив, содержащий направления обхода, и перед каждой итерацией он перемешивается, чтобы обходить изображения каждый раз по-разному.

После сформированного пути начинается обход для считывания цвета пикселя и формирования правила. На данном этапе проявляются мутации.

На вход методу формирования правил подается пустая матрица размером, равным размерам изображения, точка, с которой начинается обход изображения, путь до обрабатываемого изображения, матрица, содержащая обход изображения, путь до выгрузки набора правил, переменная, которая участвует в параметрических мутациях, и переменная, участвующая в привнесенных мутациях. По умолчанию последние две переменные отключены. В этом методе сначала формируется дерево обхода, далее по этому дереву идет считывание цвета пикселя и запись его в массив цветов. Если переменная, которая отвечает за параметрическую мутацию, не равна 0, то идет поиск наиболее близкого по значению цвета; если он находится, то найденный только что цвет будет заменен на существующий.

Формат формируемых правил

Каждый элемент изображения (например, пиксель) рассматривается как элементарная клетка, для которой формируется правило. Правило включает:

- идентификатор цвета (код, полученный из значений RGB или их преобразованной формы);
- ссылки на соседние элементы (сверху, снизу, слева, справа);
- указатели на тупиковые индексы, обозначающие отсутствие потомков;
- возможность внесения мутаций (изменение цвета или нарушение топологии).

Формат правил: `color_id up_id right_id down_id left_id`.

Первоначальная версия хранила цвета в формате ARGB — alpha, red, green and blue. Т. е. красный цвет обозначался как «255 255 0 0». Но далее было принято решение данные значения переводить с помощью математических функций в кодировку, состоящую из 4 символов. Теперь красный цвет обозначается как «7Rwk».

Сам формат правил также претерпел изменения, и финальный вариант формируется так:

1. Отсечение неиспользуемых нулей:

$$\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 3 & \rightarrow 1 & 0 & 2 & 0 & 3 \\ 1 & 0 & 10 & 0 & 0 & 1 & 0 & 10 \end{array}$$

2. Замена абсолютных ссылок на относительные:

$$\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 3 & \rightarrow 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

3. Тупиковые индексы. Теперь, если правило ссылается на другое правило, которое содержит лишь информацию о цвете пикселя, то эта ссылка указывается после специального символа «#». Например, «1 #3 #2 #4 1»: число «3» после знака «#» говорит о том, что пиксель над этим правилом будет содержать информацию лишь о своем цвете, и не будет передавать информацию соседним пикселям.

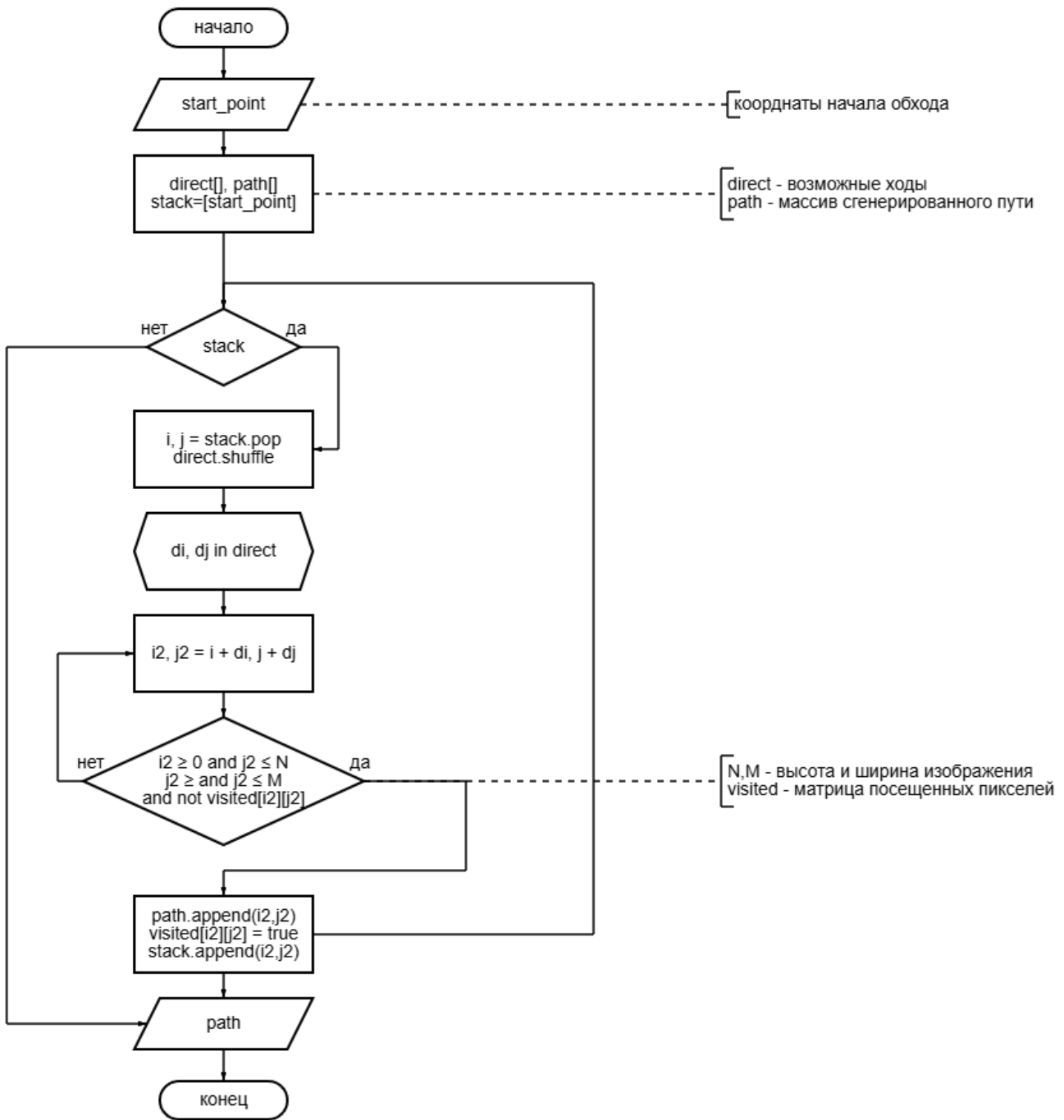


Рис. 4. Блок-схема алгоритма обхода изображения

4. Для ускорения обработки правила фиксируются в строках одинаковой длины, что позволяет обращаться к элементам по смещению, подобно работе с массивами в языках программирования.

В алгоритме предусмотрены два типа мутаций:

- параметрические мутации — при совпадении или близости цветовых значений используется округление к уже существующему цвету, что имитирует незначительные изменения (например, оттенок кожи или глаз) (рис. 5);
- привнесенные мутации — часть информации о соседях может быть намеренно потеряна, что приводит к деформации топологии объекта (например, отсутствие фрагмента изображения или удвоение элемента) (рис. 6).

Результатом работы алгоритма для изображения, представленного на рисунке 7, является текстовый файл (рис. 8) фиксированного формата, который содержит:

- блок правил деления;



Рис. 5. Пример работы алгоритма с параметрическими мутациями

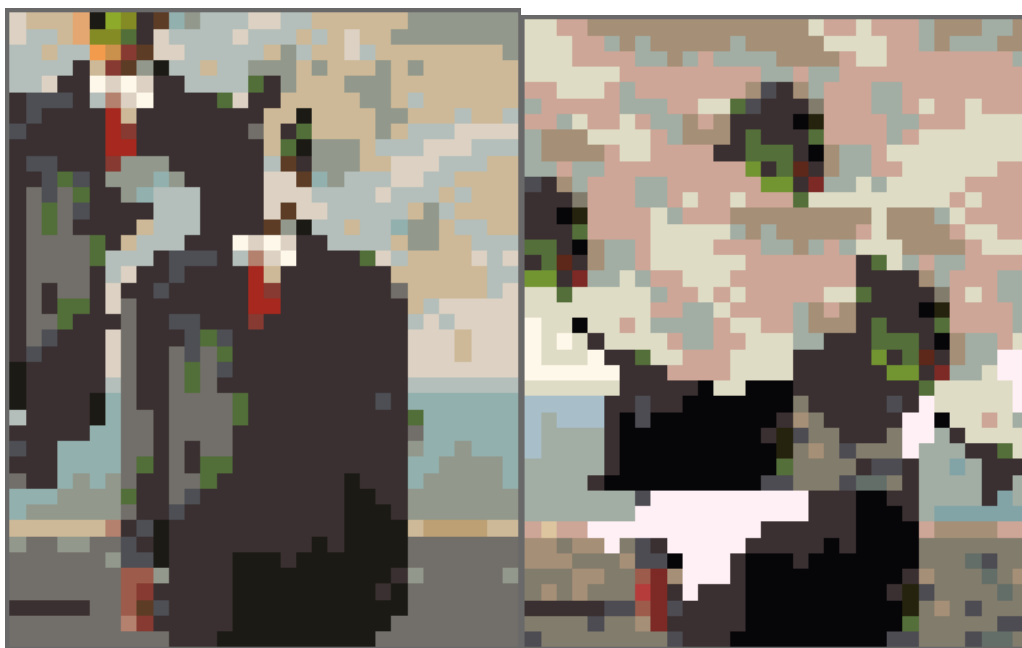


Рис. 6. Пример работы алгоритма с привнесенными мутациями

- блок правил цветов;
- служебную строку с метаинформацией (размеры изображения, координаты начальной точки, длина правила, количество записей).

Первоначально в выходной файл помещаются правила деления (строки до первого троеточия). Они записываются подряд. При этом перед записью первого правила в системе находится самое длинное правило. И его длина становится фиксированной длиной для всех правил. Поэтому, если длина следующего правила меньше, чем фиксированная после него, запишется столько пустых символов, сколько необходимо для достижения фиксированной длины.

После правил деления записываются значения цветов (строки между первым и вторым троеточием).

В последней строке записывается строка вида «@1#2#3#4#5#6». Где знак «@» обозначает конец правил цвета, числа «1» и «2» обозначают ширину и длину обработанного изображения соответ-



Рис. 7. Пример изображения, по которому сформирован выходной файл, представленный на рисунке 8

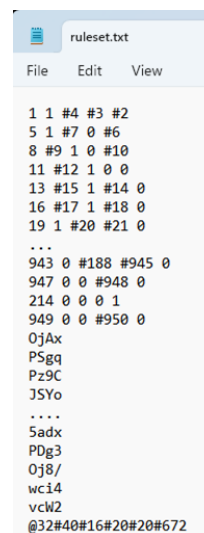


Рис. 8. Пример сформированного файла с правилами

ственно. Числа «3» и «4» обозначают координаты X и Y соответственно, где должно воспроизвестись первое правило. «5» — фиксированная длина правила, чтобы система могла сразу сослаться на другие правила посредством расчетов. «6» — обозначает количество правил деления, чтобы отделить правила деления от правил цветов.

Алгоритм был протестирован на ряде изображений. При обработке картин и орнаментов наблюдались различные проявления мутаций. Параметрические мутации приводили к появлению дополнительных оттенков, а привнесенные — к изменению топологии изображения. На примере портрета удалось продемонстрировать потерю фрагментов лица при привнесенных мутациях, что иллюстрирует аналогию с биологическими сбоями в процессе деления клеток. Примеры представлены на рисунках 9–13.

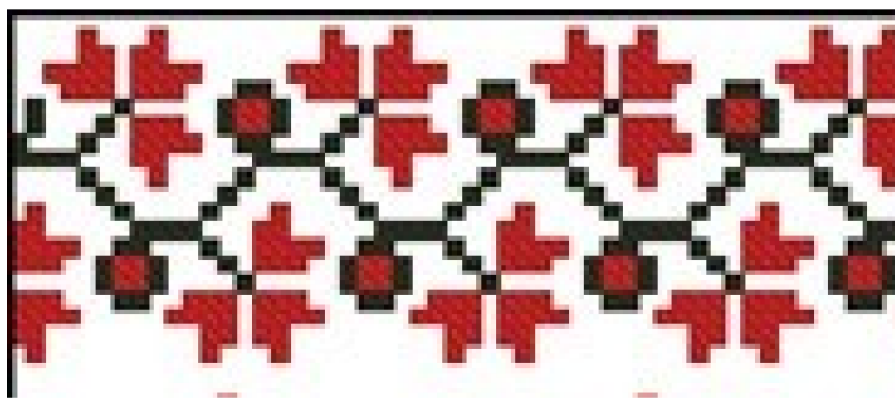


Рис. 9. Исходное изображение орнамента

В качестве исходных данных использовались изображения небольшого разрешения (20×20, 32×40 и 184×80 пикселей), что позволило проанализировать эффективность работы алгоритма и характер возникающих мутаций.

На простых тестовых изображениях система корректно формировала набор правил, число которых находилось в пределах сотен строк. Например, для изображения размером 20×20 пикселей было получено 212 правил деления и 2 правила цвета. При воспроизведении выходного файла объект полностью совпадал с исходным, что подтверждает правильность работы алгоритма при инвариантной свертке (рис. 14–15).



Рис. 10. Изображение орнамента с параметрическими мутациями



Рис. 11. Изображение орнамента с привнесенными мутациями

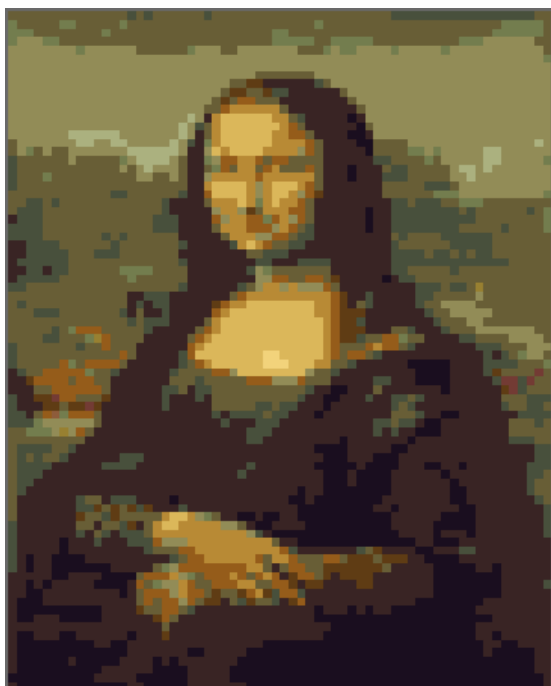


Рис. 12. Исходное изображение портрета

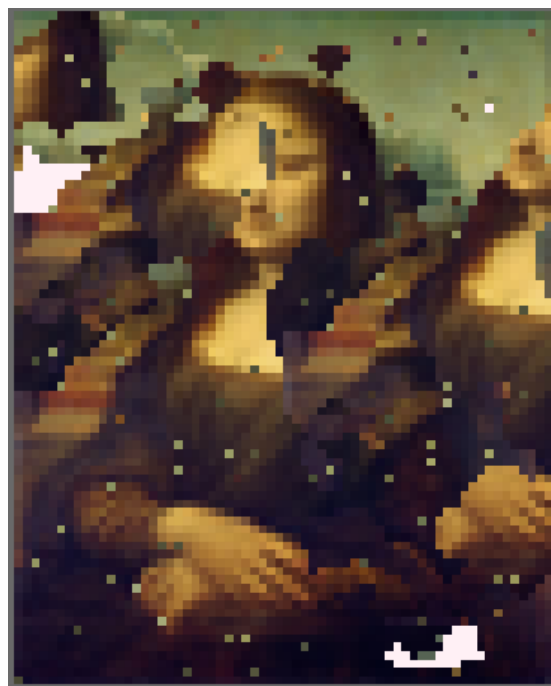


Рис. 13. Изображение портрета с привнесенными мутациями

Заключение

Предложенный подход позволяет не только сохранять и воспроизводить исходные объекты, но и моделировать их эволюцию через мутации. Это делает систему перспективной для использования в

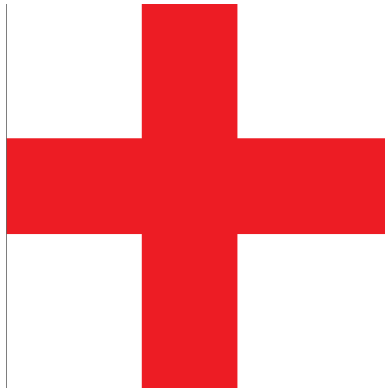


Рис. 14. Исходное изображение

```

1 #1 #1 #1 1 1 0 0 1 #1 1 #1 0 0 1 2 0 #2 1 0 2 0 0 1 #2 2 0 0 0 1
1 #1 0 #1 1 1 0 0 1 #1 1 #1 0 0 1 2 0 #2 #2 1 2 0 0 #2 1 2 2 0 0 1
1 1 0 #1 #1 1 0 1 #2 #1 1 #1 0 0 1 2 0 0 1 0 2 0 0 1 #2 2 0 0 0 2
1 1 0 0 #1 1 0 1 #2 0 1 #1 0 1 #1 2 0 0 1 0 2 0 0 1 #2 2 0 0 0 #2
1 1 #1 0 #1 1 1 #1 #2 0 1 0 0 0 1 2 0 #2 1 0 2 0 1 #2 #2 2 0 0 #2 1
1 1 #1 0 #1 1 0 1 0 0 1 0 0 #1 1 2 0 #2 1 0 2 0 #2 1 0 2 0 0 #2 1
1 1 #1 0 #1 1 #1 1 0 0 1 #1 0 1 #1 2 0 #2 1 #2 2 0 #2 1 0 2 0 0 2 1
1 1 #1 0 #1 1 #1 1 #1 0 1 0 0 0 1 1 0 1 #1 #1 2 0 1 0 2 2 #2 0 0 0
1 #1 #1 0 1 1 1 0 2 0 1 0 0 2 1 1 0 1 0 0 2 0 49 0 0 2 0 0 #2 1
1 1 0 0 #2 1 156 0 0 0 1 3 0 0 0 1 1 0 0 0 2 0 0 0 1 2 0 0 1 0 2 #2 1 0 2
1 1 0 0 #2 1 0 1 #2 0 1 0 0 0 1 2 1 #2 0 0 2 #2 0 0 1 2 0 0 1 0 2 0 6 0 0
1 #1 #1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0 #1 2 #2 1 0 0 2 #2 0 0 1 2 0 #2 1 0 2 1 0 0 #2
2 1 0 0 #2 1 0 1 #1 0 1 #1 0 0 1 2 1 #2 0 0 2 1 0 0 #1 2 0 1 #2 0 2 1 0 0 0
2 #2 0 0 1 1 0 #1 1 0 1 1 0 0 2 1 #2 0 0 2 1 0 0 #1 2 0 1 #2 0 2 #2 1 0 0
2 #2 0 0 1 1 0 1 #1 0 1 #1 0 0 1 2 1 #2 0 #2 2 #2 1 0 2 2 2 0 1 0 2 0 1 0 0
2 1 0 #2 #2 1 0 #1 1 0 1 1 0 0 0 2 #2 1 0 0 2 40 0 0 0 2 0 #2 2 0 2 0 0 #2 0
2 0 0 0 1 1 0 1 #1 0 1 1 0 0 0 2 #2 1 0 0 1 #1 0 0 1 2 #2 0 0 0 2 0 0 #2 0
2 0 0 0 1 1 0 1 #1 0 1 #1 0 0 1 1 #1 0 0 2 #2 1 2 0 1 #1 0 #1 1 2 0 #2 0 1 7Rwk
2 0 0 #2 1 1 1 #2 #1 0 1 #1 1 0 0 2 7 0 0 0 1 #1 0 1 #1 2 0 0 0 #2 ///
2 0 0 #2 1 1 1 2 0 0 1 1 #2 0 0 2 0 #2 1 0 1 0 0 1 #1 1 0 1 #1 0 @20#20#10#10#13#212
2 0 0 1 0 1 0 0 0 #1 1 1 #2 0 0 2 0 1 #2 0 1 0 #1 0 1 1 #1 0 0 0
2 0 0 1 0 2 #2 1 0 0 1 1 #2 0 #1 2 0 0 1 0 1 0 0 1 2 1 0 0 0
2 0 1 #2 0 2 #2 1 #2 0 1 1 #2 0 #1 2 0 0 1 0 1 #1 0 0 1 2 0 0 0 #2
2 0 #2 1 0 2 1 #2 #2 0 1 #1 1 0 2 2 0 0 0 1 2 #2 0 0 1 2 #2 1 0 0
2 0 #2 1 0 2 #1 1 0 0 2 7 #2 0 0 2 0 0 0 #2 2 1 0 0 #2 2 1 0 0 0
2 0 #2 #2 1 2 #1 1 0 0 1 2 0 0 1 2 1 0 0 0 2 1 0 0 #2 2 1 0 0 0
2 0 0 1 0 2 #1 1 #2 0 1 0 0 4 0 2 0 0 0 1 2 #2 #2 0 1 2 1 0 0 #2
2 0 0 1 0 2 1 #2 #2 0 1 0 0 0 1 2 0 0 0 1 2 1 0 0 #2 2 #2 0 0 1
2 0 #2 1 0 1 1 #1 0 0 1 0 0 0 1 2 0 0 0 #2 2 1 0 0 #2 2 0 0 0 #2
1 0 1 #1 0 1 #1 1 0 #1 1 0 0 #1 #1 2 0 0 1 0 2 #2 1 0 #2 1 #1 0 0 1
1 0 1 #1 0 1 #1 1 0 0 1 0 0 #1 0 2 0 0 #2 1 2 #2 1 0 0 1 #1 0 0 1
1 #2 #1 1 0 1 2 0 1 0 2 0 1 0 0 2 0 0 1 0 2 2 #1 1 0 1 1 0 0 0
1 0 #1 1 0 1 0 0 65 0 2 0 1 0 0 2 0 0 #2 1 2 0 21 0 0 1 1 0 0 0
1 0 #1 #1 1 1 1 0 0 0 2 0 #2 1 0 2 0 0 #2 1 2 1 #1 0 0 2 1 #2 0 #2

```

Рис. 15. Сформированные правила по изображению на рисунке 14

биоинформатике (имитация процессов наследования и мутаций), робототехнике (самоорганизующиеся структуры), а также в адаптивных вычислительных системах.

Ограничением текущей версии является работа с простой геометрией и ограниченным набором параметров. Перспективы дальнейшего развития включают поддержку сложных 3D форм, оптимизацию параметров правил и учет функционала сворачиваемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев И. Ю. *Нервная система: анатомия, физиология, нейрофармакология*. М.: Юрайт; 2020. 373 с.
2. Огурцов А. Н. *Основы биоинформатики: учебное пособие*. Харьков: НТУ «ХПИ»; 2013. 400 с.

3. Матка осы — как выглядит. *7Ogorod — интернет-энциклопедия о сельском хозяйстве*. Режим доступа: <https://7ogorod.ru/prochee/matka-osy.html>.
4. Acidum ribonucleicum. *Википедия — научная энциклопедия*. Режим доступа: https://la.wikipedia.org/wiki/Acidum_ribonucleicum.
5. Бессмертный И. А., Нугуманова А. Б., Платонов А. В. *Интеллектуальные системы: учебник*. М.: Юрайт; 2017. 250 с.
6. Советов Б. Я., Яковлев С. А. *Моделирование систем*. М.: Юрайт; 2011. 343 с.
7. Коваленко В. В. *Проектирование информационных систем*. М.: Форум; 2012. 320 с.
8. Дезоксирибонуклеиновая кислота. Общие сведения. *Propionix — пищевые технологии и биопродукты*. Режим доступа: <https://propionix.ru/dnk-prokariot-i-eukariot>.

О ПРЕДСТАВЛЕНИИ КУЛОНОВСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ВИДЕ СУПЕРПОЗИЦИИ ФУНКЦИЙ ОДНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ И СЛОЖЕНИЯ

А. Д. Смородинов

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

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-1844>, ✉ smorodinov.alexandr@yandex.ru

Аннотация: в статье представлена теорема о возможности представления n -мерного потенциального поля в виде суперпозиции функций одной переменной и сложения. Формулируется теорема о сходимости искусственной нейронной сети для математического моделирования динамики частиц примеси в несжимаемой жидкости в поле скоростей, являющемся точным решением уравнения Эйлера.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, теорема о сходимости, математическое моделирование, уравнение Эйлера.

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: Смородинов А. Д. О представлении кулоновского потенциала в виде суперпозиции функций одной переменной и сложения. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):123–126.

Поступила в редакцию: 17.08.2025.

В окончательном варианте: 22.09.2025.

REPRESENTATION OF THE COULOMB POTENTIAL AS A SUPERPOSITION OF FUNCTIONS OF ONE VARIABLE AND ADDITION

A. D. Smorodinov

Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre

“Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-1844>, ✉ smorodinov.alexandr@yandex.ru

Abstract: we presented a theorem demonstrating that an n -dimensional potential field can be expressed as a superposition of single-variable functions with addition. We formulated a convergence theorem for an artificial neural network applied to the simulation of impurity particle dynamics in an incompressible fluid under a velocity field that constitutes an exact solution of the Euler equation.

Keywords: artificial neural networks, convergence theorem, simulation, Euler equation.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, 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: Smorodinov A. D. Representation of the Coulomb Potential as a Superposition of Functions of One Variable and Addition. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):123–126.

Original article submitted: 17.08.2025.

Revision submitted: 22.09.2025.

В работе [1] исследовался вопрос о возможности реконструкции местоположения точечных источников потенциального поля кулоновского потенциала. В рамках исследования была разработана искусственная нейронная сеть гидродинамики, которая в точности повторяла потенциальное поле кулоновского потенциала вида (1):

$$\vec{V}(\vec{x}) = \nabla \left(\sum_{i=1}^K \frac{q_i}{\|\vec{x} - M_i\|} \right) \quad (1)$$

являющееся точным решением уравнения Эйлера, где q_i — мощность i -источника, а $M_i(x_i^1, x_i^2, x_i^3)$ — местоположение i -источника. В рамках разработки ИНС было показано, что потенциальное поле (1) может быть представлено в виде суперпозиции функций одной переменной и сложения в виде (2):

$$V_i(x_1, x_2, x_3) = - \sum_{k=1}^K \left[q_k \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left(x_j - M_k^i \right) \right\} + G \left(x_i - M_k^i \right) \right)}{2} - \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left(x_j - M_k^i \right) \right\} \right) + G_2 \left(G \left(x_i - M_k^i \right) \right)}{2} \right], \quad (2)$$

где

$$G_2(x) = x^2 \quad (3)$$

$$G_{-\frac{3}{2}}(x) = x^{-\frac{3}{2}} \quad (4)$$

$$G(x) = x \quad (5)$$

В данной работе покажем, что полученный результат может быть расширен на n -мерные потенциальные поля:

$$\hat{V}(\hat{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)) = \nabla \left(\sum_{i=1}^K \frac{q_i}{\hat{x} - M_i} \right). \quad (6)$$

Для представления в виде суперпозиции функций одной переменной и сложения необходимо использовать функции одной переменной (3), (4), (5) и раскрыть оператор набла, получаем следующую суперпозицию:

$$V_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = - \sum_{k=1}^K \left[q_k \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^n G_2 \left(x_j - M_k^i \right) \right\} + G \left(x_i - M_k^i \right) \right)}{2} - \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^n G_2 \left(x_j - M_k^i \right) \right\} \right) + G_2 \left(G \left(x_i - M_k^i \right) \right)}{2} \right], \quad (7)$$

где $G_2, G, G_{-\frac{3}{2}}$ — функции одной переменной (3), (4), (5).

На основании вышеизложенного справедлива следующая теорема.

Теорема 1. Суперпозиция n -мерных потенциальных полей вида (6) представима в виде суперпозиции функции одной переменной и сложения вида (7).

Замечание 1. Доказательство данной теоремы на случай трех переменных было представлено в работе [1], при конструировании ИНС, для размерности n доказательство получается прямым вычислением производных.

В работе [1] было показано, что метод Рунге–Кутты 4-го порядка точности, используемый для математического моделирования динамики частиц примеси в поле скоростей (1), может быть представлен в виде искусственной нейронной сети и реализован с помощью классических библиотек для конструирования ИНС. В данной работе покажем, что для разработанной ИНС справедлива теорема о сходимости. Для этого вначале представим ИНС, записанную в виде математического выражения:

$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n + \frac{1}{6} h \left(\vec{k}_1^n + 2 \vec{k}_2^n + 2 \vec{k}_3^n + \vec{k}_4^n \right) \quad (8)$$

$$k_{1,i}^n = - \sum_{k=1}^K \left[q_k \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left(x_j^n - M_k^i \right) \right\} + G \left(x_i^n - M_k^i \right) \right)}{2} - \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left(x_j^n - M_k^i \right) \right\} \right) + G_2 \left(G \left(x_i^n - M_k^i \right) \right)}{2} \right] \quad (9)$$

$$k_{2,i}^n = - \sum_{k=1}^K \left[q_k \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left((x_j^n + \frac{h}{2} k_{1,j}^n) - M_k^i \right) \right\} + G \left((x_i^n + \frac{h}{2} k_{1,i}^n) - M_k^i \right) \right)}{2} - \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left((x_j^n + \frac{h}{2} k_{1,j}^n) - M_k^i \right) \right\} \right) + G_2 \left(G \left((x_i^n + \frac{h}{2} k_{1,i}^n) - M_k^i \right) \right)}{2} \right] \quad (10)$$

$$k_{3,i}^n = - \sum_{k=1}^K \left[q_k \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left((x_j^n + \frac{h}{2} k_{2,j}^n) - M_k^i \right) \right\} + G \left((x_i^n + \frac{h}{2} k_{2,i}^n) - M_k^i \right) \right)}{2} - \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left((x_j^n + \frac{h}{2} k_{2,j}^n) - M_k^i \right) \right\} \right) + G_2 \left(G \left((x_i^n + \frac{h}{2} k_{2,i}^n) - M_k^i \right) \right)}{2} \right] \quad (11)$$

$$k_{4,i}^n = - \sum_{k=1}^K \left[q_k \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left((x_j^n + h k_{3,j}^n) - M_k^i \right) \right\} + G \left((x_i^n + h k_{3,i}^n) - M_k^i \right) \right)}{2} - \frac{G_2 \left(G_{-\frac{3}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^3 G_2 \left((x_j^n + h k_{3,j}^n) - M_k^i \right) \right\} \right) + G_2 \left(G \left((x_i^n + h k_{3,i}^n) - M_k^i \right) \right)}{2} \right], \quad (12)$$

где h — шаг по времени, с которым проводится математическое моделирование, \vec{x}_0 — местоположение примеси в начальный момент времени. Индексы у k означают следующее: n — номер итерации, i — компонента поля скорости (1, 2, 3), индексы 1, 2, 3, 4 означают этап вычисления.

Проведем ряд вычислительных экспериментов по математическому моделированию динамики частиц примеси в поле (1), точная постановка задачи представлена в работе [1]. Тестирование алгоритма проводилось следующим образом: рассчитывалась динамика частиц примеси с использованием программного комплекса [2], подробно описанного в [3], и динамика частиц примеси с использованием ИНС, реализованной на основе вычислительного алгоритма (8)–(12) в течение одного и того же шага по времени, количества шагов, а также для частиц с одинаковыми начальным местоположением примеси. После чего вычислялось евклидово расстояние между частицами в конечный момент моделирования, одна частица рассчитывалась с помощью программного комплекса [1], вторая — с использованием ИНС, и находилось максимальное отклонение двух методов.

Приведем сравнительную таблицу для разного количества шагов по времени, для одного источника мощностью 2 с местоположением (0.75; 0.33; -0.65) (данное местоположение было выбрано случайным образом) и 1000 частиц, заполняющих единичный трехмерный куб с центром в начале координат.

Таблица

Сравнительная таблица отклонения двух способов реализации метода Рунге–Кутты при разном количестве шагов по времени

| | 10 шагов по времени | 100 шагов по времени | 1000 шагов по времени | 2000 шагов по времени | 5000 шагов по времени |
|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Шаг по времени 0.1 | 8.15e-06 | 7.5e-06 | 1.27e-05 | 2.47e-05 | 3.78e-05 |
| Шаг по времени 0.01 | 6.07e-07 | 1.5e-06 | 7.95e-06 | 1.22e-05 | 1.6e-05 |
| Шаг по времени 0.001 | 2.457e-07 | 9.9e-07 | 4.52e-06 | 6.15e-06 | 2.92e-05 |
| Шаг по времени 0.0001 | 3.99e-07 | 2.86e-06 | 2.14e-05 | 3.68e-05 | 8.10e-05 |

Теорема 2. Вычислительный алгоритм, основанный на применении построенной искусственной нейронной сети, основанной на формулах (8)–(12), является сходящимся в метрике пространства

непрерывных функций с точностью $O(t^5)$ на одном шаге и суммарной ошибкой на конечном интервале порядка $O(t^4)$, где t — шаг по времени.

Замечание 2. Теорема 2 подтверждается реализацией и тестированием алгоритма ИНС на следующей вычислительной технике:

- 1) ЭВМ на базе процессора AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32-Core-Processor, 32 ГБ оперативной памяти с частотой 2 400 МГц под управлением ОС Debian, GPU Titan V, 12 GB;
- 2) ЭВМ на базе двух процессоров Intel(R) Xeon(R) Silver 4214R CPU @ 2.40GHz, 256 ГБ оперативной памяти под управлением ОС Debian, GPU Tesla T4;
- 3) ноутбук на базе AMD Ryzen 5 4600H, 16 ГБ оперативной памяти, и GPU Nvidia GTX 1650, 4 GB,

а также проведенными вычислительными экспериментами, результаты которых представлены в таблице.

Замечание 3. Стоит отметить также, что при использовании CPU и указанных в замечании 2 GPU необходимая точность достигается всегда. При использовании видеокарт нового поколения, например NVIDIA RTX A5000, для воспроизводимости результатов необходимо указать режим работы ИНС `tf.config.experimental.enable_op_determinism()`. (Данная функция устанавливает детерминированный режим работы, т.е. гарантирует, что одни и те же вычисления при одинаковых входных данных будут давать побитово идентичные результаты между запусками даже на разном оборудовании. Данная функция является экспериментальной и не гарантирует стопроцентную детерминированность.) На видеокартах Nvidia RTX 40** поколения (в частности, 4070) условие теоремы не выполняется ввиду аппаратных особенностей GPU.

Представленные в работе теоремы показывают возможность создания искусственных нейронных сетей, для математического моделирования динамики частиц примеси в несжимаемой жидкости в поле скоростей, являющемся точным решением уравнения Эйлера, с точностью, сопоставимой с классическими методами моделирования. В дальнейшем разработанную ИНС возможно применять для поиска характеристик поля скоростей (1), таких как мощность источника q и местоположение источника M , на основе информации о динамике частиц примеси с использованием классических методов обучения ИНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смородинов А. Д. О восстановлении кулоновского поля потенциальных течений на основе искусственных нейронных сетей. *Успехи кибернетики*. 2025;6(1):137–149. EDN: ICNWWT.
2. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689709*, Российская Федерация. Программный комплекс для решения задачи Коши с различными конфигурациями полей начальных данных и визуализации результатов математического моделирования течения тяжелой примеси : № 2024689305 : заявл. 14.11.2024 : опубл. 10.12.2024 / А. Д. Смородинов, Т. В. Гавриленко, А. О. Дубовик, Д. А. Моргун. EDN: XBPJPY.
3. Смородинов А. Д., Гавриленко Т. В., Дубовик А. О., Моргун Д. А. Реализация программного обеспечения для решения задачи Коши с различными конфигурациями полей начальных данных и визуализации результатов математического моделирования течения тяжелой примеси. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):35–45. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-04. EDN: HQUBJQ.

МЕТОДЫ ИМИТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ВИРТУАЛЬНЫХ КАМЕР В ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕНАХ

А. В. Мальцев

Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1776-814X>, ✉ avmaltcev@mail.ru

Аннотация: в работе предлагаются методы и подходы для имитации оптических эффектов на изображениях от различных устройств наблюдения, моделируемых в трехмерной виртуальной среде. Это позволяет расширить возможности такого моделирования, обеспечив охват широкого спектра реальных устройств в качестве прототипов для создаваемых виртуальных аналогов. Рассматриваются оригинальные методы и алгоритмы двухэтапного синтеза изображений с реализацией дисторсии и хроматических аберраций. Апробация предлагаемых в статье решений проводилась в программном комплексе виртуального окружения VirSim, разработанном в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, и показала их адекватность и эффективность.

Ключевые слова: визуализация, графический процессор, виртуальная камера, дисторсия, хроматическая аберрация.

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: Мальцев А. В. Методы имитации оптических искажений в изображениях с виртуальных камер в трехмерных сценах. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):127–136.

Поступила в редакцию: 25.06.2025.

В окончательном варианте: 22.09.2025.

IMITATING OPTICAL DISTORTIONS IN 3D SCENE VIRTUAL CAMERA IMAGES

A. V. Maltsev

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1776-814X>, ✉ avmaltcev@mail.ru

Abstract: we proposed methods for imitating optical effects in images from virtual cameras that simulate surveillance devices in a three-dimensional environment. This expands the possibilities of such simulations by enabling coverage of a wide range of real devices as references for their virtual counterparts. We developed original methods and algorithms for two-stage image synthesis that implement radial distortion and chromatic aberrations. We tested the proposed solutions in the VirSim virtual environment, developed at our institution, and demonstrated their validity and effectiveness.

Keywords: visualization, GPU, virtual camera, radial distortion, chromatic aberration.

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: Maltsev A. V. Imitating Optical Distortions in 3D Scene Virtual Camera Images. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):127–136.

Original article submitted: 25.06.2025.

Revision submitted: 22.09.2025.

Введение

В настоящее время в различных сферах человеческой деятельности используются элементы синтезируемого с помощью компьютера виртуального окружения и построенные на их базе тренажерные комплексы [1–5]. Данный подход предполагает полную или частичную замену объектов реальной жизни на их трехмерные виртуальные модели, создаваемые в таких системах моделирования, как 3ds

Max, Maya, Blender и т.п. В рамках обучения операторов управлению сложными техническими средствами такая замена обладает рядом преимуществ, среди которых отсутствие необходимости приобретения для учебных целей дорогостоящего оборудования и, соответственно, невозможность его поломки в случае ошибочных действий при тренировке, а также относительно легкая масштабируемость на различное число подготавливаемых людей.

Одним из важных элементов виртуальной среды являются устройства наблюдения [6–8], которые имитируют реальные приборы, размещенные на различных неподвижных (стены, столбы, колонны) и подвижных объектах (автомобили, роботы, летательные аппараты и т.д.). Поступающий от них видеосигнал обеспечивает оператору возможности обзора окружающей обстановки, принятия решений и визуального контроля результата управления какими-либо процессами, например, движением объектов. Эффективность обучения человека с помощью синтезируемой виртуальной среды, а также правильность прививаемых навыков в значительной степени зависят от сходства изображений с виртуальных устройств наблюдения и тех, которые он мог бы видеть с помощью реальных приборов.

Приборы наблюдения являются технически сложными устройствами, состоящими из большого числа электронных, механических и оптических элементов. Каждый из них может вносить в получаемое изображение эффекты и искажения различного типа. Это может быть обусловлено характеристиками и качеством используемых элементов, схемой их работы в виде единой системы, внешними помехами, поломкой оборудования и рядом других факторов. Поэтому, чтобы выработать у операторов, обучаемых с помощью тренажерных комплексов на основе трехмерной виртуальной среды, правильные навыки управления техническими средствами, при выполнении визуализации сцены посредством виртуальных устройств наблюдения целесообразно моделировать эффекты и искажения изображения, присущие их реальным прототипам.

В области развития подходов к моделированию средств видеонаблюдения в системах виртуального окружения, включая методы визуализации получаемых ими изображений с учетом физических характеристик и возможных искажений различной природы, ведутся активные исследования. Так, в работе [9] описывается модель виртуальной камеры с тонкой линзой, учитывающая такие физические параметры, как фокусное расстояние и диафрагменное число. Авторы публикации [10] предлагают решение для распределенной реализации эффекта глубины резкости на изображениях от виртуальных устройств наблюдения с использованием многоядерного графического процессора (GPU). Статьи [11, 12] посвящены задаче рендеринга трехмерных сцен в расширенном динамическом диапазоне яркостей (HDR) с последующим преобразованием к диапазону, который отображается устройствами вывода без поддержки технологии HDR. В работе [13] описываются методы и алгоритмы визуализации в масштабе реального времени (генерация одного кадра занимает не более 40 мс) изображений виртуальной среды с имитацией внешнего влияния на камеру, состоящего в попадании атмосферных осадков на стекло ее объектива. Публикация [14] посвящена подходам и методам для реализации таких искажений, как белый шум, срыв синхронизации, засветка и пересветка.

В данной работе предлагаются оригинальные методы и алгоритмы для моделирования в трехмерных сценах виртуальных прототипов реальных средств наблюдения с имитацией искажений видеосигнала, связанных с конструктивными особенностями оптических элементов и выражающихся в эффекте дисторсии и хроматической аберрации двух типов. Они основаны на применении распределенных вычислений с помощью многоядерных GPU. Новизной разработанных решений является оригинальный подход к реализации бочкообразной дисторсии на основе коррекции поля зрения виртуальной камеры, обеспечивающий полный и эффективный синтез изображения кадра, а также авторский метод моделирования хроматических аберраций на графическом процессоре в масштабе реального времени.

Подушкообразная и бочкообразная дисторсия

Одним из часто встречающихся типов искажений изображения в устройствах наблюдения является дисторсия. Такие искажения возникают в оптических системах объективов и выражаются в изменении коэффициента линейного увеличения по мере удаления отображаемых предметов от оптической оси. В результате нарушается геометрическое подобие между наблюдаемым объектом и его изображением. Эффект дисторсии превращает прямые линии объектов, не пересекающие оптическую ось, в дуги. Если они являются вогнутыми относительно центра изображения, то имеет место подушкообразная дисторсия, а если выпуклыми — бочкообразная. Рисунок 1 наглядно демонстрирует оба этих случая для изображения поверхности с текстурой шахматной доски.

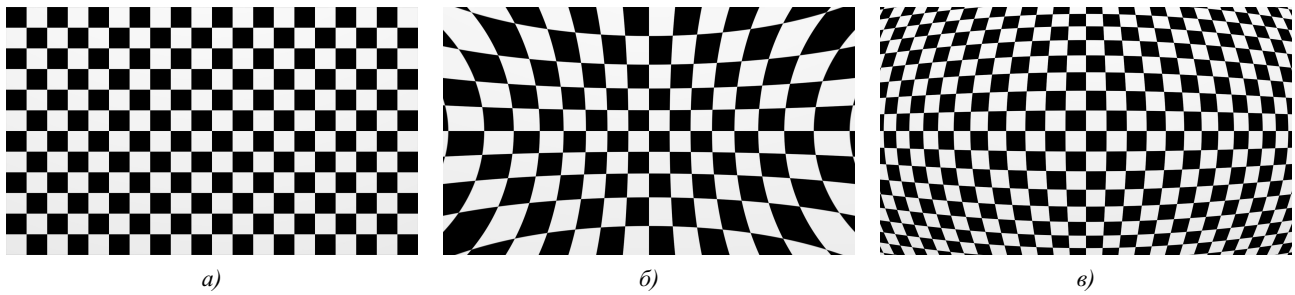


Рис. 1. Исходное изображение (а), подушкообразное (б) и бочкообразное (в) искажения

В настоящей работе реализация дисторсии изображений, получаемых с виртуальных устройств наблюдения, основывается на модели деления. Данная модель была впервые предложена Реймаром Ленцем в 1987 году, но обратила на себя большее внимание уже после исследований в работе [15]. Она формулируется следующим образом:

$$L(r) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n k_i r^{2i}}, \quad (1)$$

где k_i — коэффициенты радиального искажения, n — количество слагаемых в сумме, r — расстояние от точки искаженного изображения до его центра. Для достижения реалистичного результата вполне достаточно ограничиться $n = 2$, то есть использовать только параметры k_1 и k_2 . Пусть начала систем координат U_0V_0 и UV располагаются в центре неискаженного и искаженного изображений соответственно, оси U_0 и U направлены горизонтально вправо, оси V_0 и V — вертикально вверх, а значения координат задаются на отрезке $[-0.5, 0.5]$. Тогда в рамках модели (1) произвольной точке P с координатами (u, v) на искаженном изображении соответствует точка P_0 с координатами (u_0, v_0) на исходном, которая определяется как

$$P_0 = L(r) \cdot P = \frac{P}{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4}, \quad r = \sqrt{u^2 + v^2}. \quad (2)$$

Чтобы смоделировать дисторсию, используем подход на базе технологии постобработки визуализируемого кадра. Он включает два этапа. На первом из них выполняется рендеринг изображения от виртуального устройства наблюдения без учета искажений. Результат записывается в специальный внеэкранный буфер (FBO) с тем же разрешением, что и у текущего буфера кадра. На втором этапе шейдер постобработки выполняет на GPU распределенную закраску самого буфера кадра, используя созданный FBO-буфер в качестве входной текстуры T_0 , хранящей неискаженное изображение.

Суть работы шейдера состоит в следующем. Пусть размер кадра составляет $W \times H$ пикселей, а каждый закрасиваемый пиксель имеет целочисленные координаты $x \in [0, W - 1]$ и $y \in [0, H - 1]$ в системе XU с началом в левом нижнем углу этого кадра и направлением осей влево (X) и вверх (Y). Для пересчета x и y в упомянутую выше систему координат UV необходимо масштабировать оси и сдвинуть начало системы XU :

$$u = \frac{x}{W} - 0.5, \quad v = \frac{y}{H} - 0.5. \quad (3)$$

Далее по формуле (2) шейдер вычисляет соответствующие u и v координаты u_0 и v_0 на неискаженном изображении и преобразует их в координаты

$$s_0 = u_0 + 0.5, \quad t_0 = v_0 + 0.5$$

со значениями из отрезка $[0.0, 1.0]$ для доступа к текстуре T_0 и получения искомого цвета закрасиваемого пикселя (x, y) .

Данное решение хорошо подходит для реализации подушкообразной дисторсии, при которой коэффициент $k_1 > 0$ и значение функции $L(r) < 1$. В этом случае исходное изображение растягивается и видимое пространство «выталкивается» за рамки кадра, а для любой точки P внутри искаженного

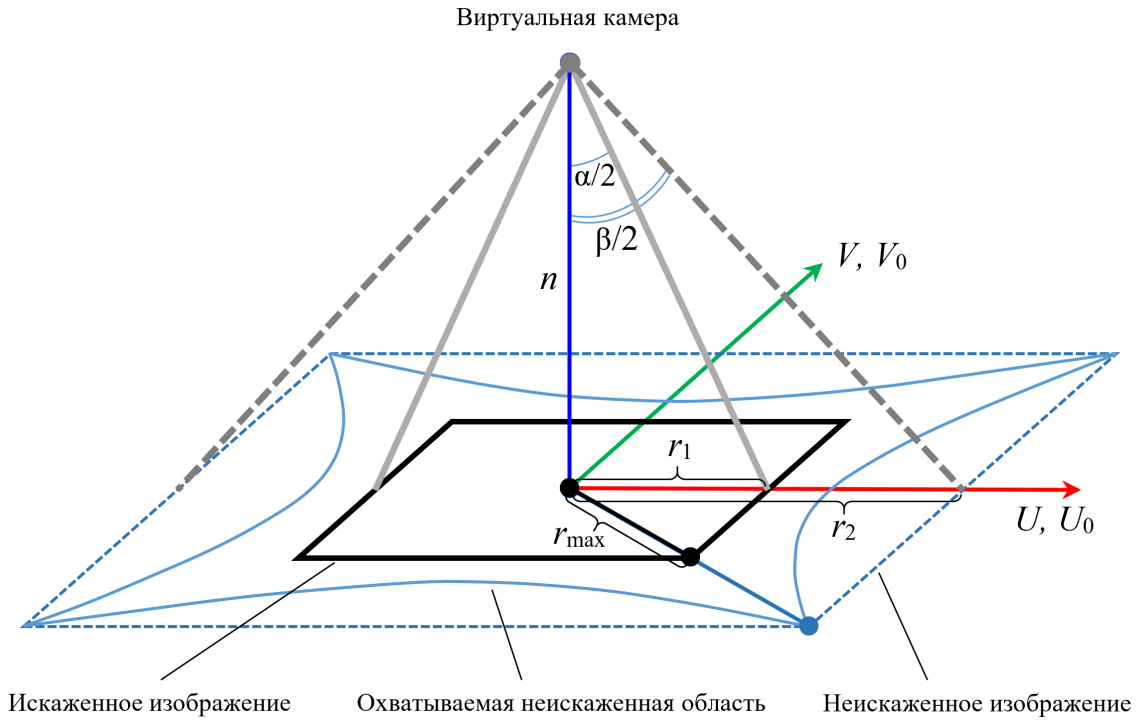


Рис. 2. Коррекция поля зрения виртуальной камеры

кадра существует соответствующая ей точка P_0 в текстуре T_0 . При бочкообразной дисторсии ($k_1 < 0$, $L(r) > 1$) наблюдается обратный эффект, при котором исходное изображение стягивается к центру кадра, а по его краям появляются участки пространства, ранее находившиеся вне рамок кадра. Проблема состоит в том, что какая-либо информация об этих участках отсутствует в исходном изображении и текстуре T_0 , а значит, шейдер не может рассчитать их цвет.

Для решения описанной проблемы в данной работе предлагается оригинальный подход, основанный на коррекции поля зрения виртуальной камеры на этапе визуализации неискаженного изображения, если коэффициент k_1 имеет отрицательное значение, с последующим масштабированием координат в системе UV на этапе постобработки. Рассмотрим этот подход подробнее. Пусть α — текущий угол горизонтального раствора используемой виртуальной камеры, β — искомый угол раствора, при котором визуализируемое неискаженное изображение будет содержать необходимую информацию для выполнения нашего шейдера постобработки, n — расстояние до ближней отсекающей плоскости камеры. На рисунке 2 представлено совмещение искаженного и неискаженного изображений относительно их систем координат UV и U_0V_0 , а также горизонтальные растворы виртуальной камеры с углами α и β . Тангенсы половин этих углов равны

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{r_1}{n}, \quad \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{r_2}{n} = \frac{k \cdot r_1}{n} = k \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

где r_1 , r_2 — расстояния по осям U и U_0 от центров изображений до их вертикальных границ, k — неизвестный коэффициент масштабирования. Чтобы вычислить k , вспомним, что при бочкообразной дисторсии значение коэффициента $k_1 < 0$ и согласно формуле 2 при переходе от искаженного изображения к неискаженному происходит радиальное растяжение, то есть расстояние r от произвольной точки до центра увеличивается в $L(r)$ раз. Максимальное увеличение происходит в точках $(-0.5, -0.5)$, $(-0.5, 0.5)$, $(0.5, 0.5)$, $(0.5, -0.5)$, соответствующих углам кадра и удаленных от его центра на расстояние r_{\max} (рис. 2). Таким образом, чтобы неискаженный кадр содержал все точки для формирования искаженного, коэффициент k должен быть вычислен как

$$k = L(r_{\max}), \quad r_{\max} \approx 0.7071.$$

Тогда искомый угол β горизонтального раствора камеры для этапа визуализации неискаженного изоб-

ражения определим по следующим формулам:

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = L(r_{\max}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

$$\beta = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left(L(r_{\max}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right).$$

Далее, устанавливая полученный угол β для соответствующей виртуальной камеры, выполняем рендеринг сцены в FBO-буфер (текстуру T_0), разрешение которого совпадает с размерами $W \times H$ кадра.

Учитывая выполненное увеличение поля зрения камеры, а также отсутствие изменения фактических размеров (в пикселях) FBO-буфера и текстуры T_0 , содержащей неискаженное изображение, на этапе постобработки необходимо масштабировать координаты точки P_0 , получаемые по формуле (2). Коэффициент такого масштабирования должен иметь значение $1/k$. Тогда

$$P_0 = \frac{1}{k} \cdot L(r) \cdot P = \frac{L(r)}{L(r_{\max})} \cdot P, \quad L(r) = \frac{1}{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4}, \quad r = \sqrt{u^2 + v^2}.$$

Хроматические aberrации

Еще одним распространенным типом искажений в устройствах наблюдения является хроматическая aberrация. Причина ее появления заключается в том, что световые волны разной длины по-разному преломляются в линзах объектива и в результате этого фокусируются в разных точках. На изображении это выражается в виде цветных ореолов и окантовок, приводящих к потере четкости. Существуют два типа хроматических aberrаций: поперечные (хроматизм увеличения) и продольные (хроматизм положения). Они имеют разные характеристики, но могут происходить одновременно.

Поперечная хроматическая aberrация возникает при фокусировке световых волн различной длины в несовпадающих точках фокальной плоскости. Левая часть рисунка 3 демонстрирует эту ситуацию. Через r_R , r_G и r_B обозначены расстояния от точек, соответствующих волнам красного, зеленого и синего спектра, до оптической оси. При этом масштаб изображения отличается для разных цветных каналов получаемого кадра. Данный тип искажения не зависит от используемого диафрагменного числа и фокусного расстояния. Продольная хроматическая aberrация происходит в том случае, если разные длины волн света фокусируются на разных расстояниях от линзы (рис. 3, справа). Поскольку многие камеры выполняют фокусировку с использованием зеленого цветного канала, то на получаемом изображении основная расфокусировка приходится на красный и синий каналы. Как правило, искажение перестает быть заметным при закрытии диафрагмы до $f/2.8$ – $f/4$.

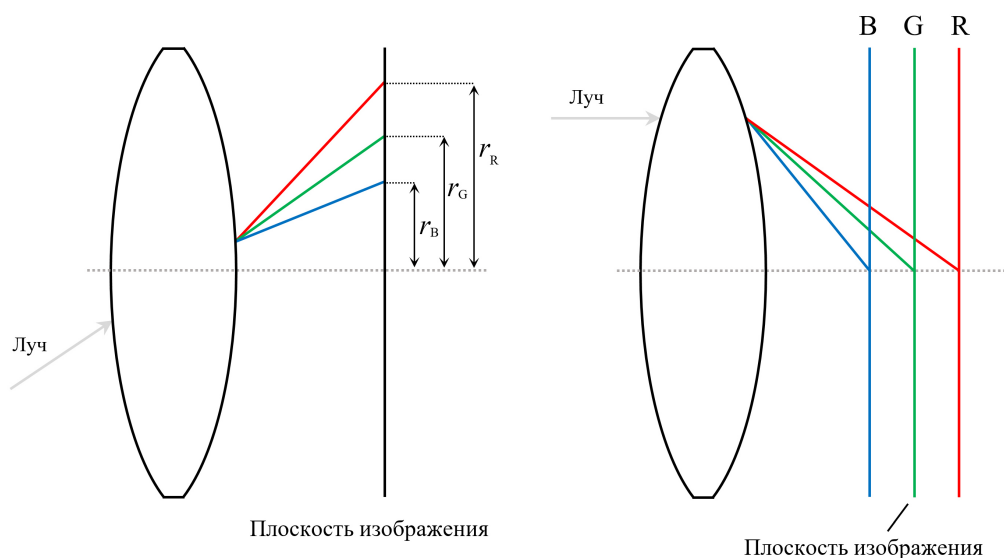


Рис. 3. Поперечная (слева) и продольная (справа) хроматические aberrации

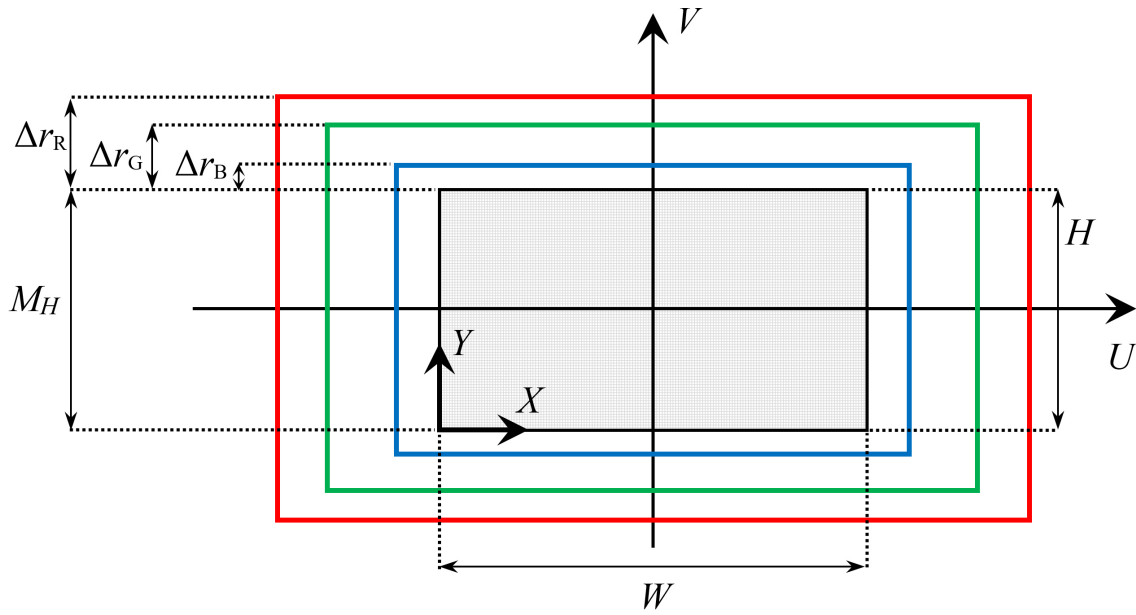


Рис. 4. Масштаб изображения относительно размера сенсора для цветных каналов R, G и B при поперечной хроматической аберрации

Предлагаемый в данной работе подход к моделированию хроматических аберраций, как и в случае дисторсии, содержит два этапа. Первый этап заключается в визуализации виртуальной сцены без аберраций в текстуру T_0 посредством FBO-буфера. На втором этапе выполняется распределенная постобработка полученного изображения с помощью специального фрагментного шейдера. Рассмотрим основные принципы реализации этого шейдера подробнее. Пусть размер формируемого изображения составляет $W \times H$ (в пикселях), а каждый закрашиваемый пиксель имеет координаты $x \in [0, W - 1]$ и $y \in [0, H - 1]$ в системе XY , расположенной в левом нижнем углу кадра. Поскольку, как было упомянуто ранее, при поперечной хроматической аберрации каждый из цветных каналов R, G и B изображения, получаемого реальной камерой, имеет некоторый собственный масштаб относительно размеров сенсора (электронной матрицы) устройства наблюдения, то для расчета цвета пикселя (x, y) необходимо найти соответствующие ему точки в каналах R, G и B текстуры T_0 . Отметим, что все цветные каналы текстуры T_0 изначально имеют одинаковый масштаб изображения. Поэтому для решения поставленной задачи нужно вычислить не коэффициенты перехода от исходных текстурных координат к масштабированным, а, наоборот, от масштабированных — к исходным.

Обозначим ширину и высоту сенсора моделируемого устройства наблюдения через M_W и M_H соответственно, а через Δr_R , Δr_G , Δr_B — расстояния между условными верхними границами масштабированных цветных каналов R, G, B изображения и верхней границей этого сенсора, заданные в миллиметрах (рис. 4). Тогда коэффициенты масштабирования k_R , k_G , k_B для красного, зеленого и синего каналов относительно заданного размера матрицы устройства вычисляются по формулам

$$k_R = \frac{M_H + 2 \cdot \Delta r_R}{M_H}, \quad k_G = \frac{M_H + 2 \cdot \Delta r_G}{M_H}, \quad k_B = \frac{M_H + 2 \cdot \Delta r_B}{M_H}.$$

Изменение размеров изображения в цветных каналах имеет радиальный тип. Поэтому шейдер вначале должен преобразовать имеющиеся координаты x и y пикселя в систему UV с началом в центре кадра, описанную в предыдущем разделе. Координаты u и v вычисляются по формулам (3). Точка (u, v) определяет положение в масштабированных каналах. Для перехода к точкам в исходном неискаженном изображении, сохраненном в текстуре T_0 , необходимо применить коэффициенты, обратные к k_R , k_G и k_B , и сместить начало системы координат в левый нижний угол. Тогда текстурные координаты для красного, синего и зеленого каналов текстуры T_0 будут определяться по формулам

$$(s_R, t_R) = \left(k_R^{-1}u + 0.5, k_R^{-1}v + 0.5 \right),$$

$$(s_G, t_G) = \left(k_G^{-1}u + 0.5, k_G^{-1}v + 0.5 \right),$$

$$(s_B, t_B) = \left(k_B^{-1}u + 0.5, k_B^{-1}v + 0.5 \right).$$

Производя отдельную выборку цвета каждого канала текстуры T_0 по вычисленным координатам, шейдер формирует цвет пикселя (x, y) в условиях поперечной хроматической аберрации.

Чтобы учесть также влияние продольной хроматической аберрации, необходимо при выборке из цветовых каналов R и B применить фильтр Гаусса, который будет моделировать расфокусировку этих каналов. Степень эффекта зависит от настраиваемого размера фильтра. Напомним, что канал G сохраняет четкость, поскольку в большинстве устройств используется как раз для выполнения фокусировки изображения.

Результаты апробации

Предложенные в статье методы и подходы для моделирования оптических искажений видеосигнала, получаемого с виртуальных устройств наблюдения, были реализованы в программном комплексе виртуального окружения VirSim [16], созданном в НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ. Тестирование разработанных решений проводилось с помощью компьютера на базе процессора Intel Core i9-10940X, графической карты NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti и монитора с разрешением 4K (3840x2160). В качестве тестовой сцены использовалась трехмерная сцена виртуального полигона, в которой была размещена модель робота с камерой (рис. 5), имеющей возможность регулировки физических параметров (включая коэффициенты дисторсии и хроматической аберрации, а также значения фокусного расстояния и диафрагмы объектива). Время, затраченное на синтез каждого кадра такой сцены из данной камеры без имитации оптических искажений, составило в среднем 25 мс при использовании указанной конфигурации оборудования. Результат этой «эталонной» визуализации представлен на рисунке 6.



Рис. 5. Сцена виртуального полигона с моделью гусеничного робота

На рисунке 7 показаны результаты рендеринга трехмерной сцены полигона из той же камеры робота, но с имитацией «бочкообразной» ($k_1 < 0$) и «подушкообразной» ($k_1 > 0$) дисторсии при различных значениях коэффициента k_1 . Рисунки 8 и 9 демонстрируют применение высоких коэффициентов хроматической аберрации двух типов: поперечной и продольной. При этом наблюдаются характерные для хроматизма увеличения красно-зеленые окантовки объектов, увеличивающиеся к краям изображения, и зелено-фиолетовые ореолы, свойственные хроматизму положения. Среднее время генерации каждого кадра при рендеринге виртуального полигона с включенными эффектами дисторсии и аберрации составило в среднем 26 мс, что всего на 1 мс больше описанного выше эталонного результата без оптических искажений и подтверждает выполнение предложенных в работе методов и подходов в масштабе реального времени, а также их пригодность для систем виртуального окружения и тренажерных комплексов.



Рис. 6. Неискаженное изображение с виртуальной камеры на работе

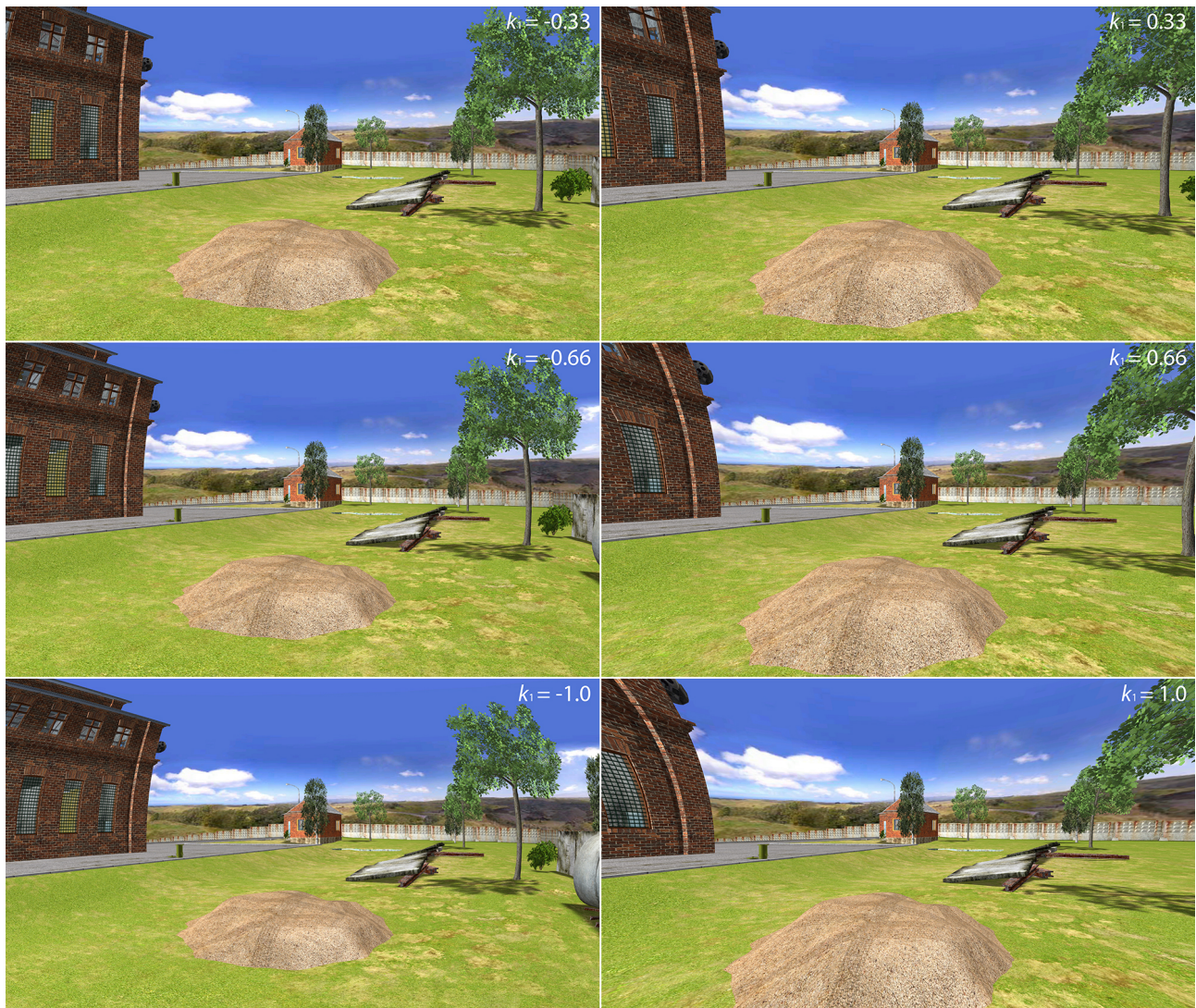


Рис. 7. Изображения с камеры робота при различных коэффициентах дисторсии

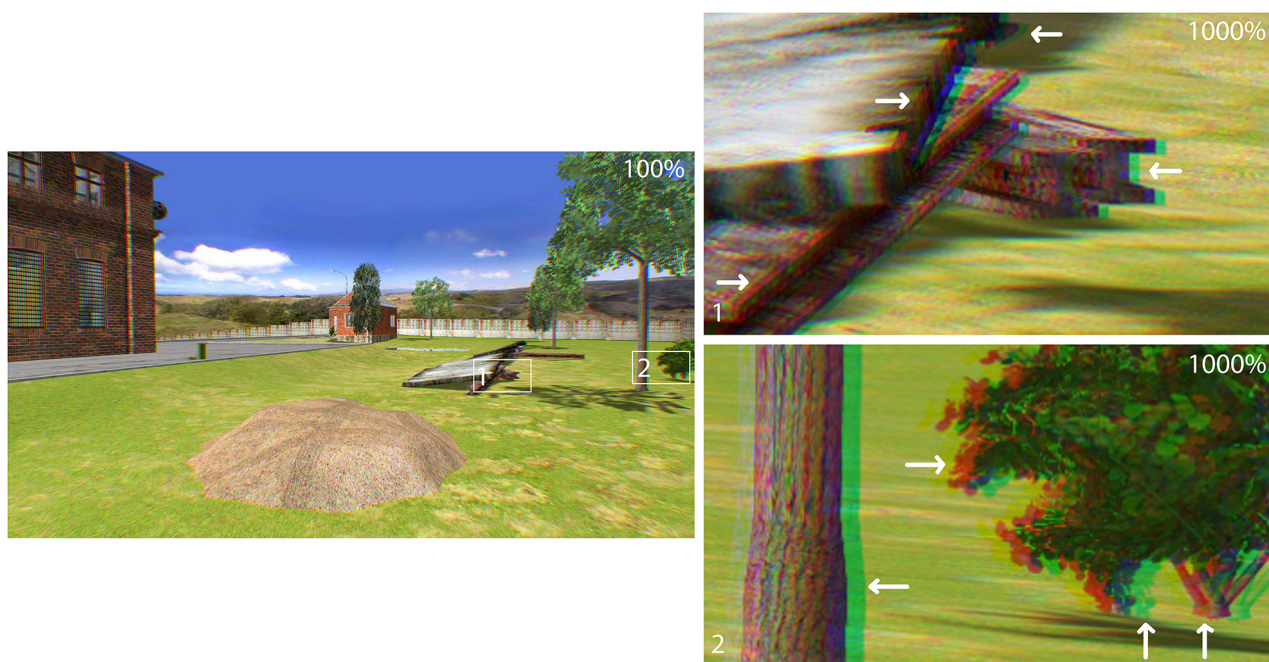


Рис. 8. Моделирование поперечной хроматической аберрации

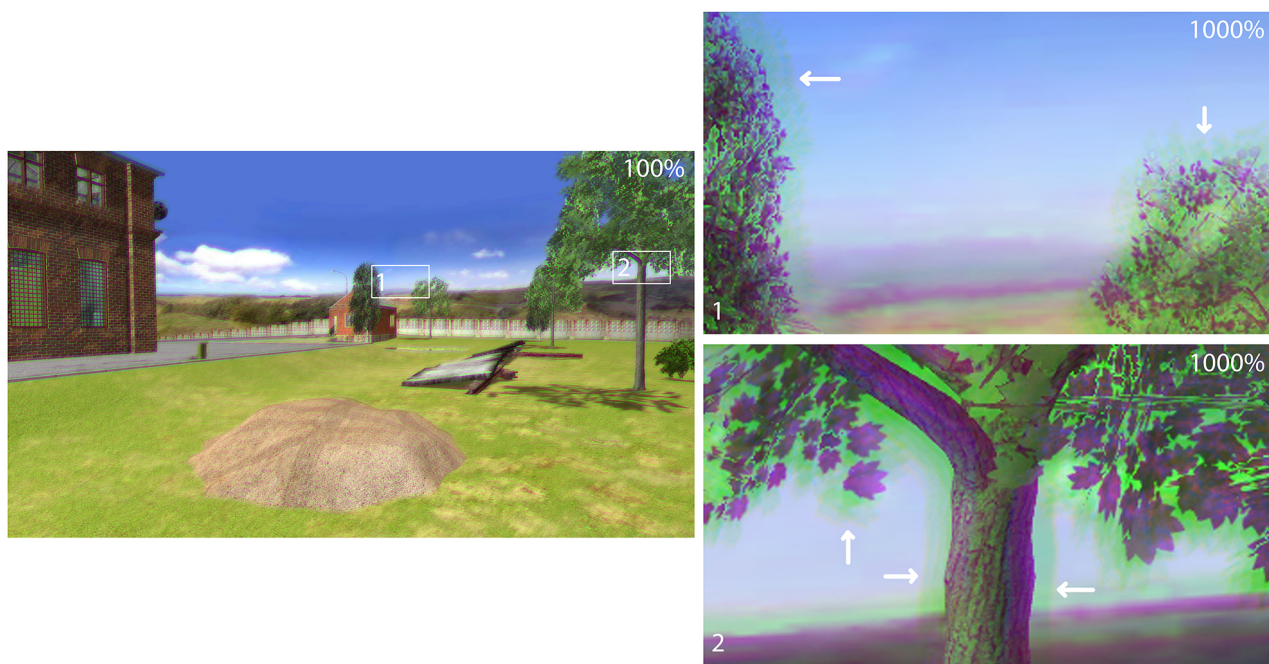


Рис. 9. Моделирование продольной хроматической аберрации

Заключение

В работе рассмотрена реализация эффектов оптических искажений изображения при моделировании в виртуальной среде реальных устройств наблюдения и визуализации получаемых с помощью этих моделей видеопотоков. Для этого предложены оригинальные методы и подходы к имитации дисторсии и хроматической аберрации. Разработанные решения основаны на применении распределенных вычислений с использованием современных многоядерных графических процессоров. Апробация предложенных методов и подходов продемонстрировала возможность их применения при реализации программного обеспечения тренажерных комплексов и систем виртуального окружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hülsmann F., Mattar N., Fröhlich J., Wachsmuth I. Simulating Wind and Warmth in Virtual Reality: Conception, Realization and Evaluation for a CAVE Environment. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*. 2014;11(10):1–21. DOI: 10.20385/1860-2037/11.2014.10.
2. Bruguera M. B., Ilk V., Ruber S., Ewald R. Use of Virtual Reality for Astronaut Training in Future Space Missions – Spacecraft Piloting for the Lunar Orbital Platform – Gateway (LOP-G). *70th International Astronautics Congress*. 2019:1–10.
3. Mikhaylyuk M. V., Timokhin P. Yu. Memory-Effective Methods and Algorithms of Shader Visualization of Digital Core Material Model. *Scientific Visualization*. 2019;11(5):1–11. DOI: 10.26583/sv.11.5.01.
4. Pezent E., Macklin A., Yau J. M., Colonnese N., O'Malley M. K. Multisensory Pseudo-Haptics for Rendering Manual Interactions with Virtual Objects. *Advanced Intelligent Systems*. 2023;5(5):1–13. DOI: 10.1002/aisy.202200303.
5. Garcia A. D., Schlueter J., Paddock E. Training Astronauts Using Hardware-in-the-loop Simulations and Virtual Reality. *AIAA SciTech Forum*. 2020:1–13. DOI: 10.2514/6.2020-0167.
6. Maltsev A. V. Computer Simulation of Video Surveillance Complexes in Virtual Environment Systems. *Scientific Visualization*. 2022;14(2):88–97. DOI: 10.26583/sv.14.2.08.
7. Qureshi F. Z., Terzopoulos D. Surveillance in Virtual Reality: System Design and Multi-Camera Control. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007:1–8. DOI: 10.1109/CVPR.2007.383071.
8. Bisagno N., Conci N. Virtual Camera Modeling for Multi-View Simulation of Surveillance Scenes. *26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 2018:2170–2174. DOI: 10.23919/EUSIPCO.2018.8553409.
9. Barsky B. A., Horn D. R., Klein S. A., Pang J. A., Yu M. Camera Models and Optical Systems Used in Computer Graphics: Part I, Object-Based Techniques. *Proceedings of the 2003 International Conference on Computational Science and Its Applications*. 2003:246–255. DOI: 10.1007/3-540-44842-X_26.
10. Мальцев А. В., Торгашев М. А. Распределенное моделирование глубины резкости при визуализации трехмерных сцен на GPU. *Труды НИИСИ РАН*. 2019;9(5):100–104.
11. Тимохин П. Ю., Торгашев М. А. Визуализация космических сцен в расширенном диапазоне в режиме реального времени. *Информационные технологии*. 2014;12:53–60.
12. Mikhaylyuk M. V., Timokhin P. Y., Torgashev M. A. The Method of Real-Time Implementation of Tone Mapping and Bloom Effect. *Programming and Computer Software*. 2015;41(5):289–294.
13. Мальцев А. В. Синтез изображений трехмерных сцен с моделированием капель дождя на объективе виртуальной камеры. *Труды НИИСИ РАН*. 2021;11(3):36–40. DOI: 10.25682/NIISI.2021.3.0008.
14. Мальцев А. В. Методы моделирования световых эффектов и искажений видеосигнала в виртуальных средствах наблюдения. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2019;2:54–61. DOI: 10.14357/20718632190206.
15. Fitzgibbon A. W. Simultaneous Linear Estimation of Multiple View Geometry and Lens Distortion. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2001:125–132. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990465.
16. 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;37(4):72–95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jsyb.ru.

Адрес учредителя и издателя:

Федеральное государственное автономное 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 30.09.2025.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 9,9. Уч.-изд. л. 14,7.

Цена свободная.