

# ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ



УПРАВЛЕНИЕ И ВЫСОКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ

2025  
№ 2 (70)



ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.Н. ТАТИЩЕВА

# **ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2025  
№ 2 (70)**

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК России для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям.

**Группа специальностей 1.2 «Компьютерные науки и информатика»:**

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

**Группа специальностей 2.2 «Электроника, фотоника, приборостроение и связь»:**

2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки);

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки);

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

**Группа специальностей 2.3 «Информационные технологии и телекоммуникации»:**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);

2.3.4 – Управление в организационных системах (технические науки);

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.3.6 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

Журнал входит в базу данных Ulrich's Periodicals Directory.

Астрахань  
Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева  
2025

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом  
Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева

**ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:  
управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2025  
№ 2 (70)**

**Редакционная коллегия**

*И.М. Азмухамедов*, доктор технических наук, профессор, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева (главный редактор)

*И.В. Аникин*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ

*А.А. Большаков*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и управления» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

*Л.А. Демидова*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительной и прикладной математики» Рязанского государственного радиотехнического университета (г. Рязань)

*А.С. Катасёв*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем информационной безопасности ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» (г. Казань)

*И.Ю. Квятковская*, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

*А.Г. Кравец*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета

*В.Ю. Кузнецова*, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

*Ю.В. Литовка*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета

*А.М. Лихтер*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

*А.А. Лобатый*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск)

*Е.В. Никольцев*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА) (г. Москва)

*В.О. Осипян*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии» Кубанского государственного университета (г. Краснодар)

*И.Ю. Петрова*, доктор технических наук, профессор, первый проректор Астраханского государственного архитектурно-строительного университета, заведующая кафедрой САПР Астраханского государственного архитектурно-строительного университета

*А.В. Рыбаков*, кандидат физико-математических наук; доцент кафедры технологии материалов и промышленной инженерии Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

*А.В. Скрипаль*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Медицинская физика» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

*И.Б. Старченко*, доктор технических наук, профессор, ООО «Параметрика», научный руководитель (г. Таганрог Ростовской области)

*Т.Л. Тен*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Карагандинского экономического университета (Республика Казахстан, г. Караганда)

*Е.Н. Тищенко*, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и защита информации» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) – г. Ростов-на-Дону

*С.А. Филст*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия» Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

*Л.Р. Фиопова*, доктор технических наук, профессор, декан факультета Вычислительной техники, заведующая кафедрой «Информационное обеспечение управления и производства» Пензенского государственного университета

*В.А. Цимбал*, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого МО в г. Серпухов Московской области)

*Н.К. Юрков*, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета

*N.A. Kolesova*, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

*Serg Miranda*, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science, University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS dept. and MBDS innovation lab ([www.mbds-fr.org](http://www.mbds-fr.org))

Журнал выходит 4 раза в год  
Все материалы, поступающие в редколлегию журнала,  
проходят независимое рецензирование

© Астраханский государственный университет,  
имени В. Н. Татищева, 2025  
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2025

ASTRAKHAN TATISHCHEV STATE UNIVERSITY

**PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:  
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii**

**CASPIAN JOURNAL:  
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2025  
No. 2 (70)**

The journal is included in the list of the reviewed scientific journals recommended by VAK of Russia for the publication of the main scientific results of theses for the candidate of science degree, for the doctor of science degree on the following scientific specialties.

**Group of specialties 1.2 “Computer science and informatics”:**

1.2.2 – Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programmes (technical sciences).

**Group of specialties 2.2 “Electronics, photonics, instrument engineering and communication”:**

2.2.4 – Instruments and methods of measurement (by type of measurement) (technical sciences);

2.2.11 – Information-measuring and control systems (technical sciences);

2.2.12 – Medical devices, systems and products (technical sciences).

**Group of specialties 2.3 “Information technologies and telecommunications”:**

2.3.1 – System analysis, information control and processing (technical sciences);

2.3.4 – Management in organizational systems (technical sciences);

2.3.5 – Mathematical software and software for computing systems, complexes and computer networks (technical sciences);

2.3.6 – Information security methods and systems, information security (technical sciences).

The journal is included into the database Ulrich’s Periodicals Directory.

Astrakhan  
Astrakhan Tatishchev State University  
2025

Recommended by the Editorial and Publishing Board  
of Astrakhan Tatishchev State University

**CASPIAN JOURNAL:  
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2025**

**No. 2 (70)**

*I.M. Azhmukhamedov*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of Information Security Department, Astrakhan Tatishchev State University named after V.N. (Editor-in-Chief)

*I.V. Anikin*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security System Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

*A.A. Bolshakov*, Doct. Sci. (Engineering), Professor of «Systems of Automated Design Engineering and Control» department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

*L.A. Demidova*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computational and Applied Mathematics Department, Ryazan State Radio Engineering University (Ryazan)

*A.S. Katasev*, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information Security Systems, Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev – KAI

*I.Yu. Kvyatkovskaya*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of “Information Technologies and Communications” Institute of the Astrakhan State Technical University

*A.G. Kravets*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Automated Design Engineering Systems and Search Constructing Department, Volgograd State Technical University

*V.Yu. Kuznetsova*, Cand. Sci. (Engineering), Senior Lecturer of Information Security Department, Astrakhan Tatishchev State University

*Yu.V. Litovka*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Automated Support System for Decision-Making, Tambov State Technical University

*A.M. Likhter*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, Astrakhan Tatishchev State University

*A.A. Lobaty*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Systems and Technologies Department, Belarusian National Technical University (Belarus, Minsk)

*E.V. Nikulchev*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the System Management and Modeling Department, Moscow Technological University (Moscow)

*V.O. Osipy*, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Kuban State University (Krasnodar)

*I.Yu. Petrova*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, First Vice-Rector of the Astrakhan State Architectural and Construction University, Head of the CAD department of Astrakhan State Architectural and Construction University

*A.V. Rybakov*, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Materials Technology and Industrial Engineering Astrakhan Tatishchev State University

*A.V. Skripal*, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Medical Physics Department of the Saratov national research State University named after N.G. Chernyshevsky

*I.B. Starchenko*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, OOO «Parametrica» (Taganrog, Rostov Oblast), Research Supervisor

*T.L. Ten*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Karaganda Economic University (Republic of Kazakhstan, Karaganda)

*E.N. Tishchenko*, Doct. Sci. (Economics), Professor, Head of the Information Technologies & Information Security Department, Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don

*S.A. Filist*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of Biomedical Engineering Department, Southwest State University (Kursk)

*L.R. Fionova*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Computer Technology Faculty, Head of the Department «Information Support of Management and Production, Penza State University

*V.A. Tsimbal*, Doct. Sci. (Engineering), Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Professor of the Automated Control Systems Department (Branch of the Military Academy of the Russian Strategic Missile Forces named after Peter the Great of the Moscow Oblast, Serpukhov, Moscow Oblast)

*N.K. Yurkov*, Honored worker of science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the department «Designing and production of the radio equipment», Penza State University

*N.A. Kolesova*, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

*Serg Miranda*, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science dept., University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS department and MBDS innovation lab ([www.mbd-fr.org](http://www.mbd-fr.org))

The journal is published four times a year  
All materials that come to the Editorial Board of the journal  
are subject to independent peer-review

© Astrakhan Tatishchev State University, 2025

© S. Yu. Gayftdinova, cover design, 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### **МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**К. В. Якименко, В. В. Золотарев**

Формирование методики оценки защищенности информационной системы  
в переходных состояниях цифровой трансформации ..... 9–22

**Ю. А. Андрусенко, В. Г. Лапин, М. С. Дудова,  
И. В. Бородулин, Е. А. Русских**

Исследование методов оценки рисков информационной  
безопасности в технологиях машинного обучения ..... 23–31

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

**Д. С. Пономарёв**

Методы глубокого обучения в задачах прогноза  
уровня прибыли производственного сектора ..... 32–40

**Д. М. Сенченко, А. С. Макарян, М. М. Путято,  
А. Н. Черкасов, В. В. Вихлянецв**

Разработка системы автоматизированного тестирования  
на проникновение веб-приложений ..... 41–49

**Е. А. Ефимов, Д. С. Лапин, О. И. Евдошенко**

Повышение производительности запросов в базах данных  
путём применения методов нисходящей, восходящей,  
внутритабличной денормализации ..... 50–57

### **УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**Г. А. Агарков, Е. А. Зафиров**

Результаты моделирования прогнозирования востребованности  
направлений подготовки образовательных организаций  
высшего образования среди абитуриентов ..... 58–67

**Т. Э. Шульга, А. А. Сытник, М. В. Карташова**

Концепция рекомендательной системы  
для повторного использования онтологий ..... 68–75

### **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

**А. А. Логинова, А. Р. Денисов**

Применение инструментов анализа цифрового следа  
системы управления обучением в деятельности  
информационно-аналитического отдела университета ..... 76–83

**Д. О. Чичеров, С. В. Ковалёв, О. А. Ковалёва**

Функциональное моделирование и анализ бизнес-процессов  
бюджетной организации с помощью марковских цепей ..... 84–95

**Д. В. Железняков, Ю. А. Головки, А. М. Лихтер**

Моделирование изменений бимодального сигнала  
в процессе передачи информации при управлении  
биологическими объектами в водной среде ..... 96–101

<b>М. А. Лапина, Д. И. Ледян, В. Г. Лапин, И. В. Головин, А. Р. Багаутдинова</b> Применение интерактивных инструментов визуализации для моделирования бизнес-процессов .....	102–108
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ</b>	
<b>А. В. Дорошенко, А. А. Кулик</b> Исследование безопасности движения беспилотного автомобиля под влиянием усталости водителя и состояния дорожного покрытия.....	109–117
<b><u>ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ</u></b>	
<b>ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b>	
<b>Д. В. Леонов</b> Испытания способа коррекции фазовых аберраций волнового фронта при ультразвуковой диагностике, основанного на полиномиальной аппроксимации задержек .....	118–123
<b>О. В. Власова, Д. В. Леонов, А. В. Петряйкин, О. В. Омелянская, Ю. А. Васильев</b> Формирование набора несфокусированных сигналов из тракта ультразвукового прибора, полученных при прохождении волны через височные кости .....	124–132
<b>ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ .....</b>	133

# CONTENTS

## **INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL**

### **METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION PROTECTION, INFORMATION SECURITY**

**K. V. Yakimenko, V. V. Zolotarev**

Formation of a methodology for assessing information system security in transitional states of digital transformation ..... 9–22

**Yu. A. Andrusenko, V. G. Lapin, M. S. Dudova,**

**I. V. Borodulin, Ye. A. Russkikh**

Methods for assessing information security risks in machine learning technologies ..... 23–31

### **MATHEMATICAL SOFTWARE AND SOFTWARE FOR COMPUTING MACHINES, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS**

**D. S. Ponomarev**

Using deep learning methods in the problems of forecasting the level of income in the production sector ..... 32–40

**D. M. Senchenko, A. S. Makaryan, M. M. Putyato,**

**A. N. Cherkasov, V. V. Vikhlyantsev**

Development of an automated web application penetration testing system ..... 41–49

**E. A. Efimov, D. S. Lapin, O. I. Evdoshenko**

Improving query performance in databases by applying top-down, bottom-up, and intra-tabular denormalization methods ..... 50–57

### **MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS**

**G. A. Agarkov, E. A. Zafirov**

Results of modeling of forecasting the demand for educational programs of universities among applicants ..... 58–67

**T. E. Shulga, A. A. Sytnik, M. V. Kartashova**

Recommender system concept for ontology reuse ..... 68–75

### **SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING**

**A. A. Loginova, A. R. Denisov**

Application of tools for analyzing the digital footprint of the learning management system in the activities of the information and analytical department of the university ..... 76–83

**D. O. Chicherov, S. V. Kovalev, O. A. Kovaleva**

Functional modeling and analysis of business processes of a budget organization using Markov chains ..... 84–95

**Ju. A. Golovko, A. M. Likhter**

Modeling changes in a bimodal signal during information transmission in controlling biological objects in the aquatic environment ..... 96–101

<b>M.A. Lapina, D. V. Ledyan, V. G. Lapin, I. I. Golovin, A. R. Bagautdinova</b> Using interactive visualization tools for business process modeling .....	102–108
--	---------

**MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS  
AND PROGRAM SYSTEMS**

<b>A. V. Doroshenko, A. A. Kulik</b> Research the safety of driving an unmanned vehicle under the influence of driver fatigue and the condition of the road surface.....	109–117
--	---------

**INSTRUMENT ENGINEERING, MEASUREMENT SCIENCE,  
INFORMATION AND MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

**MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS**

<b>D. V. Leonov</b> Evaluation of the aberration correction method in ultrasound imaging based on polynomial approximation of phase delays .....	118–123
--	---------

<b>O. V. Vlasova, D. V. Leonov, A. V., Petraikin, O. V. Omelyanskaya, Yu. A. Vasilev</b> Generation of a set of unfocused signals from the ultrasound device path obtained when the wave passes through the temporal bones .....	124–132
--	---------

<b>RULES FOR THE AUTHORS .....</b>	133
------------------------------------	-----

# **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

## **МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

УДК 004.056

### **ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

*Якименко Кирилл Викторович*, Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М.Ф. Решетнева, 660037, Российская Федерация, Сибирский федеральный округ, Красноярский край, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, аспирант, ORCID: 0009-0003-3374-1569, e-mail: Yakimenko.KV@yandex.ru

*Золотарев Вячеслав Владимирович*, Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М.Ф. Решетнева, 660037, Российская Федерация, Сибирский федеральный округ, Красноярский край, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, кандидат технических наук, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@mail.sibsau.ru

В статье рассматривается проблема управления информационной безопасностью в процессе цифровой трансформации. Особое внимание уделяется переходным состояниям информационных систем, возникающим в ходе цифровой трансформации, и их влиянию на защищенность данных. В начале статьи анализируются актуальные угрозы информационной безопасности, связанные с увеличением числа успешных атак на российские организации. Далее рассматриваются основные проблемы, возникающие при реализации национальных программ и обеспечении устойчивости субъектов критической информационной инфраструктуры к внешним и внутренним угрозам. Особое внимание уделяется описанию бизнес-процессов, их классификации и особенностям их автоматизации. Подробно рассматривается процесс цифровой трансформации на примере формирования управленческой отчетности, включая изменения в бизнес-процессах и информационных системах. Предлагается алгоритм управления информационной безопасностью, включающий формирование перечня автоматизируемых бизнес-процессов, определение перечня информационных систем и их взаимосвязей, а также формирование перечня рисков и защитных мер.

**Ключевые слова:** управление информационной безопасностью, процессный подход, алгоритм управления безопасностью, угрозы информационной безопасности, цифровая трансформация

### **FORMATION OF A METHODOLOGY FOR ASSESSING INFORMATION SYSTEM SECURITY IN TRANSITIONAL STATES OF DIGITAL TRANSFORMATION**

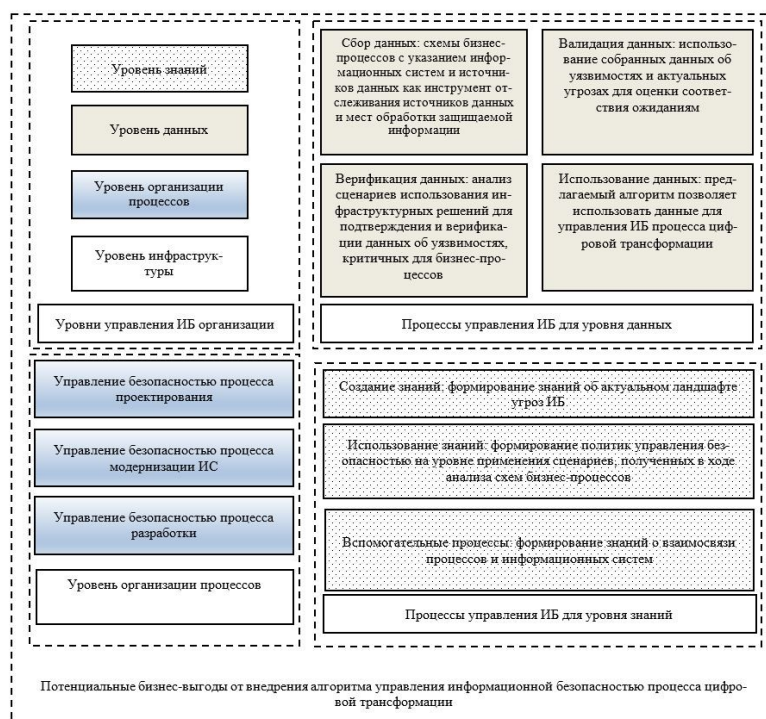
*Yakimenko Kirill V.*, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0009-0003-3374-1569, e-mail: Yakimenko.KV@yandex.ru

*Zolotarev Vyacheslav V.*, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Head of Information Technologies Security Department, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@mail.sibsau.ru

The article deals with the problem of information security management in the process of digital transformation. Special attention is paid to the transitional states of information systems that arise during digital transformation and their impact on data security. At the beginning of the article, the current threats to information security associated with an increase in the number of successful attacks on Russian organizations are analyzed. Next, the main problems arising in the implementation of national programs and ensuring the resilience of critical information infrastructure entities to external and internal threats are considered. Special attention is paid to the description of business processes, their classification and automation features. The process of digital transformation is considered in detail on the example of the formation of management reporting, including changes in business processes and information systems. An information security management algorithm is proposed, including the formation of a list of automated business processes, the definition of a list of information systems and their relationships, as well as the formation of a list of risks and protective measures.

**Keywords:** information security management, process approach, security management algorithm, threats to information security, digital transformation

## Graphical annotation (Графическая аннотация)

**ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность темы исследования. Переход к цифровой экономике невозможен без рассмотрения вопросов создания современной информационной инфраструктуры, что подтверждается рядом нормативно-правовых документов и национальных программ, таких как, например, «Цифровая экономика Российской Федерации».

Одна из основных проблем при реализации национальных программ и обеспечении устойчивости субъектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) к внешним и внутренним угрозам связана с созданием эффективной системы управления информационной безопасностью организаций в процессе цифровой трансформации [6].

По данным аналитических отчетов компании Positive Technologies, за первые 3 квартала 2024 г. количество успешных атак на российские организации практически сравнялось с показателем за весь 2022 г., когда наблюдался всплеск атак на российские организации ввиду ухудшения геополитической ситуации [13, 16, 17].

Также отмечается, что активный процесс импортозамещения в области ИТ ведет к росту количества уязвимостей в программных продуктах [12]. В это же время, согласно данным по 187-ФЗ от ФСТЭК России РФ, количество субъектов КИИ в стране составляет свыше 50 тысяч организаций; и это при неуклонном росте количества объектов КИИ, что говорит о масштабности действия 187-ФЗ и глобальности, возникающих на уровне обеспечения безопасности КИИ проблем.

Предлагаемый в работе алгоритм управления информационной безопасностью в процессе цифровой трансформации фокусируется на переходных состояниях, в отличие от общепринятых подходов, которые зачастую рассматривают системы в статичном состоянии. Алгоритм акцентирует внимание на динамике изменений в процессе цифровой трансформации, рассматривает взаимосвязи бизнес-процессов и информационных систем, позволяет учесть проблемные вопросы, возникающие при внедрении новых технологий при формировании модели угроз информационных систем.

**ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

Обозначенная ситуация осложняется, во-первых, наличием множественных, зачастую недокументированных, взаимосвязей между элементами информационных систем, а во-вторых, недостаточной проработкой и формализованностью бизнес-процессов организаций.

Любое современное предприятие независимо от отраслевой принадлежности рано или поздно приходит к тому, что ему необходимо формализовать свои бизнес-процессы.

Как правило, описание бизнес-процессов начинается с верхнеуровневого описания, которое определяет основные направления деятельности, политику и стратегию работы компании.

На данном этапе описываются так называемые бизнес-процессы первого уровня – это процессы, нацеленные на решение стратегических задач предприятия.

Примером процессов первого уровня может быть распределение сырья и материалов по производственным подразделениям компании.

Следующим этапом описываются бизнес-процессы второго уровня – это внутренние процессы предприятия, задача которых – достигать тактических целей. Они представляют собой подпроцессы по отношению к процессам первого уровня. Модели второго уровня фиксируют состав бизнес-процессов по направлениям деятельности (функциональным областям). Также к бизнес-процессам второго уровня можно отнести такие виды деятельности, как «Выставление счёта», «Подготовка договора», «Изготовление детали», «Формирование отчетности» и т. п.

Следующая ступень описания – бизнес-процессы третьего уровня. На данном уровне формируются конкретные инструкции, технологические карты, описывающие четкий порядок действий участников бизнес-процесса, источники данных, сроки выполнения операций и методологию принятия решений.

В зависимости от степени зрелости организации степень проработки и детализации бизнес-процессов может кардинально отличаться.

В большинстве случаев на предприятиях может быть проработан либо технический (третий) уровень с описанием конкретных процедур и технологических процессов, либо процессы первого уровня, описывающие стратегические цели и задачи. И достаточно редко встречается ситуация, когда все три уровня бизнес-процессов подробно описаны, а также имеется понятная взаимосвязь процессов разных уровней между собой [1].

Ситуация с недостаточной проработкой бизнес-процессов предприятия приводит к недостатку информации в части перечня информационных систем, задействованных в различных бизнес-процессах, взаимосвязей между информационными системами, а также недостатку информации об источниках данных для оценки защищенности.

Цифровая трансформация предприятия – это процесс активного внедрения цифровых технологий и инструментов для изменения традиционной модели бизнеса и повышения эффективности его функционирования.

При этом достаточно часто, особенно на первых этапах цифровой трансформации, изменениям подвергаются именно бизнес-процессы третьего уровня. Какие проблемы могут возникнуть при такой трансформации, рассмотрим далее.

Рассмотрим процесс цифровой трансформации на частном примере: формирования управленческой отчетности для руководителей верхнего звена.

Процессом первого уровня в данном случае является процесс оперативного управления и реагирования. Процессом второго уровня является процесс контроля выполнения обязательств перед контрагентами. На втором уровне в качестве описания бизнес-процесса, как правило, фигурирует общее описание формируемой отчетности, какие вопросы должны быть освещены, в каком виде и с какой периодичностью отчетность должна формироваться.

Если перейти дальше, на третий уровень бизнес-процесса, уровень технического характера, то именно на третьем уровне бизнес-процесса мы найдем:

- 1) перечень входных данных и их источников;
- 2) перечень выходных данных;
- 3) исполнитель, формирующий отчетность;
- 4) формат отчета;
- 5) сроки и периодичность формирования.

До принятия решения об автоматизации процесса формирования отчетности ее формирование осуществляется в ручном либо полуавтоматическом режиме. То есть определённый работник с определенной периодичностью собирает данные из различных источников (информационных систем) и компоует данные в единую форму. Очевидными недостатками такого подхода является человеческий фактор со всеми вытекающими последствиями и привязка бизнес-процесса к конкретному человеку либо должности. Автоматизация данного процесса позволит избежать ошибок при формировании отчетности, освободить человеческие ресурсы от рутинных операций, сделать процесс более формализованным и прозрачным.

После принятия решения об автоматизации процесса формирования отчетности готовится план, в который включаются следующие основные тезисы [2]:

1. Источники данных для отчетности. Конкретный перечень баз данных и информационных систем, в которых содержатся интересующие нас данные.
2. Перечень данных для формирования отчетности.
3. Алгоритмы обработки данных и программное обеспечение, используемое для формирования отчетности
4. Формат отчета, требуемые фильтры, диаграммы и иные элементы для визуализации.

Исходя из основных шагов плана автоматизации процесса формирования отчетности, мы можем начать формулировать ключевые угрозы и проблемы, которые возникнут при цифровой трансформации данного процесса.

В первую очередь, для обеспечения возможности сбора информации из различных информационных систем понадобятся дополнительные учетные записи, с правами на чтение данных. В зависимости от количества информационных систем и их специфики, количество и права учетных записей, требуемых для сбора данных, могут варьироваться.

Во-вторых, помимо создания учетных записей, следует проработать вопрос организации доступа к информационным системам, являющимся источниками данных, с точки зрения сетевой доступности. На сетевых устройствах, которые осуществляют функционал сегментирования сетей, необходимо будет прописывать новые маршруты и разрешающие правила для взаимодействия информационных систем друг с другом.

В-третьих, сбор и обработка информации подразумевает, что в одной информационной системе, осуществляющей формирование отчетности, собираются данные из различных источников. Может сложиться ситуация, когда обрабатываемые в разных информационных системах данные по отдельности не имеют высокой практической ценности для предприятия и не представляют интереса для злоумышленника. В свою очередь, агрегированные в одной системе, структурированные и обработанные по определенным алгоритмам данные могут не просто сформировать некую добавочную стоимость и начать представлять реальную финансовую ценность для предприятия, но и перейти в разряд сведений конфиденциального характера. А в некоторых случаях агрегированные сведения и вовсе могут быть отнесены к сведениям, составляющим государственную тайну. Таким образом, к информационной системе, в которой будет осуществляться формирование отчетности могут предъявляться особые требования, как со стороны внутренних нормативных документов предприятия, так и со стороны действующего законодательства [3].

Также нельзя забывать о потенциальной проблеме дублирования информации. То есть, если изначально было известно, что определенные сведения, агрегируемые в сводной отчетности, относятся к сведениям конфиденциального характера, к новой информационной системе, разработчикам и администраторам информационной системы следует изначально предъявлять повышенные требования в части информационной безопасности, а также учитывать в перечне допущенных к обработке информации лиц, если они не были учтены в нем ранее [4].

В-четвертых, следует тщательно подходить к выбору программных продуктов, которые будут использоваться при формировании отчетности. С точки зрения санкционных рисков следует учитывать возможные последствия от использования санкционно-зависимых программных продуктов в критичных бизнес-процессах.

Также следует учитывать риски использования программного обеспечения с открытым исходным кодом и различных его компонентов, используемых для самостоятельной разработки программного обеспечения. Современные подходы к программированию очень часто позволяют использовать специфические библиотеки и компоненты с открытым исходным кодом (например, SciPy, NumPy, Pandas и т. п.). В свою очередь, никто не может со стопроцентной уверенностью гарантировать корректность производимых такими «внешними» компонентами расчетов и вычислений, что также может ставить под сомнение сформированную итоговую отчетность.

При этом с точки зрения менеджера бизнес-процесса, а также с точки зрения его потребителей, ситуация может кардинально не претерпеть никаких изменений. Руководители верхнего звена по-прежнему будут получать отчетность в привычном формате в заданные сроки. То есть второй уровень бизнес-процессов останется неизменным. При этом на третьем уровне предстоит полная переработка бизнес-процесса, а изменения могут затронуть не только целевой бизнес-процесс, но и бизнес-процессы, протекающие в других информационных системах.

Изменения бизнес-процесса на третьем уровне расширят ландшафт потенциальных угроз информационной безопасности.

В-пятых, если рассматривать информационную систему как некую стабильную совокупность компонентов и параметров, процесс цифровой трансформации неизбежно приведет к изменению состояния системы или режимов ее работы.

С точки зрения обеспечения непрерывности общепринятой практикой принято выделять три режима работы информационной системы: нормальный режим работы, режим обслуживания и обновления, а также аварийный режим работы.

Каждый из режимов работы характеризуется определенным набором параметров и состояний компонентов системы, по значениям которых определяется текущее состояние системы, а также действия обслуживающего систему персонала и автоматики по переводу системы в то или иное состояние.

Также различные состояния системы могут характеризоваться различными правилами доступа к компонентам системы. Например, в нормальном режиме работы к системе могут предъявляться следующие требования:

- программное обеспечение и комплекс технических средств системы обеспечивают возможность круглосуточного непрерывного функционирования (24 часа x 7 дней в неделю), с перерывами на обслуживание;
- исправно работает оборудование, составляющее комплекс технических средств;
- исправно функционирует системное и прикладное программное обеспечение.

Для обеспечения нормального режима работы системы выполняются требования и выдерживаются условия эксплуатации программного обеспечения и комплекса технических средств системы, указанные в эксплуатационной документации системы.

Режим обслуживания и обновления предназначен для проведения профилактических работ с компонентами системы, установки программных обновлений.

Доступ непривилегированных пользователей в данном режиме запрещается, и работа с системой возможна только для привилегированных пользователей и обслуживающего персонала.

Аварийный режим работы системы характеризуется отказом одного или нескольких компонентов программного обеспечения и(или) комплекса технических средств системы. Доступ непривилегированных пользователей к системе запрещен, работа с системой возможна только для привилегированных пользователей. Привилегированные пользователи и обслуживающий персонал выполняют процедуры по переводу системы в нормальный режим работы.

Исходя из вышеописанных режимов работы, можно предположить, что процесс цифровой трансформации приводит к изменению отслеживаемых параметров системы и переход её в иное состояние, которое зачастую может быть не описано в проектно-эксплуатационной документации на информационную систему.

При этом речь может идти как о технических характеристиках системы, например утилизации вычислительных мощностей и пропускной способности каналов связи, так и о комплексных параметрах, которые можно отнести к метрикам информационной безопасности.

Таким образом, мы можем сформулировать еще один проблемный вопрос – перед началом процесса цифровой трансформацией должны быть зафиксированы характеристики (параметры) информационных систем, затронутых процессом цифровой трансформации. По возможности следует попытаться спрогнозировать возможные значения отслеживаемых параметров системы и сформулировать новые [4].

Значения и характеристики нового состояния системы необходимо отслеживать и при необходимости формулировать новые для обеспечения стабильной работы системы, обеспечения безопасности обрабатываемых данных и непрерывности бизнес-процессов.

Также может сложиться ситуация, когда информационные системы, задействованные в процессе цифровой трансформации, некоторое время могут находиться в переходном состоянии, отличном от изначально сформулированного нормального режима работы. То есть, имея некий комплект проектной документации на информационную систему, мы имеем представление о том, что будет из себя представлять система по завершении работ. Также мы можем с достаточной степенью определенности понимать состояние информационной системы до начала процесса цифровой трансформации. Но то, в каком состоянии будет находиться информационная система в процессе трансформации и, что не менее важно, насколько продолжительным будет этот период, для нас может быть величиной неизвестной. Безусловно, сроки проведения работ, технические и проектные решения могут быть обозначены в проектной документации, но насколько их соблюдение будет возможно в ходе проведения работ – это достаточно проблематично спрогнозировать в современных экономических и политических реалиях.

Проблема переходного состояния сама по себе не является механической, т. е. возникающей исключительно из-за технических или организационных изменений. Сам по себе процесс перехода информационной системы из некоего одного стабильного состояния в другое представляет угрозу для информации, обрабатываемой в информационной системе, и для процессов, обеспечиваемых данной системой.

Также необходимо отметить следующий фактор.

С точки зрения действующего законодательства, а именно Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений, утвержденных постановлением Правительства от 8 февраля 2018 г. № 127 (далее – Правила), первичным источником данных для категорирования объектов критической информационной инфраструктуры является перечень бизнес-процессов предприятия. Для организации процедуры категорирования создается постоянно действующая комиссия [7].

Из сводного перечня бизнес-процессов предприятия выделяются те процессы, нарушение либо прекращение которых может повлечь возникновение ущерба жизни и здоровью граждан, предприятию либо государству в различных сферах (так называемые критические процессы).

Затем перечень критических процессов сопоставляется с перечнем имеющихся на предприятии информационных систем, и в качестве объектов КИИ, для которых будет приниматься решение о необходимости присвоения категории значимости, определяются те информационные системы, которые обеспечивают функционирование критических процессов. В зависимости от установленных комиссией по категорированию значений показателей критериев значимости объекта КИИ принимается решение о присвоении ему той или иной категории, либо об отсутствии необходимости присвоения категории, в случае если значения показателей определены ниже нижнего предела либо показатели не актуальны для данной информационной системы или организации в целом.

Субъект критической информационной инфраструктуры не реже чем один раз в 5 лет, а также в случае изменения показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры или их значений осуществляет пересмотр установленных категорий значимости или решений об отсутствии необходимости присвоения указанным объектам таких категорий.

В описанном выше примере мы рассмотрели случай, когда бизнес-процессы первого и второго уровней не претерпевают сколь бы то ни было значительных изменений, для того чтобы быть пересмотренными в рамках регулярной работы комиссии по категорированию объектов КИИ.

В то же время, как мы увидели на примере, количество информационных систем, задействованных в бизнес-процессах может измениться, а как следует из п. 3 Правил, категорированию подлежат объекты критической информационной инфраструктуры (ИС, ИТКС, АСУ), которые обеспечивают управленческие, технологические, производственные, финансово-экономические и (или) иные процессы в рамках выполнения функций (полномочий) или осуществления видов деятельности субъектов критической информационной инфраструктуры в областях (сферах), установленных пунктом 8 статьи 2 Федерального закона «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

Также, согласно исследованию [4], состояния субъектов КИИ могут быть рассмотрены в двух режимах:

- 1) статичным режим функционирования субъектов КИИ;
- 2) динамичный режим функционирования субъектов КИИ.

Субъект КИИ как система перейдет в динамичный режим, как только будут нарушены условия:

- 1) неизменность во времени количества объектов субъекта КИИ;
- 2) неизменность во времени системы межобъектных взаимосвязей на уровне рассматриваемого субъекта;
- 3) неизменность во времени системы взаимосвязей между объектами на уровне взаимодействия субъектов.

Также установлено, что при изменении функциональности одного объекта, при большинстве типов межобъектовых связей происходит изменение функциональности связанного объекта.

Обозначенные противоречия являются источником научной проблемы, связанной с отсутствием возможности (научно-методического обеспечения) управления информационной безопасностью организации в процессе цифровой трансформации.

Объектом исследования является процесс цифровой трансформации организаций.

Предметом исследования являются переходные состояния, возникающие в процессе цифровой трансформации проектных организаций нефтегазовой отрасли, а также алгоритмы и методы управления информационной безопасностью в ходе цифровой трансформации.

Цель работы состоит в формировании методики управления информационной безопасностью процесса цифровой трансформации проектных организаций нефтегазовой отрасли и/или формирования методики оценки защищенности информационной системы с учетом переходного (нестабильного) состояния информационной системы.

Научная новизна работы состоит, во-первых, в обосновании необходимости рассмотрения процесса цифровой трансформации в контексте угроз информационной безопасности с точки зрения общепринятых практик защиты информации, а также с точки зрения действующего законодательства; во-вторых, в разработке методики и формулировании алгоритмов работы с переходными состояниями цифровой трансформации для специалистов, обеспечивающих информационную безопасность объектов, задействованных в процессе цифровой трансформации или осуществляющих управление информационной безопасностью процесса цифровой трансформации.

#### **ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРОЦЕССА ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

Попытаемся рассмотреть некий абстрактный бизнес-процесс. Для этого будем использовать нотацию EPC (Event-driven Process Chain). Данная нотация описания бизнес-процессов интересна

в первую очередь тем, что позволяет отразить на одной схеме как источники данных, так и информационные системы, обеспечивающие бизнес-процесс.

Таким образом, в абстрактном понимании бизнес-процесс представляет собой некую последовательность операций с определенным набором источников данных, регламентирующих документов, информационных систем, программных продуктов и баз данных, определенными условиями начала и окончания и определенным результатом.

На рисунке 1 даже без детализации или конкретики проводимых операций видно, что из себя представляет некий исходный процесс, можно отследить источники данных, информационные системы или инструменты, используемые при проведении операций.

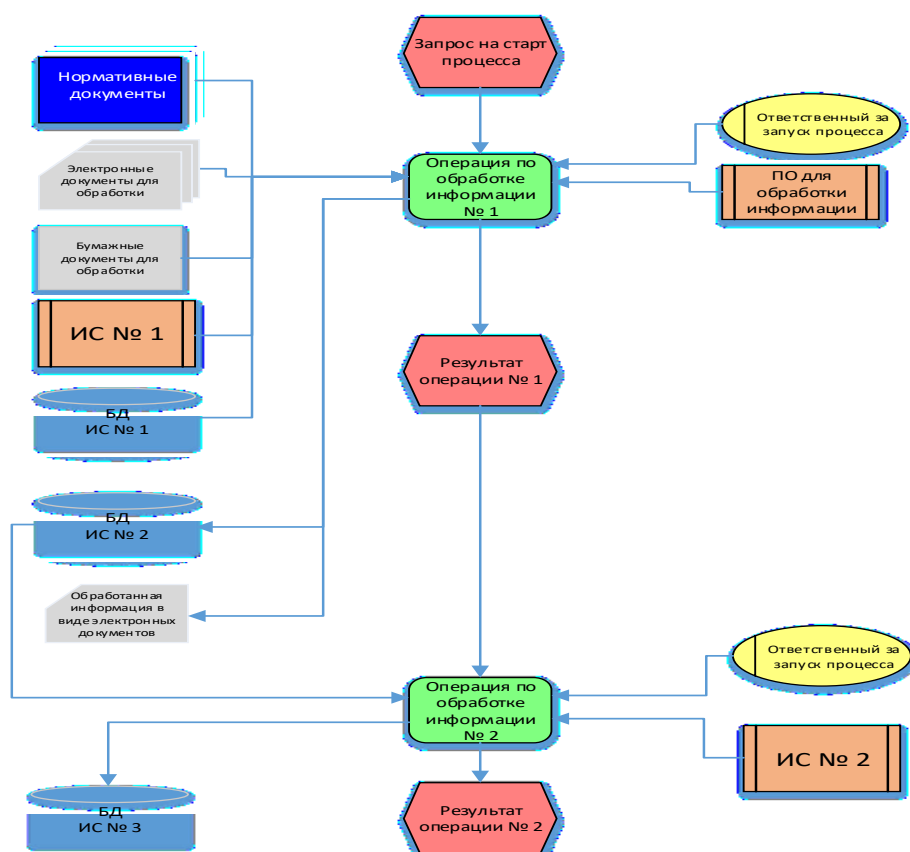


Рисунок 1 – Схема абстрактного БП «без автоматизации»

Следующим этапом попробуем расширить данный абстрактный процесс таким образом, как будто мы осуществляем процесс цифровой трансформации.

Будет добавлен ряд новых операций по обработке данных, ряд новых источников данных и мест хранения обработанных данных. Обновленная схема представлена на рисунке 2.

Непосредственно на схеме трансформированного бизнес-процесса мы можем выделить ряд проблемных моментов, связанных с цифровой трансформацией. Это группа созданных (либо подключенных) новых информационных систем и баз данных, в которых будет обрабатываться информация, необходимая для обеспечения бизнес-процесса и изменения во взаимосвязях уже существующих операций бизнес-процесса и источников данных.

Дальнейший анализ обозначенных проблемных вопросов, а также обобщенных схем абстрактных бизнес-процессов позволяет сформулировать алгоритм управления информационной безопасностью процесса цифровой трансформации.

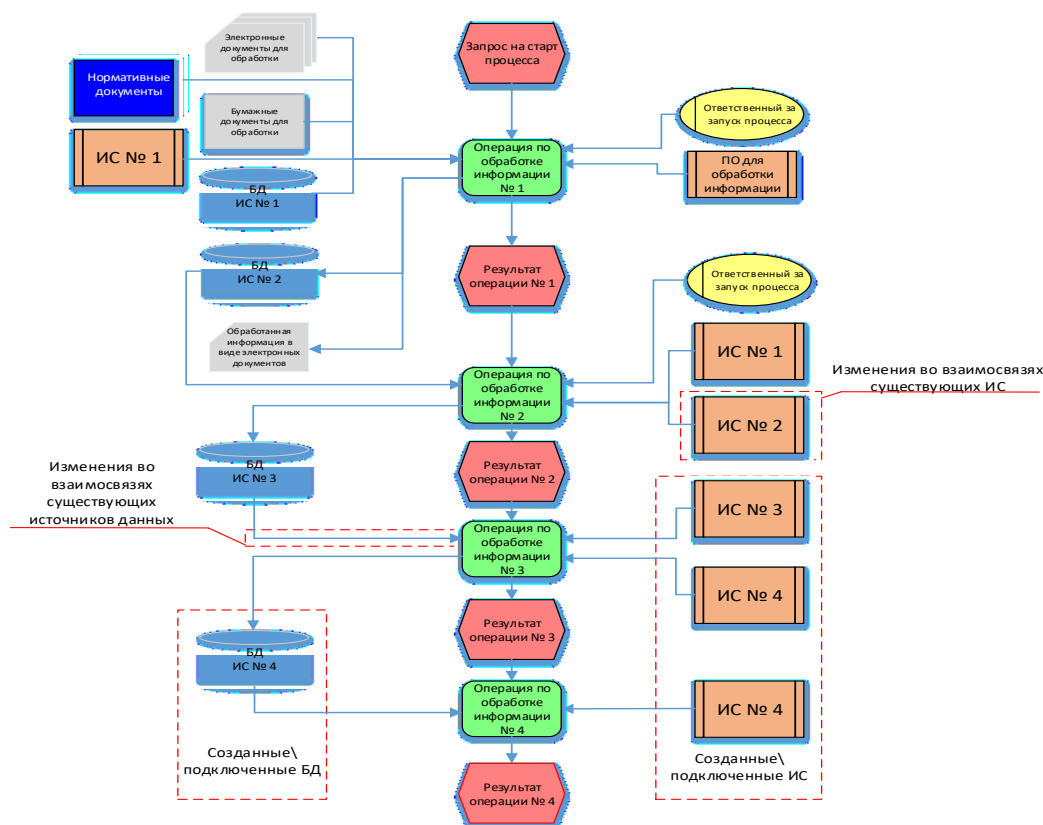


Рисунок 2 – Схема абстрактного БП после «цифровой трансформации»

### АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРОЦЕССА ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Исходя из обозначенных проблемных вопросов и свойств взаимодействий информационных систем, можно сформулировать обобщенный алгоритм действий, применение которого позволит учесть максимально возможное количество аспектов переходных состояний цифровой трансформации, учесть их влияние на защищенность информационных систем и сформулировать при необходимости дополнительные защитные меры.

Алгоритм выглядит следующим образом:

1. **Формирование перечня автоматизируемых бизнес-процессов**, их границ и текущих показателей.

2. **Определение перечня информационных систем**, обрабатывающих информацию, необходимую для функционирования бизнес-процесса на текущем этапе, их взаимосвязи, перечень входных и выходных данных, текущий уровень защищенности и иные показатели информационной системы, отслеживаемые в нормальном режиме её функционирования.

3. **Формирование схемы бизнес-процессов «как должно быть»** после окончания процесса цифровой трансформации, в том числе учитывающей:

- перечень входных данных необходимый для функционирования бизнес-процесса, категории конфиденциальности и источники;
- перечень выходных данных, категории конфиденциальности и места хранения данных;
- взаимосвязи бизнес-процессов;
- критерии эффективности обновленных процессов.

4. **Формирование перечня информационных систем**, задействованных в бизнес-процессе после окончания цифровой трансформации, в том числе учитывающей:

- взаимодействия информационных систем и каналы связи;
- способы доступа информационных систем к различным источникам данных, учетные записи и т. п.;
- места хранения информации;
- новые показатели работы системы;
- перечень потенциальных угроз для новых систем;
- перечень потенциальных «точек входа» злоумышленников в систему.

5. Формирование перечня рисков и защитных мер, которые необходимо предпринять в процессе цифровой трансформации и по его завершении.

Схема алгоритма в уже использованной ранее нотации EPC представлена на рисунке 3.

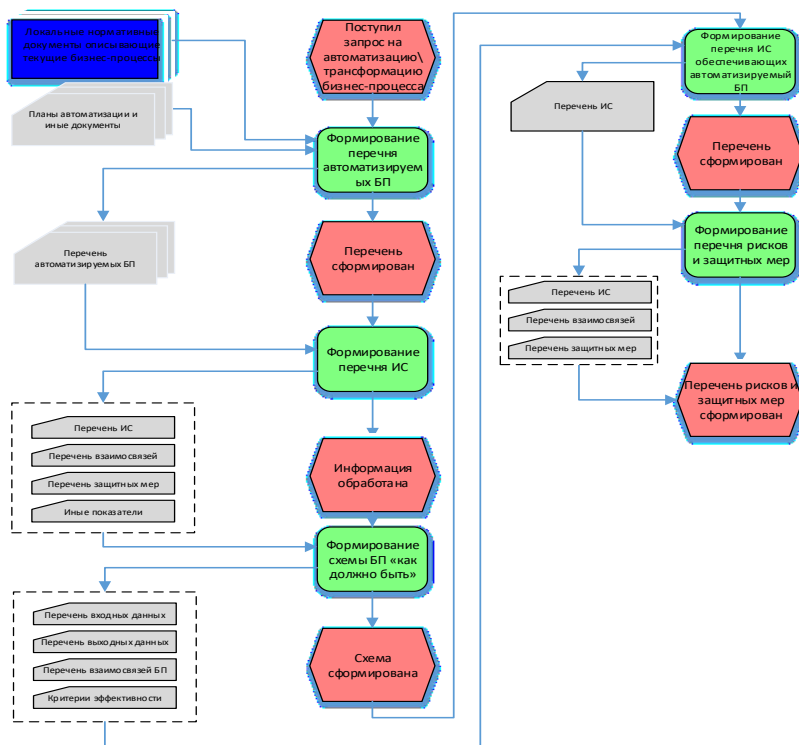


Рисунок 3 – Алгоритм управления

Описание алгоритма и его графическое представление наглядно демонстрирует, насколько обогащается имеющий набор данных об информационных системах, инфраструктурных взаимодействиях и потенциальных угрозах информационной безопасности исследуемых систем, а также какие элементы уровня организации процессов могут быть затронуты при внедрении указанного процесса.

Далее будет рассмотрен пример апробации описанного алгоритма управления информационной безопасностью систем в ходе цифровой трансформации одного из процессов предприятия.

В качестве примера был рассмотрен процесс формирования управленческой отчетности для руководителей верхнего звена. Схема бизнес-процесса представлена рисунке 4.

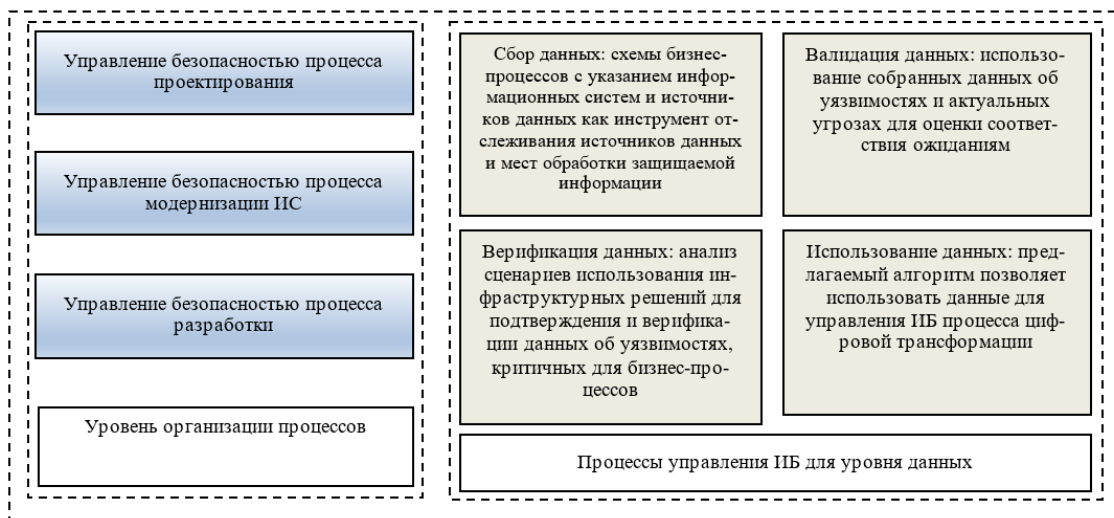


Рисунок 4 – Изменения с точки зрения уровня данных и уровня организации процессов

Для упрощения примера процесс рассматривается без детализации непосредственно алгоритмов формирования отчетности, что с точки зрения нотации EPC является допустимым. На рисунке 5 даже без детализации операций, производимых ответственным за формирование отчетности, ясно, что процесс формирования отчетности представляет собой набор операций (возможно, ручных или частично автоматизированных) по обработке данных из различных цифровых и бумажных источников по правилам, установленным в локальных нормативных документах. В завершении процесса формируется некий электронный документ, предоставляемый руководителям верхнего звена или иным заинтересованным лицам.

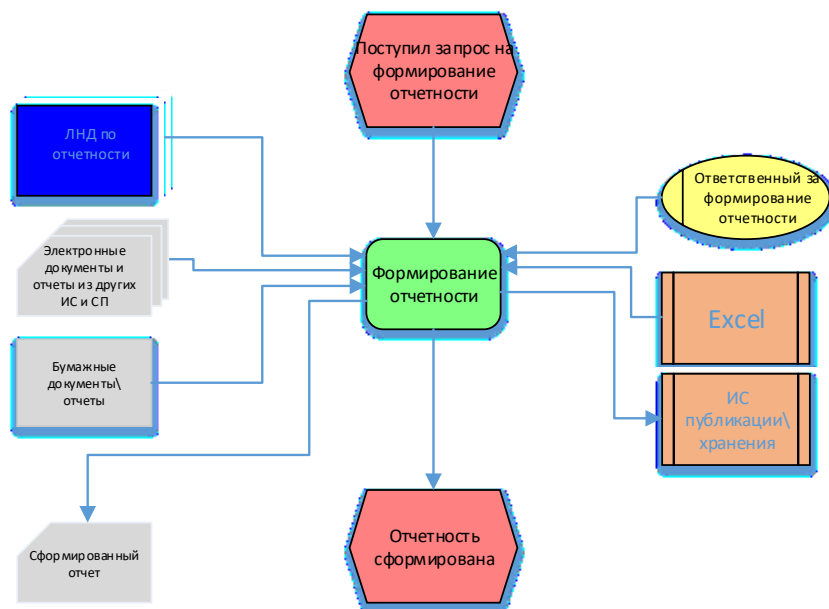


Рисунок 5 – Схема бизнес-процесса формирования отчетности до трансформации

Очевидно, что с точки зрения информационной безопасности данный процесс может представлять интерес в контексте сбора конфиденциальных сведений из различных источников в единую форму. Также будет интересен вопрос определения мест хранения итоговых отчетов, каналов их передачи, процесса архивирования и т. п., но данные вопросы относятся больше к сфере организационно-режимных мер, с учетом явного наличия только одной информационной системы, в которой хранятся отчеты, и отсутствия автоматизированных взаимодействий.

В соответствии с предложенным алгоритмом сформируем схему бизнес-процесса «как должно быть» после цифровой трансформации. Распишем предполагаемый модернизированный процесс более детально, разделив его на операции сбора информации из различных источников, её обработки и публикации. Схема представлена на рисунке 6.

На схеме мы видим, что в модернизированном процессе будут задействованы несколько новых информационных систем (ИС формирования отчетности, ИС публикации отчетности), будет осуществляться сбор информации из некоего количества существующих информационных систем (ИС № 1, ИС № N). Проанализировав схему предполагаемого бизнес-процесса, а также сформировав перечень задействованных в нем информационных систем и источников данных, мы наглядно видим, что процесс цифровой трансформации влечет за собой не только изменение ландшафта угроз для ИТ-инфраструктуры предприятия в целом (в части, например, изменения количества и конфигурации ИТ-активов, появления новых доступов и каналов связи, новых мест хранения и публикации данных), но и, например, изменение перечня объектов критической информационной инфраструктуры, а возможно, и категории имеющихся объектов.

Как минимум однозначно видно, что возникает необходимость проведения повторной работы комиссии по категорированию объектов КИИ по существующим и новым информационным системам (объектам КИИ).

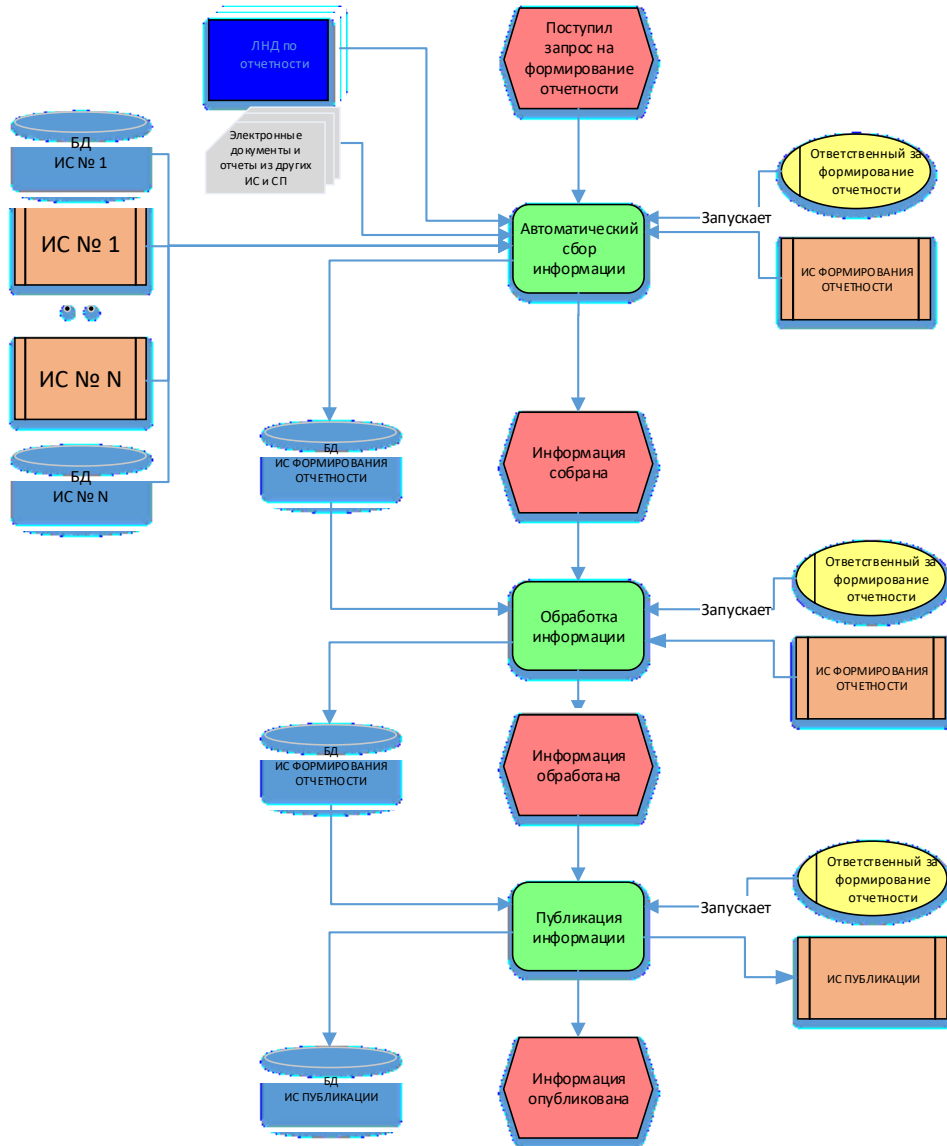


Рисунок 6 – Схема бизнес-процесса формирования отчетности после трансформации

Детальное рассмотрение выявленных изменений в бизнес-процессе позволит сформировать защитные меры и политики безопасности для обеспечения безопасности информации в процессе цифровой трансформации и после её завершения, сформировать набор знаний об актуальном ландшафте угроз ИБ, а что не менее важно, о взаимосвязи бизнес-процессов и информационных систем.

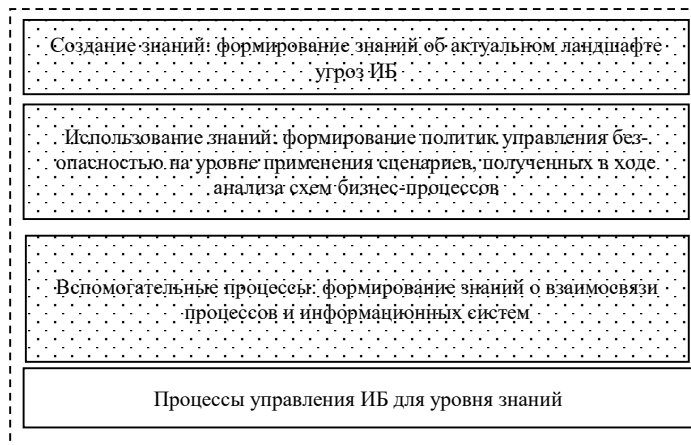


Рисунок 7 – Изменения с точки зрения уровня знаний

Для оценки эффективности процесса управления и внедренных защитных мер в первую очередь нужно определиться с теми характеристиками и метриками, которые необходимо отслеживать и использовать при принятии управленческих решений.

Для формирования метрик информационной безопасности за основу в зависимости от типа защищаемых информационных систем может быть взят как фреймворк CIS Controls v8, так и приказы ФСТЭК России по обеспечению безопасности КИИ, ИСПДн или ГИС. Все перечисленные документы определяют перечень основных направлений деятельности службы информационной безопасности (домены безопасности), по которым могут быть зафиксированы качественные и количественные характеристики информационных систем и сформирован перечень защитных мер.

Основные процессы, по которым выстраивается работа службы информационной безопасности, разделяются на направления [8]: идентификация и аутентификация (ИАФ), управление доступом (УПД), ограничение программной среды (ОПС), защита машинных носителей информации (ЗНИ), аудит безопасности (АУД), антивирусная защита (АВЗ), предотвращение вторжений (компьютерных атак) (СОВ), обеспечение целостности (ОЦЛ), обеспечение доступности (ОДТ), защита технических средств и систем (ЗТС), защита информационной (автоматизированной) системы и ее компонентов (ЗИС), планирование мероприятий по обеспечению безопасности (ПЛН), управление конфигурацией (УКФ), управление обновлениями программного обеспечения (ОПО), реагирование на инциденты информационной безопасности (ИНЦ), обеспечение действий в нестандартных ситуациях (ДНС), информирование и обучение персонала (ИПО).

У каждого из направлений есть свои данные, действия, процессы и, соответственно, метрики, отслеживание которых позволит осуществлять управление процессом цифровой трансформации. Для защиты данных мы будем вести учет ресурсов, установим DLP, создадим и будем управлять резервным копированием и т. д. Для информирования и обучения персонала в области ИБ будем проводить обучение, фишинговые рассылки, принимать обращения пользователей об инцидентах и пр. [14]. Если перевести все эти данные в метрики, то мы получаем оценку всех доменов/процессов в информационной безопасности с ее сильными и слабыми сторонами в цифрах.

Например, в рамках управления конфигурацией мы можем отслеживать процент покрытия инфраструктуры системами сканирования; в области информирования и обучения персонала – процент пользователей, прошедших внутреннее обучение по направлению ИБ и сдавших проверочное тестирование; в рамках ограничения программной среды – наличие и частота работы процедуры оценки активов, процент рабочих мест с настроенной замкнутой программной средой; в части управления конфигурацией – количество выявленных уязвимостей программного обеспечения с высокой оценкой по CVSS и т. д.

Детальный перечень отслеживаемых метрик, типовой перечень источников данных для сбора метрик, взаимосвязи между метриками, источниками данных и уровнями бизнес-процессов будут рассмотрены в следующих статьях. В дальнейшем планируется исследовать возможность формализации алгоритма управления информационной безопасностью процесса цифровой трансформации на уровне математической модели, которая будет учитывать изменения процессов. На текущем этапе можно предположить, что создание такой модели позволит нам ответить на вопрос о том, какие изменения в процессах будут существенными, а какие – незначительными.

Основное внимание будет уделено следующим проблемам:

1. Проблема эквивалентности процессов – анализ того, как взаимосвязаны уровни детализации бизнес-процессов и их изменения в ходе цифровой трансформации, как изменения в бизнес-процессах могут быть соотношены с требованиями стандартов по информационной безопасности.
2. Определение и описание формальных ограничений процессов и ограничения математической модели в контексте информационной безопасности с использованием математических моделей.
3. Определение значимости и существенности изменения: оценка изменений в процессах на основе созданной модели для выявления их значимости для информационной безопасности.

Детальное рассмотрение обозначенных проблем позволит глубже понять взаимосвязь между изменениями в бизнес-процессах и управлением информационной безопасностью в условиях цифровой трансформации.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исследование сосредоточено на формировании пригодных в практике рекомендаций и алгоритмов управления информационной безопасностью в процессе цифровой трансформации с точки зрения как традиционных подходов к управлению рисками и изменениями, так и с точки зрения комплексного подхода, учитывающего взаимосвязи бизнес-процессов и информационных систем, а также влияние изменений на смежные процессы и системы, а также организацию в целом.

Перспективой исследования является формирование алгоритма управления информационной безопасностью переходных состояний цифровой трансформации, привязка данного алгоритма

к переходным состояниям, измеримым метрикам информационных систем и их параметрам. Подобная привязка позволит учитывать исходное состояние информационной системы до начала процесса цифровой трансформации, а также задавать целевые значения, что, в свою очередь, позволит сделать процесс цифровой трансформации более прозрачным с точки зрения информационной безопасности.

#### Список источников

1. Апатова, Н. В. Управление процессами цифровой трансформации бизнеса / Н. В. Апатова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Экономика и управление. – 2022. – Т. 8 (74), № 2. – С. 3–8.
2. Махалина, О. М. Цифровизация бизнеса увеличивает затраты на информационную безопасность / О. М. Махалина, В. Н. Махалин // Управление. – 2020. – № 1. – С. 134–140.
3. Зайковский, В. Э. Риски цифровой трансформации промышленного предприятия / В. Э. Зайковский, А. В. Карев, А. А. Малик, М. А. Штайгер // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18, № 5. – С. 48–55. URL: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-5-48-55>.
4. Бутусов, И. В. Предупреждение инцидентов информационной безопасности в автоматизированных информационных системах / И. В. Бутусов, А. А. Романов // Вопросы кибербезопасности. – 2020. – № 4 (92). – С. 45–51.
5. Баранов, В. В. Анализ модели информационного обеспечения процессов и систем при реализации многоагентного интеллектуального взаимодействия / В. В. Баранов, Е. А. Максимова, О. С. Лаута // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. – № 7. – С. 52–61.
6. Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержден президентом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. № 16).
7. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ (последняя редакция).
8. Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: приказ ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239 (в ред. Приказов ФСТЭК России от 9 августа 2018 г. № 138, от 26 марта 2019 г. № 60, от 20 февраля 2020 г. № 35).
9. Ельчанинова, Н. Б. Защита критической информационной инфраструктуры как новый институт правового обеспечения информационной безопасности / Н. Б. Ельчанинова // Информационное общество. – 2020. – № 2. – С. 58–65.
10. Шаго, Ф. Н. Методика оценки эффективности системы менеджмента информационной безопасности по времени реакции системы на инциденты информационной безопасности / Ф. Н. Шаго // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 4 (92). – С. 115–123.
11. Исаков, А. Ю. Проактивный поиск внутренних угроз информационной безопасности в условиях ограничений / А. Ю. Исаков, К. А. Гайдук // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 4 (56). – С. 105–119.
12. Токарев, М. Н. Импортзамещение программного обеспечения / М. Н. Токарев, А. Н. Вершинин // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 6–3 (81). – С. 156–162. – DOI: 10.24412/2500-1000-2023-6-3-156-162.
13. Федоров, А. В. Обеспечение информационной безопасности в органах исполнительной власти. Проблемы и решения / А. В. Федоров, А. Г. Жихарев, Д. М. Кальченко // Научный результат. Информационные технологии. – 2024. – Т. 9, № 1. – С. 19–28. – DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-1-0-3.
14. Морозов, В. Е. Комплексные решения для минимизации внутренних угроз информационной безопасности / В. Е. Морозов, Н. Г. Милославская // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 5(63). – С. 67–78. – DOI: 10.21681/2311-3456-2024-5-67-78. – EDN PBSASV.
15. Аналитический отчет Компании Positive Technologies. Как изменились атаки на российские компании за два года. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/kak-izmenilis-ataki-na-rossiyskie-kompanii-za-dva-goda/> (дата обращения: 10.01.2025).
16. Актуальные киберугрозы: III квартал 2024 года. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/aktualnye-kiberugrozy-iii-kvartal-2024-goda/> (дата обращения: 10.01.2025).
17. Аналитический отчет. Утечки информации в мире и России за первое полугодие 2024 года. – URL: <https://www.infowatch.ru/analytics/analitika/utechki-informatsii-v-mire-i-rossii-za-pervoye-polugodiye-dve-tysyachi-dvadsat-chetvertogo-goda/> (дата обращения: 12.12.2024).

#### References

1. Apatova, N. V. Managing the processes of digital business transformation. *Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Economics and management*, 2022, vol. 8 (74), no. 2, pp. 3–8 (In Russ.).
2. Makhalina, O. M., Makhalin, V. N. Digitalization of business increases the cost of information security. *Management*, 2020, no. 1, pp. 134–140 (In Russ.).
3. Zaikovskiy, V. E., Karev, A. V., Malik, A. A., Steiger, M. A. Risks of digital transformation of an industrial enterprise. *Problems of Risk Analysis*, 2021, vol. 18, no. 5, pp. 48–55. Available at: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-5-48-55> (In Russ.).
4. Butusov, I. V., Romanov, A. A. Prevention of information security incidents in automated information systems. *Cybersecurity Issues*, 2020, no. 4 (92), pp. 45–51 (In Russ.).

5. Baranov, V. V., Maksimova E. A., Lauta O. S. Analysis of the information support model for processes and systems in the implementation of multi-agent intelligent interaction. *Industrial Automated Control Systems and Controllers*, 2019, no. 7, pp. 52–61 (In Russ.).

6. *Passport of the national program “Digital Economy of the Russian Federation”, approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects (Protocol No. 16 dated December 24, 2018)* (In Russ.).

7. *Federal Law “On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation” dated July 26, 2017 no. 187-FZ (the latest editorial office)* (In Russ.).

8. On approval of the requirements for ensuring the security of Significant objects of the Critical information infrastructure of the Russian Federation: Order of the FSTEC of Russia dated December 25, 2017 no. 239 (as amended Orders of the FSTEC of Russia dated August 9, 2018 no. 138, March 26, 2019 no. 60, February 20, 2020 no. 35) (In Russ.).

9. Yelchaninova, N. B. Protection of critical information infrastructure as a new institute for legal support of information security. *Journal Information Society*, 2020, no. 2, pp. 58–65 (In Russ.).

10. Shago, F. N. Methodology for evaluating the effectiveness of an information security management system based on the system's response time to information security incidents. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 4 (92), pp. 115–123 (In Russ.).

11. Iskhakov, A. Yu., Gaiduk, K. A. Proactive search for internal threats to information security in conditions of restrictions. *Cybersecurity Issues*, 2023, no. 4 (56), pp. 105–119 (In Russ.).

12. Tokarev, M. N., Vershinin, A. N. Import substitution of software. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2023, no. 6–3 (81), pp. 156–162. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-6-3-156-162 (In Russ.).

13. Fedorov, A. V., Zhikharev, A. G., Kalchenko, D. M. Ensuring information security in executive authorities. Problems and solutions. *A scientific Result. Information Technology*, 2024, vol. 9, no. 1, pp. 19–28. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-1-0-3 (In Russ.).

14. Morozov, V. E., Miloslavskaya N. G. Integrated solutions for minimizing internal threats to information security. *Cybersecurity Issues*, 2024, no. 5 (63), pp. 67–78. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-5-67-78. EDN PBSASV (In Russ.).

15. *Analytical report of Positive Technologies Company. How attacks on Russian companies have changed in two years*. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/kak-izmenilis-ataki-na-rossiyskie-kompanii-za-dva-goda/> (accessed 10.01.2025) (In Russ.).

16. *Current cyber threats: The third quarter of 2024*. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/aktualnye-kiberugrozy-iii-kvartal-2024-goda/> (accessed 10.01.2025) (In Russ.).

17. *Analytical report. Information leaks in the world and Russia in the first half of 2024*. Available at: <https://www.infowatch.ru/analytics/analitika/utechki-informatsii-v-mire-i-rossii-za-pervoye-polugodiye-dve-tsyachidvadsat-chetvertogo-goda> (accessed 12.12.2024) (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 24.01.2025; одобрена после рецензирования 26.02.2025; принята к публикации 07.03.2025.

The article was submitted 24.01.2025; approved after reviewing 26.02.2025; accepted for publication 07.03.2025.

УДК 004.056

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЯХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**Андрусенко Юлия Алексеевна**, Северо-Кавказский федеральный университет, Российская Федерация, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,  
старший преподаватель кафедры вычислительной математики и кибернетики, ORCID: 0000-0002-3392-7270, e-mail: yulihka85@mail.ru

**Лалин Виталий Геннадьевич**, Северо-Кавказский федеральный университет, Российская Федерация, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,  
доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики, кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-0611-7002, e-mail: vitlx@yandex.ru

**Дудова Мира Сергеевна**, Северо-Кавказский федеральный университет, Российская Федерация, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,  
студент, ORCID: 0009-0005-2164-2429, e-mail: miradudova@yandex.ru

**Бородулин Иван Владимирович**, Северо-Кавказский федеральный университет, Российская Федерация, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,  
студент, ORCID: 0009-0003-0637-9314, e-mail: ivan7789496@mail.ru

**Русских Егор Аркадьевич**, Московский финансово-юридический университет, Российская Федерация, 117342, г. Москва, ул. Введенского, 1А,  
аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики, ORCID: 0009-0009-4235-2497, e-mail: Russkikh.egor77@yandex.ru

В данном исследовании рассматриваются риски информационной безопасности в системах машинного обучения, связанные с атаками уклонения, отравления и извлечения на нейронные сети. Основное внимание уделяется двум алгоритмам атак: FGSM-атаке и атаке SVM Poisoning. Для оценки их воздействия применяются как качественные (SWOT-анализ), так и количественные (метод Монте-Карло) методы, позволяющие выявить уязвимости моделей и степень их деградации после атаки. Ключевые результаты показывают, что FGSM-атаки сохраняют высокую эффективность благодаря своей вычислительной простоте, в то время как отравление данных оказывает долгосрочное воздействие. Метод Монте-Карло демонстрирует частоту ошибок модели в реальных условиях, а SWOT-анализ выявляет сильные и слабые стороны атак. Для оценки последствий атак предлагается использовать библиотеку Scikit-learn, которая позволяет сравнивать точность моделей на чистых и атакованных данных, количественно измеряя потери в производительности. Это дает возможность не только оценить ущерб, но и разработать более устойчивые к состязательным атакам нейронные сети. Статья представляет практическую ценность для специалистов в области кибербезопасности, разработчиков моделей машинного обучения и научных сотрудников, занимающихся вопросами защиты данных и алгоритмов от злонамеренных воздействий.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, машинное обучение, риски информационной безопасности, атаки на машинное обучение, методы оценки рисков, SWOT-анализ; метод Монте-Карло

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-30007, <https://rscf.ru/project/25-71-30007/>.

**METHODS FOR ASSESSING INFORMATION SECURITY RISKS IN MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES**

**Andrusenko Yulia A.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Senior Lecturer of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, ORCID: 0000-0002-3392-7270, e-mail: yulihka85@mail.ru

**Lalin Vitalii G.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-0611-7002, e-mail: vitlx@yandex.ru

**Dudova Mira S.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation, student, ORCID: 0009-0005-2164-2429, e-mail: miradudova@yandex.ru

**Borodulin Ivan V.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation, student, ORCID: 0009-0003-0637-9314, e-mail: ivan7789496@mail.ru

**Russkikh Yegor A.**, Moscow University of Finance and Law, 1A Vvedenskiy St., Moscow, 117342, Russian Federation, postgraduate student of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, ORCID: 0009-0009-4235-2497, e-mail: Russkikh.egor77@yandex.ru

This study examines information security risks in machine learning systems due to evasion, poisoning and extraction attacks on neural networks. The focus is on two attack algorithms: the FGSM attack and the SVM Poisoning attack. Both qualitative (SWOT analysis) and quantitative (Monte Carlo method) methods are applied to assess their impact, in order to identify the vulnerabilities of the models and the extent of their degradation after the attack. Key results show that FGSM attacks remain highly effective due to their computational simplicity, while data poisoning has a long-term impact. The Monte Carlo method demonstrates the error rate of the model under real-world conditions, while SWOT analysis reveals the strengths and weaknesses of the attacks. To assess the impact of attacks, we propose to use the Scikit-learn library, which allows us to compare the accuracy of models on clean and attacked data, quantifying the loss in performance. This makes it possible not only to assess the damage, but also to design neural networks that are more resistant to adversarial attacks. The paper is of practical value to cybersecurity experts, machine learning model developers, and researchers involved in protecting data and algorithms from malicious attacks.

**Keywords:** information security; machine learning; information security risks; attacks on machine learning; risk assessment methods; SWOT analysis; Monte Carlo method

**Financial support:** the research was supported by the Russian Science Foundation grant № 25-71-30007, <https://rscf.ru/project/25-71-30007/>.

## ВВЕДЕНИЕ

Оценка рисков информационной безопасности является неотъемлемой частью управления безопасностью организаций в условиях роста кибер-угроз [1]. В последние годы наблюдается активное внедрение технологий машинного обучения в различные области, что значительно изменяет ландшафт информационной безопасности. Эти технологии не только открывают новые векторы для кибератак, но и предоставляют возможности для улучшения защиты данных, повышая эффективность обнаружения угроз и реакции на них. В этой связи становится крайне важным наличие методов, которые позволяют объективно и своевременно оценивать риски, связанные с использованием таких технологий. Риски информационной безопасности могут быть качественными и количественными. Количественный риск выражается в числовых показателях. Качественная оценка риска раскрывает скрытые угрозы и уязвимости, в то время как количественная оценка позволяет формализовать степень риска и соответствующие меры для его точной минимизации. Большое внимание уделяется учету динамизма и изменчивости угроз при проведении оценки риска, отсюда постоянная необходимость в пересмотре методов и подходов к оценке. С постоянным изменением технологий, а также кибер-угроз баланс между проактивностью и реагированием на атаки стал очень важным, использование методов оценки риска позволяет предотвращать потенциальные инциденты и облегчать последствия.

## ВИДЫ УГРОЗ, УЯЗВИМОСТЕЙ И АТАК

Одним из важнейших аспектов оценки рисков является определение угроз и уязвимостей. В классической модели оценки рисков угрозы делятся на три категории: угрозы внешние (например, атаки хакеров), угрозы внутренние (ошибки сотрудников или проблемы с процессами) и угрозы, связанные с естественными факторами (например, природные катастрофы). Уязвимости, в свою очередь, могут быть как техническими, так и организационными – от проблем с программным обеспечением до человеческих ошибок [2]. Современные нейронные сети, особенно те, которые используются в задачах классификации, распознавания изображений или медицинской диагностики, становятся мишенью для различных типов атак. Одним из известных типов являются состязательные атаки [3], при которых небольшие изменения в данных могут привести к ошибочным результатам классификации или прогнозирования нейронной сети. Наиболее распространенными типами атак являются атаки уклонения. Одним из алгоритмов данного типа является *FGSM (Fast Sign Gradient Method)*, который внедряет в данные шум, направление которого совпадает с направлением градиента функции потерь относительно данных. В результате воздействия шумов модель ошибается в предсказании и описывается формулой (1):

$$x' = x + k \cdot \text{sign}(\nabla_x J(x, y)), \quad (1)$$

где  $x'$  – состязательный пример;

$x$  – входной экземпляр;

$y$  – результат классификации;

$J(x, y)$  – функция потерь;

$\nabla_x J(x, y)$  – градиент функции потерь;

$k$  – коэффициент возмущения.



Рисунок 1 – Последствия атаки

Следующий рассматриваемый алгоритм атак уклонения – *DeepFool*. Её цель – минимизировать изменения в данных, которые могут привести к изменению решения классификатора. Атака фокусируется на поиске минимального смещения от границы принятия решения бинарного классификатора (рис. 2).

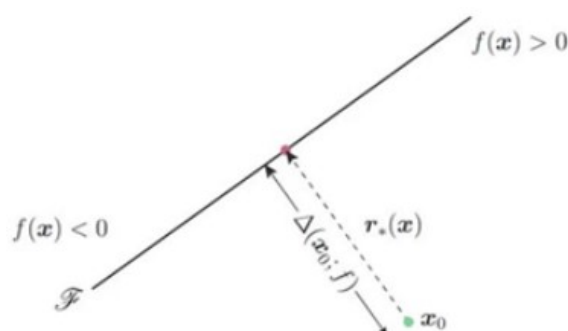


Рисунок 2 – Визуализация атаки *DeepFool*

Также встречается атака *JSMA*, использующая градиенты для определения значимости каждого пикселя на изображении, чтобы понять, какие пиксели нужно изменить для достижения нужного результата (например, для изменения классификации). Этот метод основан на анализе важности каждого признака и нацеливается на минимальное вмешательство для изменения классификации:

$$label(x) = \arg \max F(x), \tag{2}$$

где  $F(x)$  – модель классификации.

Таблица 1 – Таймлайн атаки уклонения

Этап	Действие	Описание
1	Подготовка данных	Загрузка и подготовка данных
2	Обучение модели	Обучение на подготовленных данных
3	Атака	<i>FGSM</i> : использование градиентов для быстрого изменения данных. <i>DeepFool</i> : минимальные изменения для перехода к неправильному классу. <i>JSMA</i> : изменение наиболее важных пикселей для минимизации вмешательства, но создания ошибки
4	Тестирование (с атакой)	Модель проверяется на тестовых данных, учитывая атакованные
5	Предсказание (с ошибкой из-за атаки)	Модель ошибается в предсказании

Другим типом атак являются атаки отравления [5], когда атакующие пытаются внедрить ошибочные или ложные данные в набор для обучения, чтобы повлиять на процесс обучения модели. Одним из алгоритмов такого типа является *Feature Collision*, идея которой заключается в манипулировании данными таким образом, чтобы признаки двух различных классов совпадали или сильно пересекались. Это может быть сделано через изменение признаков или создание искусственных примеров, которые заставляют модель ошибочно классифицировать один класс как другой. Математическая составляющая такова [11]: пусть  $x_1$  и  $x_2$  – это признаки двух разных классов. Атака направлена на минимизацию расстояния между ними:

$$\min_{x_1, x_2} \|x_1 - x_2\|. \tag{3}$$

Это приводит к  $x_1 \approx x_2$  и затрудняет их различение моделью. В случае отравления алгоритмом *SVM Poisoning* цель атаки – вмешательство в обучающие данные с целью ухудшения точности классификации модели. Нападающий изменяет часть данных (например, изменяет метки или признаки), что заставляет модель *SVM* ошибочно выбирать разделяющую гиперплоскость. Математически такую атаку можно представить таким образом [12]: пусть  $x_c$  – это точка, которую атакующий добавляет в обучающий набор. Цель состоит в максимизации ошибки классификации на валидационном наборе  $D_{val} = \{(x_k, y_k)\}$ :

$$\max_{x_c} L(x_c) = \sum_k \max(0, 1 - y_k f(x_c, x_k)), \quad (4)$$

где  $f(x_c, x_k)$  – функция, определяющая решение *SVM* для пары данных.

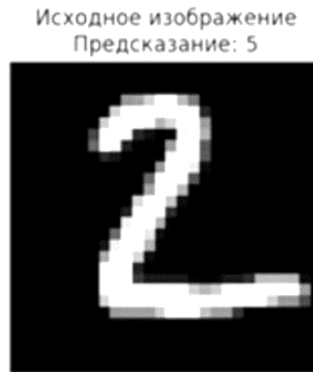


Рисунок 3 – Последствия атаки

Еще одним алгоритмом атак отравления является *Backdoor Attack*, в результате которой происходит внедрение скрытого поведения в модель машинного обучения, которое может быть активировано определенным «триггером», позволяющим атакующему контролировать вывод модели. Математическая составляющая данной атаки [13]: пусть  $x$  – это входные данные, а  $z$  – это триггер. Модифицированные данные  $x' = x + z$  приводят к целевому выводу  $y_{target}$ :

$$f(x + z) = y_{target}, \quad (5)$$

где  $f$  – функция, реализующая модель машинного обучения.

Таблица 2 – Таймлайн атак отравления

Этап	Действие	Описание
1	Подготовка данных	Загрузка и подготовка данных
2	Обучение модели (атака)	На этапе обучения вносятся изменения в тренировочные данные для обмана модели
3	Тестирование (с атакой)	Модель проверяется на тестовых данных с нарушенной выборкой
4	Предсказание (с ошибкой из-за атаки)	Модель ошибается в предсказании

Немаловажными также считаются атаки, направленные на извлечение модели, при которых злоумышленник пытается воспроизвести функциональность или параметры целевой модели машинного обучения без прямого доступа к её внутренним данным. Такие атаки могут быть направлены на модели с черным ящиком, где у атакующего есть возможность только отправлять запросы и получать ответы от модели. В случае использования алгоритма *Copyscat CNN* атакующий генерирует случайные входные данные и получает от целевой модели соответствующие предсказания. Эти данные используются для обучения «копии» модели, что позволяет приблизиться к функциональности оригинала. Другой алгоритм, именующийся как *Knockoff Nets*, позволяет злоумышленнику использовать запросы к целевой модели с различными входными данными, чтобы собрать достаточно информации для обучения модели-заместителя, имитирующей поведение оригинала. Последний алгоритм *MiFace* используется для обмана модели машинного обучения с биометрическими данными – взломщик использует генеративные модели для создания изображений, которые выглядят как реальные лица, но на самом деле являются искусственно сгенерированными.

Таблица 3 – Таймлайн атак извлечения модели

Этап	Действие	Описание
1	Подготовка данных	Сбор входных данных
2	Запросы к модели (атакующий)	Отправка запросов к модели
3	Обучение модели-заместителя	Обучение модели на выходных данных
4	Тестирование модели-заместителя	Оценка точности модели-заместителя
5	Предсказание (с ошибкой из-за атаки)	Модель-заместитель ошибается на сложных входах

После рассмотрения типов атак на машинное обучение можно представить обобщенную модель нейронной сети с атаками.

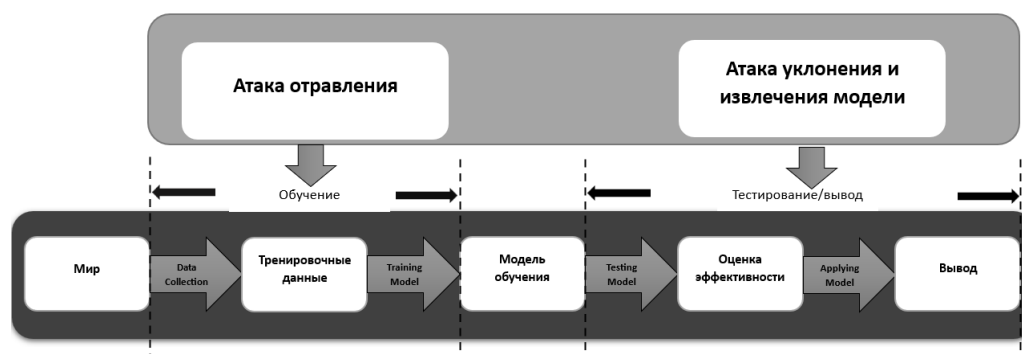


Рисунок 4 – Обобщенная модель нейронной сети с атаками

### КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ ИБ

Качественная оценка рисков не предполагает приписывания количественных или денежных значений объектам оценки. Вместо этого используется система рейтингования, которая позволяет классифицировать риски по шкале, например, трехбалльной (низкий, средний, высокий), пятибалльной или десятибалльной (от 0 до 10). Для сбора данных в рамках качественной оценки рисков активно применяются такие методы, как опросы, интервью, анкетирование и личные встречи [6]. Важно, чтобы для проведения качественной оценки привлекались специалисты с опытом и компетенциями в соответствующих областях, где рассматриваются угрозы. Одним из популярных методов в рамках качественной оценки является *SWOT*-анализ (от англ. *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) [7], который помогает выявить сильные и слабые стороны системы, а также возможности и угрозы, с которыми она может столкнуться. Рассматривая *SWOT*-анализ *FGSM*-атаки можно заметить, что они сочетают практическую ценность с потенциальными рисками. Их ключевое преимущество – простота реализации: генерация состязательных примеров требует всего одного шага вычисления градиента, что делает метод удобным инструментом для оценки уязвимости моделей. Однако эффективность атаки существенно зависит от параметра  $\epsilon$  (количества шумов), а современные методы защиты демонстрируют до 80 % устойчивости против таких атак [8].

Таблица 4 – *SWOT*-анализ атак уклонения

Алгоритм атаки	Сильные стороны	Слабые стороны	Возможности	Угрозы
<i>FGSM</i>	Быстрое время нахождения атакующего примера, легкость реализации	Большое количество возмущений, небольшой показатель ошибочной классификации	Быстрая атака, используется как первая линия атаки для исследования слабых мест модели	Легко обнаруживается, если защита эффективна, атака может быть предотвращена
<i>DeepFool</i>	Эффективна при создании с минимальным количеством возмущений, высокий показатель ошибочной классификации	Требует больше вычислительных ресурсов, сложность реализации	Эффективна для более сложных моделей, используется для атак на защищенные модели	Медленные системы могут быть уязвимы. Защита обнаруживает использование ресурсов
<i>JSM</i>	Получение показателя влияния каждого входного параметра на результат классификации	Большое время вычислений, трудоемкость из-за перебора всех входных параметров	Можно использовать для целевых атак с точной настройкой параметров	Высокая вычислительная нагрузка. Новые методы защиты могут обнаружить атаку

Таблица 5 – SWOT-анализ атак отравления

Алгоритм атаки	Сильные стороны	Слабые стороны	Возможности	Угрозы
<i>Feature Collision</i>	Эффективно создаёт пересечение признаков разных классов	Требует большого вмешательства в признаки данных	Может использоваться для создания уязвимостей в модели	Могут быть быстро выявлены при мониторинге характеристик
<i>SVM Poisoning</i>	Эффективна при манипуляции метками и нарушении гиперплоскости	Требует точных знаний о модели SVM и её обучающих данных	Может атаковать SVM, манипулируя метками или признаками	Защита SVM может минимизировать влияние атаки
<i>Backdoor Attack</i>	Позволяет встраивать скрытую уязвимость в модель	Требует точной настройки триггера для активации атаки	Эффективна для обмена модели на определённые входы	Защита от задних дверей может затруднить атаку

Таблица 6 – SWOT-анализ атак извлечения модели

Алгоритм атаки	Сильные стороны	Слабые стороны	Возможности	Угрозы
<i>Knockoff Nets</i>	Быстрая и эффективная атака на извлечение модели	Требуется большое количество запросов к модели	Позволяет атаковать, чтобы создать копию модели без её доступа	Модель-заместитель может быть менее точной
<i>Copycat CNN</i>	Использование той же структуры модели, что и у оригинала	Может не всегда точно копировать поведение модели	Может использоваться для создания похожих моделей	Появление защитных механизмов может снизить эффективность
<i>MiFace</i>	Специализируется на извлечении признаков для атак	Требуется большое количество данных и вычислительных ресурсов	Применимо для атак на системы распознавания лиц	Может быть легко выявлена в системах с высоким уровнем защиты

Количественная оценка рисков используется, когда угрозы и связанные с ними риски можно выразить в конкретных числовых величинах, таких как денежные суммы, проценты, время или ресурсы (например, трудозатраты) [6]. Методы количественной оценки позволяют более точно прогнозировать возможные последствия рисков для системы. Например, метод Монте-Карло – метод, который используется для оценки вероятности различных событий, обычно через многократное случайное повторение эксперимента. В контексте атак на нейронные сети его можно использовать для оценки того, как часто атака будет успешной. Этот метод помогает оценить устойчивость модели к атакам и понять, насколько часто она подвержена ошибкам в реальных условиях [9]. Для оценивания рисков в нейронной сети не подойдут атаки извлечения модели, так как данный метод основан на идее многократного повторения случайных испытаний для получения приближенного ответа. Результат атаки такого типа не является случайным или вероятностным, а скорее детерминированным, поэтому для анализа были выбраны атаки уклонения и отравления. При оценке методом Монте-Карло для атаки FGSM была выбрана мощность шума, равная 30 процентам, для атаки SVM Poisoning также задана эквивалентная интенсивность отравления данных.

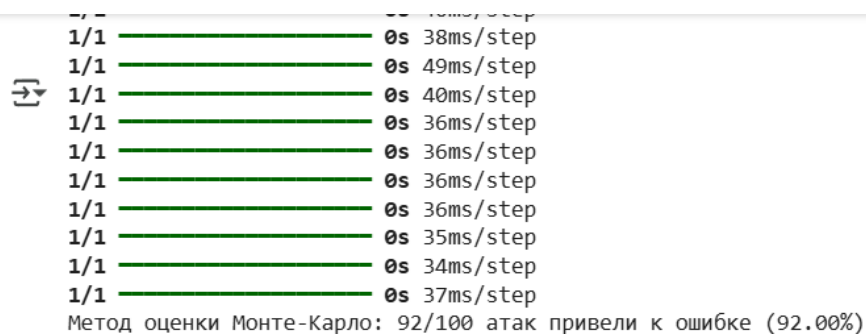


Рисунок 5 – Оценка атаки FGSM методом Монте-Карло

```

1/1 ██████████ 0s 37ms/step
1/1 ██████████ 0s 37ms/step
1/1 ██████████ 0s 37ms/step
1/1 ██████████ 0s 48ms/step
1/1 ██████████ 0s 42ms/step
1/1 ██████████ 0s 44ms/step
1/1 ██████████ 0s 41ms/step
1/1 ██████████ 0s 39ms/step
Метод оценки Монте-Карло: 20/100 атак привели к ошибке (20.00%)
    
```

Рисунок 6 – Оценка атаки *SVM Poisoning* методом Монте-Карло

*FGSM* выглядит более мощной атакой, потому что может легко «обмануть» нейронную сеть даже небольшими искажениями в виде шума, в свою очередь, атака *SVM Poisoning* заставляет модель «запоминать» ложные паттерны [10], что может привести к большому «отравлению» данных при переобучении. Можно сделать вывод, что первая атака опасна для систем, работающих в реальном времени, а вторая – для нейросетей с регулярным переобучением.

### ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ НА АТАКОВАННЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ SCIKIT-LEARN

После атак на нейронную сеть необходимо оценить количество потерь, для этого можно использовать библиотеку *Python Scikit-learn*, которая позволяет вычислить точности моделей на чистых и атакованных данных для их сравнения. Результат даст представление о том, насколько сильно атака повлияла на производительность модели. В первую очередь рассматривается устойчивость нейронной сети после атаки *FGSM*. Вначале происходит импорт функции для расчета точности модели из библиотеки *Scikit-learn*:

```
from sklearn.metrics import accuracy_score
```

Далее модель предсказывает классы для тестового набора изображений, и с помощью функции *np.argmax* извлекается класс с максимальной вероятностью для каждого изображения. На следующем этапе происходит создание атакованных изображений, используя *FGSM*. В цикле для каждого изображения из тестового набора генерируется искаженная версия изображения с добавлением шума интенсивностью 0,3. После этого модель предсказывает классы для атакованных изображений, снова используя *np.argmax*. Далее рассчитывается точность модели как на чистых, так и на атакованных данных, при помощи функции *accuracy\_score*. Для этого сравниваются предсказания модели с истинными метками для оригинальных и атакованных изображений.

```

from sklearn.metrics import accuracy_score

# Прогнозирование на оригинальных данных
original_preds = model.predict(test_images)
original_preds = np.argmax(original_preds, axis=1)

# Прогнозирование на атакованных данных
adv_images = np.array([fgsm_attack(img, lbl, model, epsilon=0.3) for img, lbl in zip(test_images, test_labels)])
adv_preds = model.predict(adv_images)
adv_preds = np.argmax(adv_preds, axis=1)

# Оценка точности
accuracy_original = accuracy_score(test_labels, original_preds)
accuracy_adv = accuracy_score(test_labels, adv_preds)

print(f"Точность: {accuracy_original}")
print(f"Точность после атаки: {accuracy_adv}")
    
```

313/313 ██████████ 2s 6ms/step  
 313/313 ██████████ 2s 6ms/step  
 Точность: 0.9914  
 Точность после атаки: 0.128

Рисунок 7 – Оценка устойчивости модели к атаке *FGSM*

После применения модели к оригинальным изображениям из тестового набора точность классификации составила 99,14 %. Это свидетельствует о том, что модель работает с высокой точностью на чистых данных. Однако, когда на тестовые изображения была применена *FGSM*-атака с коэффициентом искажения 0,3, точность модели упала до 12,8 %. Это резкое снижение указывает на то, что модель сильно уязвима к атаке *FGSM*. Рассматривая *SVM Poisoning*, можно заметить, что точность модели после атаки изменилась незначительно. Это говорит о том, что общая точность упала лишь на десятые значения процента, в то время как классовая точность (рассмотренная в методе Монте-Карло) сократилась на 20 %. Эффект от данной атаки проявится лишь через множество переобучений модели нейронной сети, когда общая точность начнет уменьшаться из-за количества «отравленных» данных.

```

import numpy as np
from sklearn.metrics import accuracy_score

# Отравление данных
poison_mask = (train_labels == 5) & (np.random.rand(len(train_labels)) < 0.3)
train_labels_poisoned = train_labels.copy()
train_labels_poisoned[poison_mask] = 6

# Обучение модели на отравленных данных
model.fit(train_images, train_labels_poisoned, epochs=5, verbose=0)

# Оценка точности
original_preds = model.predict(test_images).argmax(axis=1)
poisoned_preds = model.predict(test_images).argmax(axis=1)

print(f"Точность: {accuracy_score(test_labels, original_preds)}")
print(f"Точность после атаки: {accuracy_score(test_labels, poisoned_preds)}")

```

313/313 ————— 2s 7ms/step  
313/313 ————— 2s 7ms/step  
Точность: 0.9541  
Точность после атаки: 0.95

Рисунок 8 – Оценка устойчивости модели к атаке «отравления»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование посвящено анализу методов оценки рисков информационной безопасности в контексте машинного обучения, что позволило сформулировать ключевые выводы, значимые для разработки устойчивых к состязательным атакам нейронных сетей. В работе рассмотрены два типа атак: *FGSM (Fast Gradient Sign Method)* и *SVM Poisoning*, каждый из которых представляет серьезную угрозу, отличаясь механизмом воздействия и временными характеристиками.

*FGSM*-атаки доказали свою эффективность в краткосрочной перспективе за счет простоты реализации и возможности быстрого воздействия на обученные модели. Их основное преимущество заключается в способности исказить выходные данные нейронной сети посредством минимальных, но точно рассчитанных изменений входных параметров. Важно отметить, что подобные атаки могут быть осуществлены без доступа к внутренней архитектуре модели, используя лишь анализ ее выходных реакций.

Применение *SWOT*-анализа позволило структурировать сильные и слабые стороны рассмотренных атак. Использование метода Монте-Карло и библиотеки *Scikit-learn* обеспечило количественную оценку устойчивости моделей к атакам уклонения и отравления. Установлено, что *FGSM*, несмотря на простоту реализации, чувствителен к параметру интенсивности шума, тогда как *SVM Poisoning*, обладая досрочным эффектом и высокой скрытностью, требует значительного объема модифицированных данных и доступа к процессу обучения.

На основании проведенного анализа можно утверждать, что эффективная защита систем машинного обучения должна основываться на комплексном подходе, включающем меры противодействия различным типам состязательных атак. Результаты исследования подчеркивают необходимость дальнейшей разработки методов обнаружения и нейтрализации угроз как на этапе обучения, так и в процессе эксплуатации моделей.

Таким образом, работа вносит вклад в развитие методологии обеспечения информационной безопасности машинного обучения, предлагая системный подход к оценке и минимизации рисков, связанных с состязательными атаками.

## Список источников

1. Маслова, М. А. Анализ и определение рисков информационной безопасности / М. А. Маслова // Научный результат. Информационные технологии. – 2019. – Т. 4, № 1. – С. 46–53.
2. Киселева, И. А. Информационные риски: методы оценки и анализа / И. А. Киселева, С. О. Искаджян // ИТпортал. – 2017. – № 2 (14). – С. 12–25.
3. Колесниченко, М. Д. Об уязвимости искусственных нейронных сетей к состязательным атакам / М. Д. Колесниченко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2020. – Т. 2. – С. 228–229.
4. Аусин, Р. М. Глубокое обучение методам защиты от атак / Р. М. Аусин, Е. В. Заргарян, Ю. А. Заргарян // Алгоритмы обработки информации. – 2023. – С. 227–239. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-227-239.
5. Намиот, Д. Е. Введение в атаки отравлением на модели машинного обучения / Д. Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 58–69.
6. Куркина, Е. П. Оценка риска: экспертный метод / Е. П. Куркина, Д. Г. Щувалова // Научный журнал. – 2023. – С. 123–134.
7. Гришина, С. В. Преимущества и ограничения анализа / С. В. Гришина // Астраханский государственный технический университет. – 2023. – С. 45–56.
8. Rasheed, B. Improving robustness of deep networks using cluster-based adversarial training / B. Rasheed, A. Khan // Russian Law Journal. – 2023. – Vol. 11, issue 9s. – P. 102–115.

9. Гаврилова, А. С. Проблемы анализа и защиты данных / А. С. Гаврилова // Форум молодых ученых. – 2019. – № 1 (29). – С. 820–824.

10. Ковалев, И. В. Классификация механизмов атак и исследование методов защиты систем с использованием алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта / И. В. Ковалев, О. П. Сивак, В. В. Петров // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 2 (54). – С. 91–99. – DOI: 10.21672/2074-1707.2021.53.1.090-098.

11. Papernot, N. Practical Black-Box Attacks against Machine Learning / N. Papernot, P. McDaniel, I. J. Goodfellow, S. Jha, Z. B. Celik // Proceedings of the 2017 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1206.6389>.

12. Gu, T. BadNets: Evaluating Backdoor Attacks on Deep Neural Networks / T. Gu, F. Zhang, Y. Wang // Proceedings of the 30th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC). – 2017. – URL: [https://aisec.cs.msu.ru/section\\_robust\\_ml/robustness/](https://aisec.cs.msu.ru/section_robust_ml/robustness/).

13. Korman, A. Feature Collision: Creating Vulnerabilities in Machine Learning Models / A. Korman, R. Goh // CyberLeninka. – 2020. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shemy-atak-na-modeli-mashinnogo-obucheniya>

#### References

1. Maslova, M. A. Analysis and determination of information security risk. *Scientific Result. Information Technology*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 46–53 (In Russ.).

2. Kiseleva, I. A., Iskadyan, S. O. Information risks: methods of evaluation and analysis. *IT Portal*, 2017, no. 2 (14) (In Russ.).

3. Kolesnichenko, M. D. Vulnerability of Artificial Neural Networks to Adversarial Attacks. *Current Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2020, vol. 2, pp. 228–229 (In Russ.).

4. Ausin, R. M., Zargaryan, E. V., Zargaryan, Yu. A. Deep learning methods for attack defence. *Algorithms of Information Processing*, 2023, pp. 227–239. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-227-239 (In Russ.).

5. Namiot, D. E. Introduction to poisoning attacks on machine learning models. *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 58–69 (In Russ.).

6. Kurkina, E. P., Shchufalova, D. G. Risk assessment: expert method. *Scientific Journal*, 2023, pp. 123–134 (In Russ.).

7. Grishina, S. V. Advantages and limitations of analysis. *Astrakhan State Technical University*, 2023, pp. 45–56 (In Russ.).

8. Rasheed, B., Khan, A. Improving robustness of deep networks using cluster-based adversarial training. *Russian Law Journal*, 2023, vol. 11, issue 9s, pp. 102–115.

9. Gavrilova, A. S. Problems of data analysis and protection. *Forum of Young Scientists*, 2019, no. 1 (29), pp. 820–824 (In Russ.).

10. Kovalev, I. V., Sivak, O. P., Petrov, V. V. Classification of attack mechanisms and study of protection methods for systems using machine learning and artificial intelligence algorithms. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2021, no. 2 (54), pp. 91–99. DOI: 10.21672/2074-1707.2021.53.1.090-098 (In Russ.).

11. Papernot, N., McDaniel, P., Goodfellow, I. J., & Celik, Z. B. Practical Black-Box Attacks against Machine Learning. *Proceedings of the 2017 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security*, 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1206.6389>.

12. Gu, T., Zhang, F., Wang, Y. BadNets: Evaluating Backdoor Attacks on Deep Neural Networks. *Proceedings of the 30th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC)*, 2017. Available at: [https://aisec.cs.msu.ru/section\\_robust\\_ml/robustness/](https://aisec.cs.msu.ru/section_robust_ml/robustness/).

13. Korman, A., Goh, R. Feature Collision: Creating Vulnerabilities in Machine Learning Models. *CyberLeninka*, 2020. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/shemy-atak-na-modeli-mashinnogo-obucheniya>.

Статья поступила в редакцию 05.06.2025; одобрена после рецензирования 01.07.2025; принята к публикации 04.07.2025.

The article was submitted 05.06.2025; approved after reviewing 01.07.2025; accepted for publication 04.07.2025.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 303.732.4; 303.71

## МЕТОДЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗА УРОВНЯ ПРИБЫЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО СЕКТОРА

*Пономарёв Дмитрий Сергеевич*, ФКУ НИИ ФСИН России, Российская Федерация, 125130, г. Москва, ул. Нарвская, 15а, строение 1, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0003-1562-2956, e-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

В данном исследовании рассмотрено прикладное применение методов глубокого обучения для решения проблем производственного сектора пенитенциарной системы. В качестве инструмента для глубокого обучения моделей и создания прогнозов было рассмотрено практическое применение разработанного ранее программного комплекса, который основан на применении искусственной нейронной сети с использованием многослойного перцептрона. Непосредственно сам прикладной пример, который рассмотрен в работе базируется на решении задачи регрессии для моделирования чистой прибыли в конце отчетного периода для производств пенитенциарной системы, исходя из количества заключенных контрактов, объемов производств, качества трудовых ресурсов и других ключевых параметров эффективности. Рассмотрен выбор количества слоев искусственной нейронной сети: проанализированы случаи, когда количество слоев может быть недостаточно (что проявляется в ограниченной применимости и низкой точности), а также случаи, когда количество слоев слишком большое (что проявляется в переобучении моделей, сложности настройки гиперпараметров). Рассмотрены преимущества применения регуляризации, нормализации данных и слоев. Проведен анализ для выбора наиболее подходящих функций активаций в зависимости от поставленных задач научных исследований (были рассмотрены: логистическая функция, гиперболический тангенс, *ReLU* (с подвидами), *ELU*, *Softmax* и др.). Разработаны рекомендации по выбору функции активации. Рассмотрены методы и подходы для выбора прочих гиперпараметров для проведения обучения. Рассмотрена достоверность и предсказательная способность обученных моделей. Проведен анализ полученных результатов для теоретических научных исследований и практического применения в подразделениях, сделаны выводы.

**Ключевые слова:** глубокое обучение, Python, TensorFlow, пенитенциарная система, производственный сектор

## USING DEEP LEARNING METHODS IN THE PROBLEMS OF FORECASTING THE LEVEL OF INCOME IN THE PRODUCTION SECTOR

*Ponomarev Dmitry. S.*, Federal State Institution Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, building 1, 15a Narvskaya St., Moscow, 125130, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0003-1562-2956, e-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

This study examines the practical application of deep learning methods to solve problems in the production sector of the penitentiary system. As a tool for deep learning of models and creating forecasts, the practical application of a previously developed software package was considered, which is based on the use of an artificial neural network using a multilayer perceptron. The applied example itself, which is considered in the work, is based on solving the regression problem for modeling income at the end of the reporting period for penitentiary system industries based on the number of contracts concluded, production volumes, quality of labor resources and other key performance parameters. The choice of the number of layers of an artificial neural network is considered: cases are analyzed when the number of layers is insufficient (which manifests itself in limited applicability and low accuracy), as well as cases when the number of layers is too large (which manifests itself in overtraining of models, complexity of setting up hyperparameters). The advantages of using regularization, normalization of data and layers are considered. An analysis is carried out to select the most suitable activation functions depending on the set research objectives (the following were considered: logistic function, hyperbolic tangent, ReLU (with subtypes), ELU, Softmax, etc.). Recommendations are developed for choosing an activation function. Methods and approaches for selecting other hyperparameters for training are considered. The reliability and predictive ability of the trained models are considered. The obtained results were analyzed for theoretical scientific research and practical application in departments, and conclusions were made.

**Keywords:** deep learning, Python, penitentiary system, manufacturing sector, TensorFlow

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современные методы глубокого обучения играют ключевую роль в решении сложных задач прогнозирования и оптимизации в различных отраслях промышленности. Производственный сектор пенитенциарной системы представляет собой специфическую область, в которой автоматизация и интеллектуальный анализ данных могут значительно повысить эффективность процессов, улучшить контроль качества продукции и оптимизировать использование ресурсов. В условиях динамичного изменения спроса на продукцию, управления трудовыми ресурсами и контроля финансовых показателей традиционные методы прогнозирования доходов часто оказываются недостаточно точными. В связи с этим возникает необходимость применения методов машинного обучения, а именно искусственных нейронных сетей, которые способны анализировать многомерные зависимости между различными параметрами производственной деятельности.

Данное исследование посвящено применению методов глубокого обучения для прогнозирования чистой прибыли производственных предприятий пенитенциарной системы. В работе рассматриваются вопросы оптимального выбора гиперпараметров модели, включая количество слоев, число нейронов, функции активации, методы регуляризации и нормализации. Особое внимание уделяется анализу влияния этих параметров на точность предсказаний.

**Цель исследования** – определить оптимальную архитектуру нейросетевой модели, обеспечивающую максимальную предсказательную способность при анализе данных о производственной деятельности. Для этого рассматриваются различные конфигурации многослойного персептрона, методы нормализации данных и стратегии подбора гиперпараметров. Полученные результаты могут быть использованы для автоматизации аналитических процессов в подразделениях, занимающихся управлением производством, что способствует повышению экономической эффективности пенитенциарной системы.

Использование методов глубокого обучения в производственном секторе пенитенциарной системы может значительно повысить эффективность, безопасность и прозрачность процессов [1]. Можно выделить следующие ключевые направления, где эти технологии могут быть применены:

1. Оптимизация производственных процессов, т. е. прогнозирование спроса и планирование производства. С помощью нейронных сетей можно анализировать исторические данные и прогнозировать спрос на продукцию, производимую в исправительных учреждениях. Это позволит оптимизировать закупку материалов и планирование производства. Можно проводить контроль качества продукции – глубокое обучение может быть использовано для автоматического анализа изображений или данных с датчиков, чтобы выявлять дефекты продукции на ранних этапах производства.

2. Безопасность и мониторинг. Например, видеонаблюдение и анализ поведения: системы компьютерного зрения на основе глубокого обучения могут автоматически анализировать видео с камер наблюдения, выявляя подозрительное поведение или потенциальные угрозы. Распознавание лиц: технологии распознавания лиц могут быть использованы для контроля доступа в производственные зоны и идентификации сотрудников и заключенных.

3. Управление ресурсами. Например, оптимизация использования рабочей силы: используя алгоритмы глубокого обучения, можно проводить анализ данных о производительности и распределении задач между спецконтингентом и сотрудниками, чтобы максимизировать эффективность. Управление запасами: используя искусственные нейронные сети (ИНС) можно прогнозировать необходимость в материалах и автоматически управлять запасами, минимизируя издержки.

4. Прогноз рецидивизма. Например, используя обученную ИНС, можно анализировать данные о поведении и истории заключенных, чтобы прогнозировать вероятность рецидивизма и предлагать меры по снижению этого риска.

5. Анализ данных и отчетность. Например, автоматическая генерация отчетов (подобно автоматическим системам отчета по разведочному анализу данных [2]): нейронные сети могут автоматически анализировать большие объемы данных и генерировать отчеты о производственной деятельности, что упрощает процесс контроля и принятия решений. Кроме того, ИНС могут быть использованы для выявления аномалий в непосредственно самих статистических данных: алгоритмы глубокого обучения могут выявлять необычные паттерны в данных, которые могут указывать на мошенничество, коррупцию или другие нарушения.

Использование алгоритмов глубокого обучения должно сопровождаться строгими мерами по обеспечению прозрачности и подотчетности, чтобы избежать злоупотреблений и нарушений прав человека [3]. Следует также учесть и этическое использование данных: необходимо обеспечить защиту персональных данных и соблюдение этических норм при использовании технологий глубокого обучения.

Непосредственно для самих производств можно рассмотреть следующие примеры внедрения:

– в автоматизированных системах контроля качества на производственных линиях, где происходит трудовая адаптация спецконтингента;

– в системах видеонаблюдения с аналитикой поведения, с возможностью предупреждать о потенциальных конфликтах или нарушениях;

– для адаптивных образовательных платформ, которые помогают трудоустроенному спецконтингенту получать новые навыки и повышать шансы на успешную реинтеграцию в общество.

Рассмотрим применение методов глубокого обучения для создания модели прогноза чистой прибыли от производства товаров, выполнения работ и оказания услуг на примере данных производственного пенитенциарного сектора. В приведенной работе далее будут представлены методы и подходы для создания структуры ИНС, выбора функции активации, количества скрытых слоев. В первую очередь рассмотрим формирование выборки и примененные материалы и методы.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРКИ

В качестве материала исследования были выбраны статистические данные производственного сектора пенитенциарной системы, учет которых ведется согласно установленным отчетным формам (ОТАО – «Отчет о трудовой адаптации осужденных»). Выборка была сформирована на основе данных в период с 2019 по 2022 г. по регионам, где организованы производства. Объем выборки составил 3840 точек. Были рассмотрены данные, которые характеризуют такие параметры, как объем производства, расходы, доходы, брак продукции, качество трудовых ресурсов, количество заключенных контрактов на производство.

В работе были использован разработанный ранее программный комплекс для обучения моделей глубокого обучения [4]. Помимо этого, были применены методы и подходы по выбору количества слоев ИНС, функции активации. Рассмотрено применение методов стандартизации и нормализации данных. Определены преимущества регуляризации.

Рассмотрим решение задачи регрессии для производственно-экономического пенитенциарного сектора. Рассмотрим производственно-экономический сектор, который, согласно опубликованным ранее работам, будет соответствовать множеству из параметров  $(X_{m=2,p \in \{1,2\}, o \in \{\dots\}})$ , данный сектор будет соответствовать параметрам, учет которых ведется согласно ведомственным статистическим отчетным формам ОТАО-2 [5]. В данной отчетной форме (а соответственно, и в самом множестве) можно выделить ключевые параметры эффективности [6] (табл. 1).

Таблица 1 – Исследуемые параметры и присвоенные им переменные

Переменная	Параметр
$X1$	Объем заказов на производство продукции, тыс. руб.
$X2$	Объем заказов на оказание услуг и выполнение работ, тыс. руб.
$X3$	Объем производства продукции, тыс. руб.
$X4$	Объем производства оказания услуг и выполнения работ, тыс. руб.
$X5$	Расходы производства на выполнение работ, тыс. руб.
$X6$	Расходы производства на оказание услуг и выполнения работ, тыс. руб.
$X7$	Количество бракованной продукции, ед.
$X8$	Объем невыполненных работ и неоказанных услуг, тыс. руб.
$X9$	Среднесписочная численность трудоустроенных, чел.
$X10$	Количество отработанных человеко-часов
$X11$	Распространенность социально значимых заболеваний среди спецконтингента (ВИЧ, СПИД), чел.
$X12$	Распространенность социально значимых заболеваний среди спецконтингента (алкоголизм, наркозависимость), чел.
$X13$	Количество спецконтингента, не привлеченного к трудовой адаптации, чел.
$X14$	Количество остатков готовой произведенной продукции с предыдущего периода, ед.
$X15$	Стоимость переработанного сырья и материалов при производстве товаров, тыс. руб.
$X16$	Стоимость переработанного сырья при оказании услуг, тыс. руб.
$X17$	Среднемесячная заработная плата, тыс. руб.
$Y$	Чистая прибыль от производства товаров, выполнения работ и оказания услуг

Выборка состоит из 2054 наблюдений. Для решения задачи применяется глубокая нейронная сеть с различными конфигурациями. Оценивается предсказательная способность модели в зависимости от изменения числа слоев, нейронов, функции активации и других параметров. В качестве входных параметров были выбраны  $X1$ – $X17$ , в качестве выходного сигнала ИНС был выбран  $Y$ . Данные по выходному параметру были смещены на один период (месяц) относительно данных по входному параметру в пределах одного года.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА СЛОЕВ

Количество слоев в ИНС является одним из ключевых параметров, влияющих на её производительность и способность к обучению. Как слишком малое, так и слишком большое количество слоев может привести к проблемам [7]. Рассмотрим основные недостатки каждого случая.

1. Слишком малое количество слоев. В этом случае может наблюдаться недостаточная способность к обучению сложных функций – нейронные сети с малым количеством слоев (например, одностойные или двухслойные) могут быть ограничены в своей способности моделировать сложные нелинейные зависимости в данных. Это особенно критично для задач, где данные имеют сложную структуру (например, изображения, текст, звук).

Другим прецедентом может явиться низкая точность обученных моделей – простые сети могут не справляться с задачами, требующими высокой точности, так как они не способны извлекать иерархические признаки из данных.

Следует также выделить ограниченную применимость полученных моделей – такие сети подходят только для простых задач (например, линейная регрессия или классификация линейно разделимых данных), но неэффективны для сложных задач, таких как распознавание изображений или обработка естественного языка.

2. Слишком большое количество слоев. В этом случае можно отметить проблему переобучения (*overfitting*) – сеть с большим количеством слоев может «запомнить» обучающие данные вместо того, чтобы обобщать их. Это приводит к высокой точности на обучающей выборке, но плохой производительности на тестовых данных.

Также можно отметить усложнение обучения – с увеличением глубины сети возрастает сложность её обучения.

Другой проблемой будут исчезающие градиенты. Градиенты становятся очень маленькими при обратном распространении ошибки, что замедляет или останавливает обучение. И наоборот, можно отметить наличие взрывающихся градиентов, т. е. градиенты становятся слишком большими, что приводит к нестабильности обучения.

Имеется также проблема высоких вычислительных затрат. Глубокие сети требуют больше вычислительных ресурсов (памяти, времени на обучение) и энергии, что может быть непрактично для некоторых задач.

Другой проблемой в случае выбора слишком большого количества слоев ИНС будет требовательность к данным. Глубокие сети требуют большого объема данных для обучения. Если данных недостаточно, сеть может переобучиться или не достичь высокой точности.

Также можно выделить сложность настройки. Чем больше слоев, тем больше гиперпараметров (например, количество нейронов в слоях, скорость обучения, регуляризация) требуется настраивать, что усложняет процесс разработки.

Поэтому задача оптимального выбора количества слоев является одной из приоритетных. Оптимальное количество слоев зависит от конкретной задачи, объема данных и сложности моделируемой функции. Для простых задач (например, классификация линейно разделимых данных) достаточно 1–2 слоев. Для сложных задач (например, распознавание изображений) используются глубокие сети с десятками или сотнями слоев (например, *ResNet*, *VGG*, *Transformer*).

В качестве одного из решений проблем переобучения можно выделить использование регуляризации. Методы, такие как *Dropout*, *L1/L2*-регуляризация, помогают предотвратить переобучение. Можно, например, также провести и нормализацию как данных, так и слоев: *Batch Normalization* и *Layer Normalization* помогают стабилизировать обучение глубоких сетей [8].

Таким образом, выбор количества слоев – это компромисс между сложностью модели, объемом данных и вычислительными ресурсами. Слишком малое количество слоев ограничивает возможности сети, а слишком большое – усложняет обучение и повышает риск переобучения.

### ВЫБОР ФУНКЦИИ АКТИВАЦИИ

Функции активации играют ключевую роль в работе искусственных нейронных сетей (ИНС), так как они вводят нелинейность, позволяя сети обучаться сложным закономерностям в данных [9]. Выбор функции активации зависит от задачи, архитектуры сети и слоя, в котором она применяется [10]. Рассмотрим основные функции активации и их применение:

1. Логистическая функция (1):

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (1)$$

Диапазон значений для данной функции будет (0, 1). Используется в выходном слое для задач бинарной классификации (например, предсказание вероятности). Из недостатков можно выделить наличие случаев, когда градиенты становятся очень маленькими при больших значениях  $x$ , что замедляет обучение, а также несимметричность – среднее значение выхода не равно нулю, что может замедлить сходимость.

2. Гиперболический тангенс (2):

$$\tanh = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (2)$$

Диапазон значений для данной функции (–1, 1). Чаще используется в рекуррентных нейронных сетях (*RNN*). Из преимуществ можно выделить симметричность относительно нуля, что улучшает сходимость по сравнению с сигмоидой. Из недостатков здесь можно выделить аналогичные проблемы с исчезающих градиентов.

3. *ReLU (Rectified Linear Unit)* (3):

$$ReLU(x) = \max(0, x). \quad (3)$$

Диапазон значений для данной функции  $[0, \infty)$ . Используется чаще всего в скрытых слоях сверточных нейронных сетей (например, сверточных сетей, многослойных перцептронов). Из преимуществ можно выделить простоту вычислений и высокую скорость сходимости, отсутствие проблемы исчезающих градиентов (для положительных значений). Из недостатков можно выделить проблему «мертвых нейронов»: если нейрон всегда выдает 0 (например, из-за большого отрицательного входа), он перестает обучаться, кроме того, она не подходит для выходного слоя в задачах регрессии или классификации.

4. *Leaky ReLU* (4):

$$Leaky ReLU(x) = \begin{cases} x, & \text{при } x > 0 \\ \alpha x & \end{cases}. \quad (4)$$

Диапазон значений для данной функции  $(-\infty, \infty)$ . Используется в скрытых слоях, когда есть риск «мертвых нейронов» в обычном *ReLU*. Преимуществами здесь будет являться то, что благодаря ее использованию можно решить проблему «мертвых нейронов», так как она позволяет небольшим отрицательным значениям проходить через функцию. Из недостатков можно выделить дополнительную настройку параметра  $\alpha$  (обычно  $\alpha = 0,01$ ).

5. *Parametric ReLU (PReLU)* (5):

$$PReLU(x) = \begin{cases} x, & \text{при } x > 0 \\ \alpha x & \end{cases}. \quad (5)$$

Диапазон значений:  $(-\infty, \infty)$ . Используется в глубоких сетях, где требуется адаптивность к данным.

6. *ELU (Exponential Linear Unit)* (6):

$$ELU(x) = \begin{cases} x, & \text{при } x > 0 \\ \alpha(e^x - 1) & \end{cases}. \quad (6)$$

Диапазон значений:  $(-\alpha, \infty)$ . Может быть использована в глубоких сетях, где важна устойчивость к шуму и улучшенная сходимость. Преимущества: уменьшает проблему «мертвых нейронов» и улучшает сходимость. Недостатки: вычислительно более затратна, чем *ReLU*.

7. *Softmax* (7):

$$Softmax(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_j e^{x_j}}. \quad (7)$$

Диапазон значений:  $(0, 1)$ . Как правило, может быть использована в выходном слое для задач многоклассовой классификации (например, классификация изображений). Преимущества: преобразует выходы в вероятности, что удобно для интерпретации. Недостатки: не подходит для скрытых слоев.

8. *Linear* (Линейная функция) (8):

$$f(x) = x. \quad (8)$$

Диапазон значений:  $(-\infty, \infty)$ . Используется в выходном слое для задач регрессии. Преимущества: простота и отсутствие искажений. Недостатки: не вводит нелинейность, поэтому не подходит для скрытых слоев.

9. *Swish* (9):

$$Swish(x) = x\sigma(x), \quad (9)$$

где  $\sigma(x)$  – сигмоида.

Диапазон значений:  $(-\infty, \infty)$ . Может быть использована в современных архитектурах, где требуется высокая производительность. Преимущества: в целом показывает лучшие результаты, чем *ReLU*, в некоторых задачах. Недостатки: вычислительно более затратна, чем *ReLU*.

Рекомендации по выбору функции активации. Если рассматриваем скрытые слои: *ReLU* – стандартный выбор для большинства задач; *Leaky ReLU* или *ELU* – если есть риск «мертвых нейронов»; *Swish* – для экспериментов и современных архитектур. Если рассматриваем выходной слой: *Sigmoid* – для бинарной классификации; *Softmax* – для многоклассовой классификации; *Linear* – для задач регрессии. Для рекуррентных нейронных сетей можно сделать следующий вывод (*RNN*, *LSTM*): *Tanh* часто используется в сочетании с другими функциями; *ReLU* может использоваться, но требует осторожности. Для сверточных нейронных сетей (*CNN*): *ReLU* – стандартный выбор; *Leaky ReLU* или *ELU* – для улучшения сходимости. Таким образом, были определены правила по выбору функций активации в зависимости от поставленных задач, имеющихся данных, количества слоев и нейронов, а также используемых типов нейронных сетей.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

Для исследования предсказательной силы модели были исследованы основные гиперпараметры глубокой нейронной сети [11]: количество слоев; число нейронов в скрытых слоях; функция активации; оптимизатор; количество обучающих примеров, используемых в одной итерации обучения модели (*batch size*); количество эпох обучения.

Оценка качества модели проводилась с использованием метрики *MSE* (среднеквадратичная ошибка) и  $R^2$  (коэффициент детерминации).

Для наглядности представления результатов была разработана таблица, где гиперпараметры модели были выделены в отдельные столбцы (табл. 2). Это позволило лучше увидеть взаимосвязь между различными комбинациями параметров и их влиянием на точность модели.

Таблица 2 – Влияние гиперпараметров на предсказательную силу модели

Количество слоев	Число нейронов	Функция активации	Batch size	Эпохи	MSE × 10 <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>
2	32	ReLU	16	50	1230	0,78
3	64	ReLU	32	100	980	0,82
5	64	Tanh	32	100	750	0,87
7	128	Swish	32	200	720	0,88
10	128	Swish	64	200	710	0,89
15	128	Swish	64	300	730	0,87
7	256	Leaky ReLU	64	200	700	0,90
10	256	Leaky ReLU	32	200	690	0,90
10	512	Leaky ReLU	32	300	730	0,87

В результате проведенного исследования было установлено, что увеличение количества слоев до 7–10 дает заметный прирост точности, но дальнейшее увеличение до 15 приводит к ухудшению обобщающей способности модели (MSE возрастает с 710 000 до 730 000). Аналогично увеличение количества нейронов выше 256–512 не дает значимого прироста точности, а в некоторых случаях ухудшает результаты из-за переобучения.

Функции Swish и Leaky ReLU показали наилучшие результаты, обеспечивая R<sup>2</sup> ≈ 0,90. В то же время ReLU и Tanh демонстрируют худшие показатели, что объясняется проблемой исчезающих градиентов, особенно в глубоких сетях.

Оптимальный размер batch size оказался 32–64. Использование слишком маленьких (8–16) batch size приводит к нестабильности градиентов, а слишком больших (>128) – к потере обобщающей способности модели.

Было также установлено, что 200 эпох – наиболее подходящее значение для обучения модели. Дальнейшее увеличение до 300 не дает значимого прироста, а наоборот, вызывает переобучение. Это указывает на необходимость использования ранней остановки (early stopping).

В результате на основе анализа была определена оптимальная конфигурация модели: количество слоев: 7–10; число нейронов: 128–256; функция активации: Swish или Leaky ReLU; batch size: 32–64; количество эпох: 200. Данная конфигурация позволяет достичь MSE = 690 000 и R<sup>2</sup> = 0,90, что указывает на высокую предсказательную способность модели. Дальнейшее улучшение возможно за счет регуляризации, расширения выборки и ансамблевых методов.

В результате представленной конфигурации было проведено обучение искусственной нейронной сети.

Значимость входящих сигналов относительно исходящего представлена далее на рисунке.

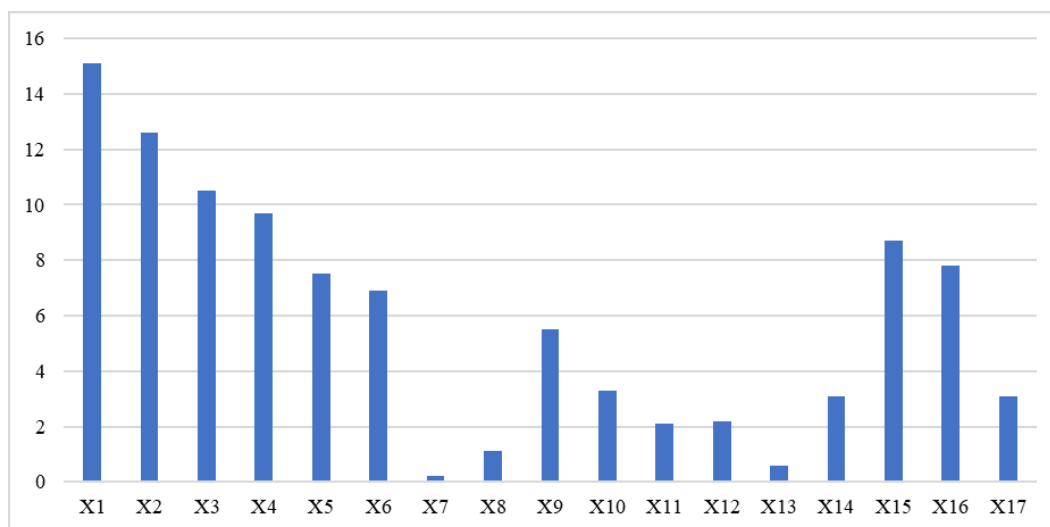


Рисунок – доля значимости входящих сигналов X относительно исходящего Y при обучении модели ИНС

Данный результат можно интерпретировать следующим образом: наибольшую значимость в обучении модели внесли параметры, которые связаны с заключенными контрактами и полученными заказами (что является достаточно логичным для производства), далее – параметры, которые отражают значения объемов производства, а также расходов. Причем во всех перечисленных группах параметров наблюдается преобладание значимости для «производства продукции» относительно «оказания услуг и выполнения работ». Это говорит о том, что производственная деятельность влияет на чистую прибыль больше, чем оказание услуг и выполнение работ. Параметры, которые характеризуют трудовые ресурсы, повлияли в меньшей степени, возможно, это связано с разными системами учета данных: система учета для трудовых ресурсов представляет собой трендовый временной ряд, который не зависит от периодичности, в то время как производственные показатели в большинстве случаев являются циклическим временным рядом (где цикл = один год). Таким образом, можно сказать, что повышение качества обучаемых моделей зависит не только от настроенных гиперпараметров и объема выборки, но и непосредственно от самих систем учета, которые были использованы.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. *ReLU* для малых сетей (2–5 слоев,  $\leq 64$  нейронов). *ReLU* (*Rectified Linear Unit*) – самая популярная функция активации из-за её простоты и эффективности. Однако у нее есть проблема «мертвых нейронов», когда градиент для отрицательных значений становится нулевым. В неглубоких сетях градиенты распространяются лучше, и «мертвые нейроны» менее критичны. Малое количество слоев снижает вероятность исчезновения градиентов. Меньшее количество нейронов делает сеть менее склонной к переобучению.

2. *Leaky ReLU* для глубоких сетей (7+ слоев,  $\geq 128$  нейронов). *Leaky ReLU* решает проблему «мертвых нейронов» за счет того, что для отрицательных входов градиент не равен нулю, а остается небольшим (обычно  $\alpha = 0,01$ ). В глубоких сетях градиенты должны распространяться через много слоев, и исчезающие градиенты становятся критичными. *Leaky ReLU* сохраняет активность нейронов и предотвращает их «выключение». С ростом числа нейронов и слоев модель становится сложнее, и жесткая обнуленность градиентов у *ReLU* может ухудшать сходимость.

В сводной таблице видно, что: *ReLU* (при 2–5 слоях,  $\leq 64$  нейронов) дает достаточно хорошую точность, но проигрывает на глубокой сети; *Leaky ReLU* (при 7+ слоях,  $\geq 128$  нейронов) дает лучшие результаты, так как предотвращает проблемы с исчезающими градиентами. *Swish* (при 10 слоях, 256 нейронов) – альтернатива *Leaky ReLU*, так как адаптирует наклон активационной функции и хорошо работает в глубоких сетях.

Таким образом, можно подытожить, что если сеть неглубокая ( $\leq 5$  слоев), *ReLU* работает достаточно хорошо, а если сеть глубокая (7+ слоев), лучше использовать *Leaky ReLU* или *Swish*, так как они предотвращают исчезновение градиентов.

Отсутствие *sigmoid* в приведенной таблице можно обосновать следующим.

1. Проблема исчезающих градиентов. *Sigmoid* имеет очень маленькие градиенты при больших и малых входных значениях, что делает обучение медленным и неэффективным в глубоких сетях. В глубоких сетях градиент передается через много слоев. Если градиент очень маленький ( $\approx 0$ ), веса перестают обновляться и сеть перестает учиться. Это особенно критично для глубокого обучения, где нужна быстрая и стабильная передача информации через слои.

2. Диапазон значений (0, 1) не подходит для регрессии. В нашей задаче предсказываются доходы, которые могут быть любым числом (неограниченные положительные значения). *Sigmoid* сжимает все выходные значения в диапазон (0, 1), что делает ее бесполезной для регрессии. Если выходной диапазон 0–1, то предсказать доход в миллионы рублей невозможно.

*Sigmoid* хороша в бинарной классификации (например, «забракована ли продукция?»:  $\rightarrow 0$  или 1), а также в последнем слое нейросети, если нужно предсказывать вероятность (но у нас регрессия, не классификация).

Тесты *Sigmoid* были хуже, чем у *ReLU* и *Leaky ReLU*. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение *sigmoid* с остальными функциями активации в слоях ИНС

Функция активации	$MSE \times 10^3$	$R^2$
<i>ReLU</i>	710	0,89
<i>Leaky ReLU</i>	700	0,90
<i>Swish</i>	690	0,90
<i>Sigmoid</i>	950	0,81
<i>Tanh</i>	910	0,83

Как видно, у *Sigmoid*  $MSE = 950\,000$  и  $R^2 = 0,81$ , что значительно хуже, чем у других функций. Следовательно, можно заключить, что *Sigmoid* не подходит для поставленной задачи исследования. В глубоких сетях *Sigmoid* теряет градиенты и ухудшает обучение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном научном исследовании были рассмотрены особенности применения методов глубокого обучения в задачах прогноза уровня доходов производственного сектора. На примере данных производственного сектора было рассмотрено определение наиболее подходящего количества слоев ИНС, а также функций активации.

На основе проведенного сравнительного анализа гиперпараметров была определена оптимальная конфигурация модели: количество слоев: 7–10; число нейронов: 128–256; функция активации: *Swish* или *Leaky ReLU*; *batch size*: 32–64; количество эпох: 200. Данная конфигурация позволяет достичь  $MSE = 690\,000$  и  $R^2 = 0,90$ , что указывает на высокую предсказательную способность модели. Дальнейшее улучшение возможно за счет регуляризации, расширения выборки и ансамблевых методов. Было также отмечено, что *Sigmoid* не подходит для регрессии (только для классификации). В глубоких сетях *Sigmoid* теряет градиенты и ухудшает обучение.

В ходе данного исследования была проведена комплексная работа по созданию и оптимизации модели глубокого обучения для прогнозирования доходов в производственном пенитенциарном секторе. Была определена значимость входящих сигналов относительно исходящего сигнала. Также было установлено, что повышение качества обучаемых моделей зависит не только от настроенных гиперпараметров и объемов выборки, но и непосредственно от самих систем учета, которые были использованы при сборе данных.

## Список источников

1. Царькова, Е. Г. Аспекты применения искусственных нейронных сетей при проведении ведомственных научных исследований / Е. Г. Царькова // Научные труды ФКУ НИИ ФСИН России. Москва, 2023. С. 179–186.
2. Пономарев, Д. С. Программа для автоматизации создания отчетов разведочного анализа данных : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024681798, 13.09.2024. Заявка № 2024680458 от 02.09.2024 / Д. С. Пономарев, М. М. Горохов.
3. Горохов, М. М. Статистические методы анализа и обработки информации: нейронные сети / М. М. Горохов, С. Б. Пономарев // Научные труды ФКУ НИИ ФСИН России. Москва, 2018. С. 140–146.
4. Пономарев, Д. С. Программа для создания моделей глубокого обучения на основе многослойного перцептрона : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025614063, 18.02.2025. Заявка № 2025612093 от 05.02.2025 / Д. С. Пономарев, М. М. Горохов.
5. Пономарев, Д. С. Медико-социальная адаптация как фактор повышения качества производственно-трудовой деятельности осужденных: отчет о НИР. Основание разработки: п. 97 Плана НИД ФКУ НИИ ФСИН России на 2023 год / Д. С. Пономарев, М. М. Горохов, С. Б. Пономарев ; ФКУ НИИ ФСИН России. – Москва, 2023. – 99 с.
6. Пономарев, Д. С. Применение теории множеств для разработки ключевых параметров эффективности трудового сектора пенитенциарной системы // Эргодизайн. – 2024. – № 3 (25). – С. 297–306.
7. LeCun, Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. – 2015. – Vol. 521, № 7553. – P. 436–444.
8. Ioffe, S. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift / S. Ioffe, C. Szegedy // International Conference on Machine Learning (ICML). – 2015. – P. 448–456.
9. Nair, V. Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines / V. Nair, G. E. Hinton // Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2010. – P. 807–814.
10. He, K. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 770–778.
11. Ramachandran, P. Searching for Activation Functions / P. Ramachandran, B. Zoph, Q. V. Le // arXiv preprint arXiv:1710.05941. – 2017.

## References

1. Tsarkova, E. G. Aspects of the application of artificial neural networks in departmental scientific research. *Scientific works of the Federal State Institution Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. Moscow, 2023, pp. 179–186.
2. Ponomarev, D. S., Gorokhov, M. M. *Program for automating the creation of exploratory data analysis reports : certificate of registration of the computer program RU 2024681798, 13.09.2024. Application No. 2024680458 dated 02.09.2024.*
3. Gorokhov, M. M., Ponomarev, S. B. Statistical methods of information analysis and processing: neural networks. *Scientific works of the Federal State Institution Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. Moscow, 2018, pp. 140–146.
4. Ponomarev, D. S., Gorokhov, M. M. *Program for creating deep learning models based on a multilayer perceptron : certificate of registration of computer program RU 2025614063, 18.02.2025. Application No. 2025612093 dated 05.02.2025.*
5. Ponomarev, D. S., Gorokhov, M. M., Ponomarev, S. B. *Medical and social adaptation as a factor in improving the quality of industrial and labor activity of convicts: research report. Development basis: paragraph 97 of the Research Plan of the Federal State Institution Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia for 2023*. Moscow, 2023. 99 p.
6. Ponomarev, D. S. Application of set theory for development of key parameters of efficiency of the labor sector of the penitentiary system. *Ergodesign*, 2024, no. 3 (25), pp. 297–306.
7. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444.

8. Ioffe, S., Szegedy, C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2015, pp. 448–456.
9. Nair, V., Hinton, G. E. Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines. *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2010, pp. 807–814.
10. He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. Deep Residual Learning for Image Recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778.
11. Ramachandran, P., Zoph, B., Le, Q. V. Searching for Activation Functions. *arXiv preprint arXiv:1710.05941*, 2017.

Статья поступила в редакцию 06.03.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 25.03.2025.

The article was submitted 06.03.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 25.03.2025.

УДК 004.056

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ  
НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ**

**Сенченко Даниил Михайлович**, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,

студент, ORCID: 0009-0005-9013-0961, e-mail: daniilsencenko78@gmail.com

**Макарян Александр Самвелович**, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-1801-6137, e-mail: makaryan@kubstu.ru

**Путято Михаил Михайлович**, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,

доцент, ORCID: 0000-0003-0414-6034, e-mail: michael.putyato@kubstu.ru

**Черкасов Александр Николаевич**, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-5015-4556, e-mail: cherk@mail.ru

**Вихлянцеv Владислав Владимирович**, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,

бакалавр, ORCID: 0009-0003-9914-4206, e-mail: vladikvix@gmail.com

Целью данной работы является разработка и внедрение системы автоматизированного тестирования на проникновение, способной эффективно выявлять и анализировать уязвимости в веб-приложениях. В процессе исследования были изучены существующие угрозы безопасности веб-приложений, методы их обнаружения, а также важность обеспечения безопасности в условиях постоянного роста кибератак. Разработанная система представляет собой эффективный инструмент для автоматического выявления уязвимостей в веб-приложениях, что позволяет ускорить процесс тестирования и повысить точность выявления угроз. Интеграция различных методов тестирования в единую систему обеспечивает комплексный подход к безопасности, способствуя более надежной защите от возможных атак. Произведено тестирование, оценка эффективности, а также сравнение с существующими аналогами средств тестирования. Применение данной системы в реальных условиях может существенно улучшить процессы тестирования безопасности и позволить организациям эффективно выявлять уязвимости до того, как они будут использованы злоумышленниками. Это, в свою очередь, поможет минимизировать риски, связанные с кибератаками, и повысить уровень безопасности веб-приложений. Внедрение разработанной системы является экономически выгодным, позволяя организациям снизить убытки в результате атак злоумышленников.

**Ключевые слова:** кибератака, пентест, веб-приложения

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 25-21-00379.

**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED WEB APPLICATION  
PENETRATION TESTING SYSTEM**

**Senchenko Daniil M.**, Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

student, ORCID: 0009-0005-9013-0961, e-mail: daniilsencenko78@gmail.com

**Makaryan Alexander S.**, Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-1801-6137, e-mail: makaryan@kubstu.ru

**Putyato Michael M.**, Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Assistant Professor, ORCID: 0000-0003-0414-6034, e-mail: michael.putyato@kubstu.ru

**Cherkasov Alexander N.**, Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-5015-4556, e-mail: cherk@mail.ru

**Vikhlyantsev Vladislav V.**, Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St., Krasnodar, 350072, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0009-0003-9914-4206, e-mail: vladikvix@gmail.com

The purpose of this work is to develop and implement an automated penetration testing system capable of effectively detecting and analyzing vulnerabilities in web applications. In the course of the research, the existing threats to the security of web applications, methods of their detection, as well as the importance of ensuring security in the context of a constant increase in cyber-attacks were studied. The developed system is an effective tool for automatically detecting vulnerabilities in web applications, which allows you to speed up the testing process and increase the accuracy

of threat detection. The integration of various testing methods into a single system provides a comprehensive approach to security, contributing to more reliable protection against possible attacks. Testing, evaluation of effectiveness, and comparison with existing analogues of testing tools have been performed. Using this system in real-world conditions can significantly improve security testing processes and allow organizations to effectively identify vulnerabilities before they are exploited by intruders. This, in turn, will help minimize the risks associated with cyber-attacks and increase the security level of web applications. The implementation of the developed system is economically beneficial, allowing organizations to reduce losses as a result of malicious attacks.

**Keywords:** cyberattack, pentest, web applications

**Financial support:** the work was supported by the Russian Science Foundation, project № 25-21-00379.

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие технологий сопровождается увеличением числа веб-приложений, которые, в свою очередь, используются для управления данными, взаимодействия с пользователями и реализации различных бизнес-процессов. Вместе с этим возрастают риски, связанные с уязвимостями таких приложений, что может приводить к утечкам конфиденциальной информации, финансовым потерям и компрометации систем.

Проблема обеспечения безопасности веб-приложений становится особенно ощутимой, учитывая их сложность и многообразие возможных векторов атак. В 2023 г. на российскую информационную инфраструктуру было совершено более 200 тысяч атак, и их число, вероятно, будет только расти. Помимо настройки инфраструктуры, использования актуальных технологий защиты и обучения сотрудников основам кибербезопасности, необходимо регулярно проверять существующую конфигурацию на наличие уязвимостей [5]. Традиционные же методы тестирования требуют значительных затрат времени и ресурсов, что делает их малоэффективными в условиях постоянного обновления приложений и угроз.

Автоматизация процесса тестирования на проникновение позволяет значительно сократить время на обнаружение уязвимостей, повысить точность диагностики и минимизировать человеческий фактор. В рамках данной работы рассматривается создание системы, предназначенной для автоматизации тестирования безопасности веб-приложений.

## АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В последние годы количество атак на веб-приложения существенно увеличилось. По данным исследовательских отчетов, более половины всех инцидентов информационной безопасности связаны с уязвимостями веб-приложений. Это объясняется их широкой доступностью: любой пользователь с доступом к интернету может попытаться атаковать публичное веб-приложение, даже не обладая глубокими техническими знаниями. Ниже представлена статистика наиболее часто встречающихся уязвимостей веб-приложений при проведении анализа методом «черного ящика» (рис. 1).



Рисунок 1 – Наиболее часто встречающиеся уязвимости веб-приложений за 2019 г.

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ СИСТЕМ ТЕСТИРОВАНИЯ

Ниже приведена краткая сравнительная характеристика средств и систем тестирования (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика наиболее популярных систем тестирования

Средство	Назначение и функции	Особенности	Преимущества	Недостатки
Nmap	Сканирование сетей и выявление открытых портов	Определение ОС и сервисов	Открытый исходный код; быстрый и гибкий	Не специализирован для веб-приложений
Metasploit	Фреймворк для эксплуатации уязвимостей	Интеграция с Nmap и другими сканерами; база данных эксплойтов	Автоматизация эксплуатации; широкий функционал	Потребность в знании эксплуатации; высокий порог входа
BurpSuite	Тестирование веб-приложений	Перехват запросов; встроенный сканер уязвимостей	Подходит для ручного и автоматизированного тестирования; множество плагинов	Платная версия с полным функционалом
OWASP ZAP	Сканирование и тестирование веб-приложений	Бесплатное ПО; обширный набор инструментов	Поддержка международного стандарта OWASP; простота в использовании	Ограниченный функционал для продвинутого анализа
Nikto	Сканирование веб-серверов	Поиск устаревших версий ПО	Быстрое сканирование	Ограниченная точность и сложность в обнаружении новых уязвимостей

Ниже приведена сравнительная характеристика еще нескольких наиболее популярных систем (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнительная характеристика систем тестирования

Средство	Назначение и функции	Особенности	Преимущества	Недостатки
Acunetix	Автотест на наличие уязвимостей, включая XSS, SQL-инъекции и др.	Поддержка современных технологий (HTML5, JavaScript); интеграция с CI/CD; детальные отчеты о безопасности	Высокая точность обнаружения уязвимостей; удобный интерфейс; регулярные обновления базы уязвимостей	Высокая стоимость лицензии; может генерировать ложноположительные результаты
Netsparker (Invicti)	Автотест, способный обнаруживать уязвимости и подтверждать их наличие без ложноположительных срабатываний	Технология Proof-Based Scanning; интеграция с различными CI/CD инструментами; API для автоматизации	Низкий уровень ложноположительных результатов; поддержка большого количества фреймворков и языков	Высокая стоимость; требует настройки для оптимальной работы
Qualys Web Application Scanning (WAS)	Облачный автотест на уязвимости, интеграция с другими сервисами Qualys для комплексной безопасности	Облачная архитектура; автоматическое обновление; интеграция с платформой QualysCloud	Простота использования; масштабируемость; интеграция с другими решениями Qualys	Зависимость от интернет-соединения; стоимость может быть высокой для малого бизнеса
Rapid7 AppSpider	Автотест, предназначенный для обнаружения широкого спектра уязвимостей и интеграции с DevOps процессами	Поддержка динамических и одностраничных приложений; интеграция с инструментами CI/CD; расширяемость	Высокая гибкость и настройка; интеграция с другими продуктами Rapid7; подробные отчеты	Высокая стоимость; требует обучения для эффективного использования
OpenVAS	Бесплатный автотест, включая веб-приложения, предоставляющие обширный набор функций для обнаружения и управления уязвимостями	Открытый исходный код; регулярные обновления базы уязвимостей; многофункциональный интерфейс	Бесплатность; гибкость настройки; поддержка сообщества	Более сложная настройка по сравнению с коммерческими инструментами; менее интуитивный интерфейс

Учитывая недостатки приведенных выше средств, целесообразно разработать собственную систему автоматизированного тестирования веб-приложений. Она будет адаптирована под конкретные задачи, учитывая потребности пользователей, снижая затраты на использование стороннего ПО, а также устраняя недостатки, присущие существующим инструментам.

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ**

Основной задачей является создание инструмента, способного проводить анализ безопасности веб-приложений с минимальным вмешательством человека.

Система автоматизированного тестирования уязвимостей веб-приложений должна строиться на базе современных подходов и учитывать следующие концепции:

1. Модульность – система должна быть разделена на независимые модули, отвечающие за отдельные этапы тестирования, такие как анализ входных данных, выполнение тестов и генерация отчётов.

2. Гибкость – решение должно легко адаптироваться под различные типы веб-приложений и тестов. Это обеспечивается настройкой параметров и расширением функциональности.

3. Удобство использования – интерфейс и отчёты должны быть интуитивно понятными, чтобы специалисты разного уровня могли эффективно пользоваться системой.

4. Автоматизация – основной акцент делается на минимизацию ручного вмешательства. Все ключевые процессы – от сбора данных до формирования отчёта – выполняются автоматически.

5. Точность – система должна обеспечивать минимальное количество ложных срабатываний и предоставлять детальную информацию об обнаруженных уязвимостях.

Ключевые требования к системе:

1. Поддержка тестирования основных типов уязвимостей, таких как SQL-инъекции, XSS, CSRF, пути обхода и др.

2. Генерация подробных отчётов с рекомендациями по устранению уязвимостей.

3. Масштабируемость для работы с приложениями различного объёма и сложности.

4. Соответствие международным и локальным нормативным требованиям.

Учитывая поставленные задачи и простоту предполагаемого функционала, приоритет отдается решениям, обеспечивающим надёжность, удобство реализации и поддержку базового функционала.

Основным языком программирования для реализации системы был выбран C#, благодаря его мощной экосистеме, интеграции с современными средствами разработки и высокой производительности. Использование этого языка позволяет эффективно обрабатывать данные, управлять файловыми операциями и взаимодействовать с необходимыми библиотеками для тестирования уязвимостей.

Для автоматизации проверки безопасности веб-приложений используется специализированная библиотека Selenium. Она предоставляет инструменты для автоматизированного взаимодействия с веб-приложениями через браузеры. Selenium позволяет эмулировать действия пользователя, осуществлять проверку входных данных и отслеживать поведение приложения в различных сценариях.

Хранение результатов тестирования и отчётов реализуется в виде локальных HTML-файлов. Этот формат позволяет сохранять структурированную информацию и легко просматривать результаты в любом браузере. Генерация отчётов осуществляется с помощью встроенных в C# средств работы с текстовыми данными, что минимизирует сложность реализации.

Архитектура системы автоматизированного тестирования веб-приложений построена на монолитной модели, что обеспечивает простоту использования и высокую производительность. Все основные компоненты – анализ уязвимостей, автоматизированное тестирование, обработка результатов и генерация отчётов – интегрированы в единое приложение, работающее на одном устройстве. Это позволяет избежать сложностей с настройкой серверов и взаимодействием между модулями.

Схема архитектуры системы и ее работы представлена на рисунке 2.

1. Модуль тестирования. Основной функционал системы сосредоточен в этом модуле. Он использует библиотеку Selenium для автоматизации взаимодействия с веб-приложением. Отвечает за выполнение тестов, таких как проверка обработки данных, проверка cookies и другие сценарии безопасности. Каждый тест формирует структурированный результат, содержащий информацию об успешности или выявленных уязвимостях.

2. Модуль обработки данных. Выполняет анализ результатов тестов. Генерирует текстовые и числовые показатели, включая общее количество успешных и неуспешных проверок. Осуществляет подготовку данных для отображения рекомендаций.

3. Модуль генерации отчётов. Генерирует отчёты в формате HTML, которые содержат:

– таблицу с результатами тестирования;

– рекомендации по устранению выявленных уязвимостей;

– обеспечивает удобное представление данных в формате, который легко интерпретируется пользователями.

4. Модуль конфигурации. Предоставляет интерфейс для настройки параметров тестирования, таких как URL веб-приложений и путь сохранения отчета. Позволяет гибко адаптировать систему под конкретные требования.

5. Модуль рекомендаций. Содержит базу рекомендаций по устранению распространенных уязвимостей. Сравнивает результаты тестов с базой знаний и выводит соответствующие рекомендации для каждого теста.

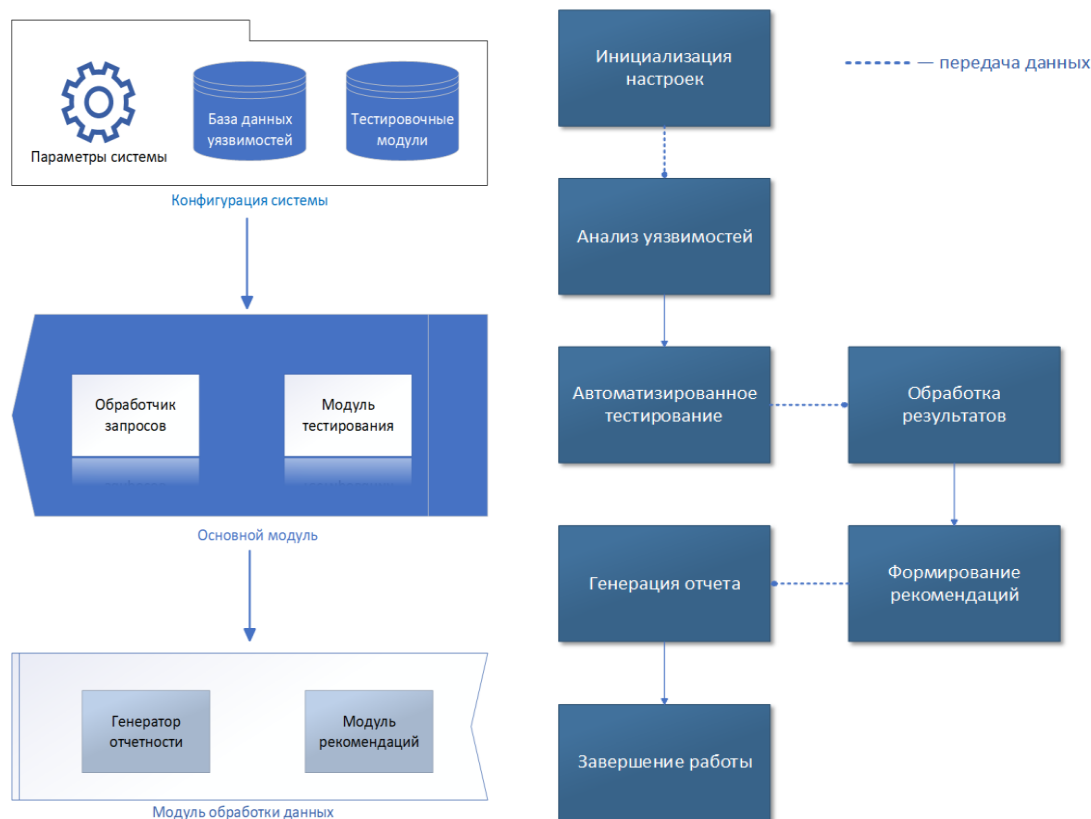


Рисунок 2 – Схемы архитектуры и работы системы тестирования

### РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ

Модули для поиска уязвимостей являются ключевыми компонентами системы тестирования. Их разработка направлена на автоматизацию процесса выявления проблем безопасности в веб-приложениях; каждый модуль выполняет конкретный набор тестов, направленных на анализ распространенных уязвимостей.

Основные этапы разработки модулей:

1. Анализ требований и сценариев тестирования. Для каждого модуля определяются цели и функциональность, основанные на типичных угрозах безопасности, таких как утечка данных, манипуляции с cookies или раскрытие служебных файлов. Формируется перечень тестов, которые модуль должен выполнять, и их критерии успешности.

2. Выбор подходящих библиотек и инструментов. Основным инструментом является Selenium, который используется для эмуляции пользовательского поведения и взаимодействия с веб-приложением. Дополнительно используются стандартные библиотеки .NET для работы с HTTP-запросами, анализа ответов сервера и обработки данных.

3. Реализация логики тестирования. Для каждого сценария создаются отдельные методы или классы, которые выполняют проверки. Например:

- тесты cookies проверяют наличие безопасных атрибутов (Secure, HttpOnly);
- тесты на раскрытие файлов проверяют доступность служебных файлов (например, .env или backup.sql);
- логика тестирования реализована с учётом модульности и возможности расширения.

Разработанные модули обеспечивают автоматизированное выполнение проверок типичных уязвимостей. Они способны выявлять как технические проблемы, так и несоответствия стандартам

безопасности. Модульная структура позволяет легко добавлять новые тесты, адаптируя систему под конкретные задачи.

Данное решение способствует минимизации человеческого фактора при тестировании, ускорению проверки веб-приложений и повышению качества их защиты.

### ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТИРОВАНИЯ НА УЯЗВИМОСТЬ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

Для демонстрации работы системы, в качестве веб-приложения для тестирования выберем сайт «Яндекс Афиша» с соответствующей ссылкой (URL) – [afisha.yandex.ru](https://afisha.yandex.ru). После ввода ссылки в поле ввода внизу программы и нажатия на кнопку «Начать тестирование» система переходит в состояние тестирования (рис. 3).

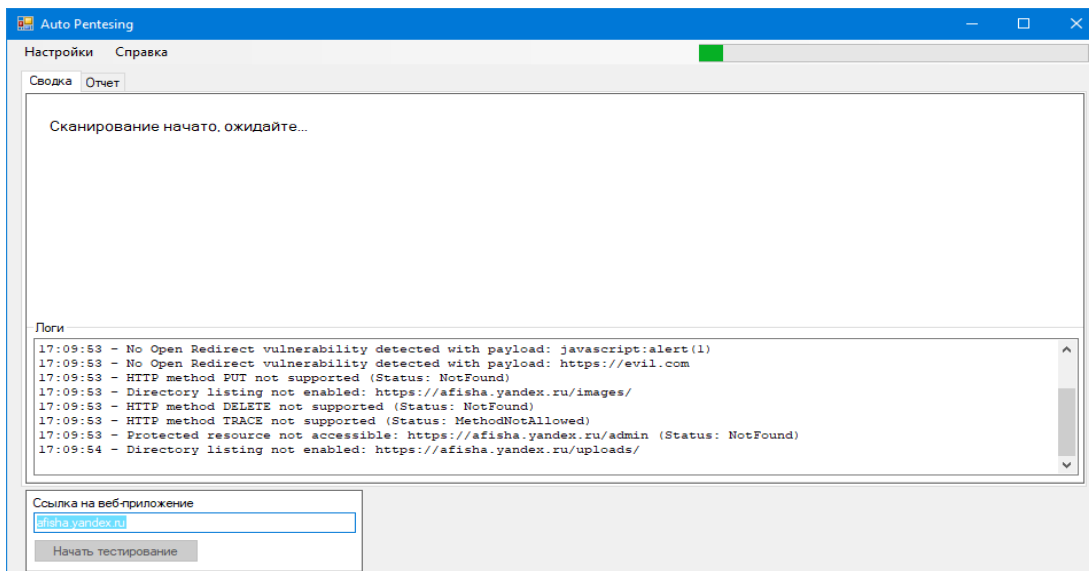


Рисунок 3 – Демонстрация процесса тестирования

По завершении тестирования, о чем сигнализирует полностью заполненная зеленая шкала сверху, перед пользователем появляется краткая сводка по проведенному тестированию (рис. 4).

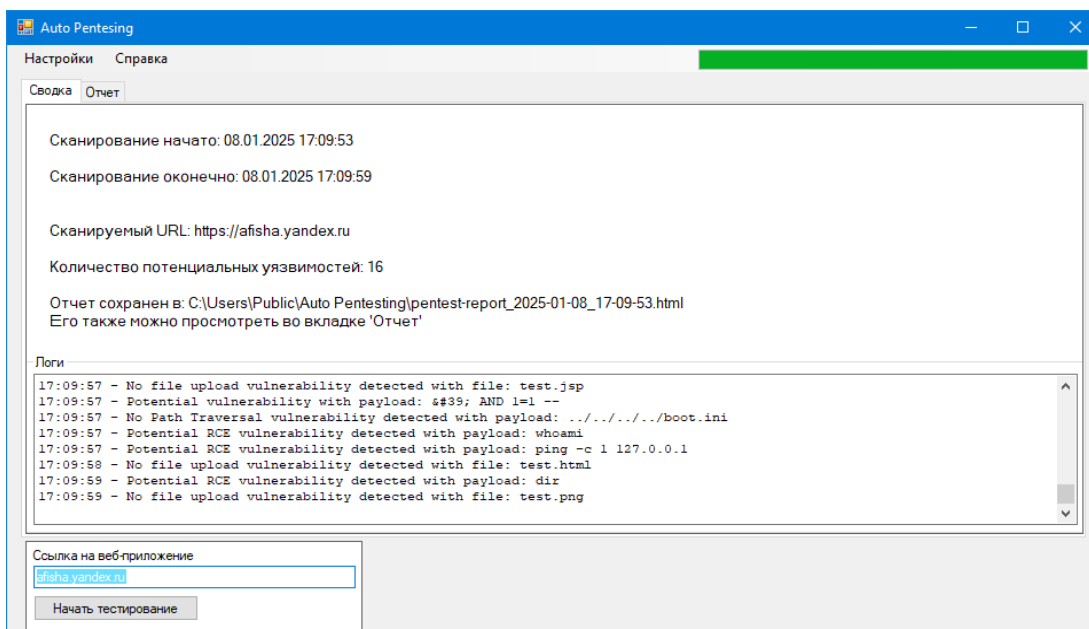


Рисунок 4 – Краткая сводка результатов тестирования

Более подробно результаты расписаны в отчете – во вкладке «Отчет» (рис. 5–6).

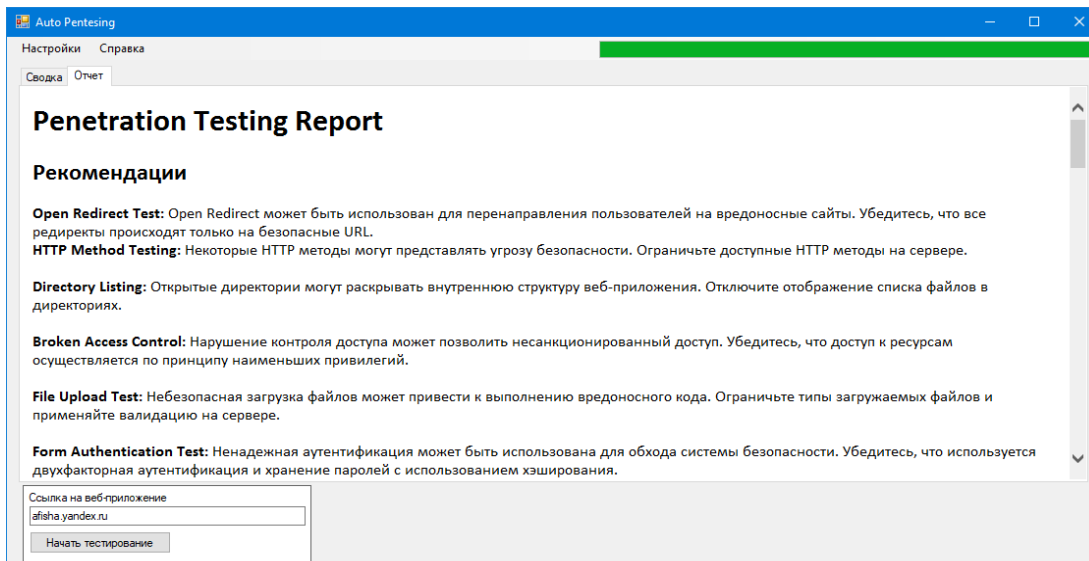


Рисунок 5 – Отчет о проведенном тестировании (рекомендации)

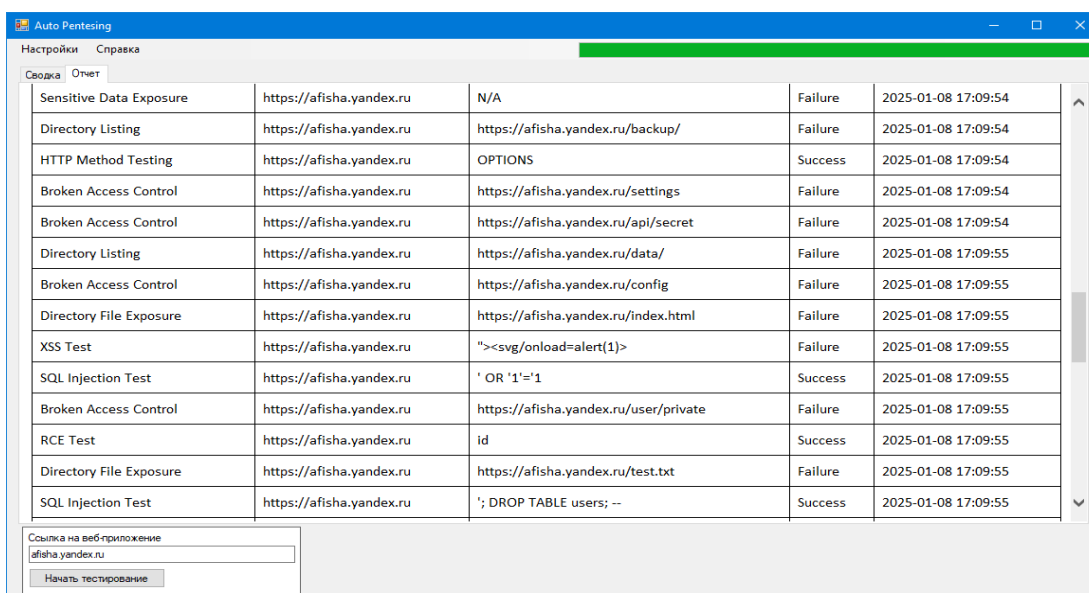


Рисунок 6 – Отчет о проведенном тестировании (таблица результатов)

Кроме того, отчет сохраняется в папку, выбранную в окне настроек. Если поле в настройках пустое, то отчет автоматически сохраняется в папку с исполняемым файлом программы. Откроем его в веб-браузере (рис. 7).

В ходе тестирования были выявлены следующие уязвимости в веб-приложениях:

1. Open Redirect Test – уязвимость Open Redirect может быть использована злоумышленниками для перенаправления пользователей на вредоносные сайты, что может привести к фишинг-атакам или распространению вредоносного ПО.
2. HTTP Method Testing – некоторые HTTP-методы могут представлять угрозу безопасности, если они доступны без должной проверки.
3. Directory Listing – открытые директории, в которых отображаются файлы, могут раскрывать внутреннюю структуру веб-приложения и конфиденциальные данные.
4. Broken Access Control – нарушение контроля доступа (Broken Access Control) может позволить несанкционированным пользователям получить доступ к ресурсам или данным, к которым у них нет прав.
5. File Upload Test – небезопасная загрузка файлов может привести к выполнению вредоносного кода на сервере.

Test Name	Website	Payload	Status	Test Date
Open Redirect Test	https://afisha.yandex.ru	http://malicious.com	Failure	2025-01-08 17:09:53
Open Redirect Test	https://afisha.yandex.ru	//attacker.com	Failure	2025-01-08 17:09:53
Open Redirect Test	https://afisha.yandex.ru	javascript:alert(1)	Failure	2025-01-08 17:09:53
Open Redirect Test	https://afisha.yandex.ru	https://evil.com	Failure	2025-01-08 17:09:53
HTTP Method Testing	https://afisha.yandex.ru	PUT	Failure	2025-01-08 17:09:53
Directory Listing	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/images/	Failure	2025-01-08 17:09:53
HTTP Method Testing	https://afisha.yandex.ru	DELETE	Failure	2025-01-08 17:09:53
HTTP Method Testing	https://afisha.yandex.ru	TRACE	Failure	2025-01-08 17:09:53
Broken Access Control	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/admin	Failure	2025-01-08 17:09:53
Directory Listing	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/uploads/	Failure	2025-01-08 17:09:54
File Upload Test	https://afisha.yandex.ru	test.php	Failure	2025-01-08 17:09:54
Directory Listing	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/files/	Failure	2025-01-08 17:09:54
Broken Access Control	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/dashboard	Failure	2025-01-08 17:09:54
Form Authentication Test	https://afisha.yandex.ru	N/A	Failure	2025-01-08 17:09:54
Sensitive Data Exposure	https://afisha.yandex.ru	N/A	Failure	2025-01-08 17:09:54
Directory Listing	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/backup/	Failure	2025-01-08 17:09:54
HTTP Method Testing	https://afisha.yandex.ru	OPTIONS	Success	2025-01-08 17:09:54
Broken Access Control	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/settings	Failure	2025-01-08 17:09:54
Broken Access Control	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/api/secret	Failure	2025-01-08 17:09:54
Directory Listing	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/data/	Failure	2025-01-08 17:09:55
Broken Access Control	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/config	Failure	2025-01-08 17:09:55
Directory File Exposure	https://afisha.yandex.ru	https://afisha.yandex.ru/index.html	Failure	2025-01-08 17:09:55
XSS Test	https://afisha.yandex.ru	">svg/onload=alert(1)<	Failure	2025-01-08 17:09:55
SQL Injection Test	https://afisha.yandex.ru	" OR '1'='1	Success	2025-01-08 17:09:55

Рисунок 7 – Просмотр отчета при помощи веб-браузера

Для оценки эффективности системы были рассмотрены следующие показатели:

1. Процент выявленных уязвимостей – система успешно выявила 100 % из пяти тестируемых уязвимостей, что подтверждает её высокую точность в обнаружении распространенных уязвимостей.

2. Время выполнения тестов – среднее время на выполнение одного теста составило 4 минуты, что свидетельствует о высокой скорости работы системы. Это важный аспект позволяет быстро тестировать различные веб-приложения, минимизируя затраты времени на анализ.

3. Точность и достоверность – ложноположительные результаты составили менее 5 %, что говорит о высокой достоверности работы системы. Для дальнейшего улучшения можно добавить дополнительные методы анализа, чтобы снизить этот показатель до минимального уровня.

Исходя из данных выше, можно сделать вывод, что разработанная система эффективно выявляет критические уязвимости в веб-приложениях и позволяет быстро получать подробные отчеты. Система показала высокую точность в обнаружении основных угроз, таких как Open Redirect, Broken Access Control и др. Для повышения эффективности системы следует продолжить её расширение, добавив дополнительные тесты для выявления более сложных уязвимостей и улучшив алгоритмы анализа.

#### Список источников

1. Лабораторный практикум по основам анализа защищенности веб-приложений / Томский государственный университет. – URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000491133/SOURCE1> (дата обращения: 20.09.2024).

2. Итоги пентестов 2022 // Positive Technologies. – 2022. – URL: [https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Results\\_of\\_pentests\\_2022\\_RUS.pdf](https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Results_of_pentests_2022_RUS.pdf) (дата обращения: 24.09.2024).

3. Никифоров, Н. Д. Разработка web-приложения для представления результатов работы систем распознавания лиц / Н. Д. Никифоров ; Тольяттинский государственный университет. – URL: <https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/28303/1/%D0%9D%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9D.%D0%94.%D0%9F%D0%98%D0%B1-1903%D0%B0.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).

4. Евтеев, Д. В. Внедрение систем управления безопасностью информации на основе международных стандартов / Д. В. Евтеев // Российская криптография и информационная безопасность. – 2010. – URL: [https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2010/files/10\\_evteyev.pdf](https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2010/files/10_evteyev.pdf) (дата обращения: 20.09.2024).

5. Инструменты для тестирования на проникновение // ITGLOBAL.COM. – URL: <https://itglobal.com/ru-ru/company/blog/instrumenty-dlya-testirovaniya-na-proniknovenie/> (дата обращения: 20.09.2024).

6. Инструменты для тестирования на проникновение // ClickFraud. – URL: <https://clickfraud.ru/16-luchshih-instrumentov-dlya-testirovaniya-na-proniknovenie/> (дата обращения: 21.09.2024).

7. Обзор инструментов для тестирования на проникновение // ITGlobal. – URL: <https://itglobal.com/ru-ru/company/blog/instrumenty-dlya-testirovaniya-na-proniknovenie/> (дата обращения: 21.09.2024).

8. Инструменты тестирования программного обеспечения // TQuality. – URL: <https://tquality.ru/blog/instrumenty-testirovaniya-programmnogo-obespecheniya1/> (дата обращения: 22.09.2024).

9. 20 лучших инструментов для тестирования на проникновение в 2023 году // Dzen.ru. – URL: <https://dzen.ru/a/Y-nd5Er1HRsRGXX> (дата обращения: 24.09.2024).

10. Инструменты для пентестинга и сканирования уязвимостей // PWA Dev Tools. – URL: [https://pwadev.ru/Learn/30days-pwa/dev-tools/06/#\\_5](https://pwadev.ru/Learn/30days-pwa/dev-tools/06/#_5) (дата обращения: 22.09.2024).
11. OWASP ZAP – руководство по использованию // OWASP. – URL: <https://www.zaproxy.org/docs/desktop/start/> (дата обращения: 23.09.2024).
12. Acunetix Web Vulnerability Scanner – обзор // Acunetix. – URL: <https://www.acunetix.com/web-vulnerability-scanner/> (дата обращения: 23.09.2024).
13. Методология тестирования безопасности веб-приложений с помощью Burp Suite / PortSwigger. – URL: <https://portswigger.net/burp/documentation/desktop/testing> (дата обращения: 23.09.2024).
14. Пособие по проведению тестирования на проникновение // Securitylab. – URL: <https://www.securitylab.ru/analytics/527503.php> (дата обращения: 23.09.2024).
15. Оценка уязвимостей и сканирование сети: инструменты и практики // Хакер. – URL: <https://haker.ru/2022/08/17/vulnerability-assessment-tools/> (дата обращения: 23.09.2024).
16. 20 лучших инструментов для тестирования на проникновение в 2023 году // Dzen.ru. – URL: <https://dzen.ru/a/Y-Ynd5Er1HRsRGXX> (дата обращения: 24.11.2024).
17. Инструменты для пентестинга и сканирования уязвимостей // PWA Dev Tools. – URL: [https://pwadev.ru/learn/30days-pwa/dev-tools/06/#\\_5](https://pwadev.ru/learn/30days-pwa/dev-tools/06/#_5) (дата обращения: 15.11.2024).
18. Avanteko. – URL: <https://avanteko.ru/> (дата обращения: 05.10.2024).
19. Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. – URL: <https://docs.cntd.ru/> (дата обращения: 22.10.2024).
20. КонсультантПлюс. – URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 20.11.2024).

#### References

1. *Laboratory workshop on the basics of Web application security analysis*. Tomsk State University. Available at: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000491133/SOURCE1> (accessed 20.09.2024).
2. Results of pentests 2022. *Positive Technologies*, 2022. Available at: [https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Results\\_of\\_pentests\\_2022\\_RUS.pdf](https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Results_of_pentests_2022_RUS.pdf) (accessed 24.09.2024).
3. Nikiforov, N. D. *Development of a web application for presenting the results of facial recognition systems*. Tolyatti State University. Available at: [https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/28303/1/%D0%9D%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9D.%D0%94.\\_%D0%9F%D0%98%D0%B1-1903%D0%B0.pdf](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/28303/1/%D0%9D%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9D.%D0%94._%D0%9F%D0%98%D0%B1-1903%D0%B0.pdf) (accessed 20.09.2024).
4. Evteev, D. V. Implementation of information security management systems based on international standards. *Russian cryptography and Information security*, 2010. Available at: [https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2010/files/10\\_evtteev.pdf](https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2010/files/10_evtteev.pdf) (accessed 20.09.2024).
5. Penetration Testing Tools. *ITGLOBAL.COM*. Available at: <https://itglobal.com/ru-ru/company/blog/instrumenty-dlya-testirovaniya-na-proniknovenie/> (accessed 20.09.2024).
6. Penetration Testing Tools. *ClickFraud*. Available at: <https://clickfraud.ru/16-luchshih-instrumentov-dlya-testirovaniya-na-proniknovenie/> (accessed 21.09.2024).
7. Overview of penetration testing tools. *ITGlobal*. Available at: <https://itglobal.com/ru-ru/company/blog/instrumenty-dlya-testirovaniya-na-proniknovenie/> (accessed 21.09.2024).
8. Software testing tools. *TQuality*. Available at: <https://tquality.ru/blog/instrumenty-testirovaniya-programmno-obespecheniya1/> (accessed 22.09.2024).
9. Top 20 Penetration Testing Tools in 2023. *Dzen.ru*. Available at: <https://dzen.ru/a/Y-Ynd5Er1HRsRGXX> (accessed 24.09.2024).
10. Tools for pentesting and vulnerability scanning. *PWA Dev Tools*. Available at: [https://pwadev.ru/learn/30days-pwa/dev-tools/06/#\\_5](https://pwadev.ru/learn/30days-pwa/dev-tools/06/#_5) (accessed 22.09.2024).
11. OWASP ZAP – usage guide. *OWASP*. Available at: <https://www.zaproxy.org/docs/desktop/start/> (accessed 23.09.2024).
12. Acunetix Web Vulnerability Scanner – review. *Acunetix*. Available at: <https://www.acunetix.com/web-vulnerability-scanner/> (accessed 23.09.2024).
13. Methodology for testing web application security using Burp Suite. *PortSwigger*. Available at: <https://portswigger.net/burp/documentation/desktop/testing> (accessed 23.09.2024).
14. Manual for conducting penetration testing. *Securitylab*. Available at: <https://www.securitylab.ru/analytics/527503.php> (accessed 23.09.2024).
15. Vulnerability assessment and network scanning: tools and practices. *Hacker*. Available at: <https://haker.ru/2022/08/17/vulnerability-assessment-tools/> (accessed 23.09.2024).
16. Top 20 Penetration Testing Tools in 2023. *Dzen.ru*. Available at: <https://dzen.ru/a/Y-Ynd5Er1HRsRGXX> (accessed 24.11.2024).
17. Tools for pentesting and vulnerability scanning. *PWA Dev Tools*. Available at: [https://pwadev.ru/learn/30days-pwa/dev-tools/06/#\\_5](https://pwadev.ru/learn/30days-pwa/dev-tools/06/#_5) (accessed 15.11.2024).
18. *Avanteco's official website*. Available at: <https://avanteko.ru/> (accessed 05.10.2024).
19. *Electronic fund of legal and regulatory and technical information*. Available at: <https://docs.cntd.ru/> (accessed 22.10.2024).
20. *ConsultantPlus*. Available at: <https://www.consultant.ru/> (accessed 20.11.2024).

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 14.05.2025.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 25.04.2025; accepted for publication 14.05.2025.

УДК 537.632

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗАПРОСОВ В БАЗАХ ДАННЫХ  
ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НИСХОДЯЩЕЙ, ВОСХОДЯЩЕЙ,  
ВНУРИТАБЛИЧНОЙ ДЕНОРМАЛИЗАЦИИ**

*Ефимов Егор Александрович*, МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Российская Федерация, г. Москва, пр-т Вернадского, 78, магистрант, e-mail: eeffiimmkkaa@48yandex.ru

*Лапин Дмитрий Сергеевич*, МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Российская Федерация, г. Москва, пр-т Вернадского, 78, магистрант, e-mail: lapin-ds@mail.ru

*Евдошенко Олег Игоревич*, МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Российская Федерация, г. Москва, пр-т Вернадского, 78, кандидат технических наук, доцент, ORCID:0000-0002-1318-2822, e-mail: evdoshenko@mirea.ru

В статье рассматриваются методы повышения производительности запросов в базах данных при применении денормализации. Внимание уделяется нисходящей, восходящей и внутритабличной денормализации. Представлены подходы к применению этих методов для оптимизации работы запросов, снижения времени работы запросов. Экспериментальные результаты показывают, что комбинирование этих методов может значительно повысить скорость выполнения операций чтения, особенно в системах с большими объемами данных и сложными запросами.

**Ключевые слова:** повышение производительности, базы данных, денормализация, нисходящая денормализация, восходящая денормализация, внутритабличная денормализация

**IMPROVING QUERY PERFORMANCE IN DATABASES BY APPLYING TOP-DOWN,  
BOTTOM-UP, AND INTRA-TABULAR DENORMALIZATION METHODS**

*Efimov Egor A.*, MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation, master's student, e-mail: eeffiimmkkaa@48yandex.ru

*Lapin Dmitrii S.*, MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation, master's student, e-mail: lapin-ds@mail.ru

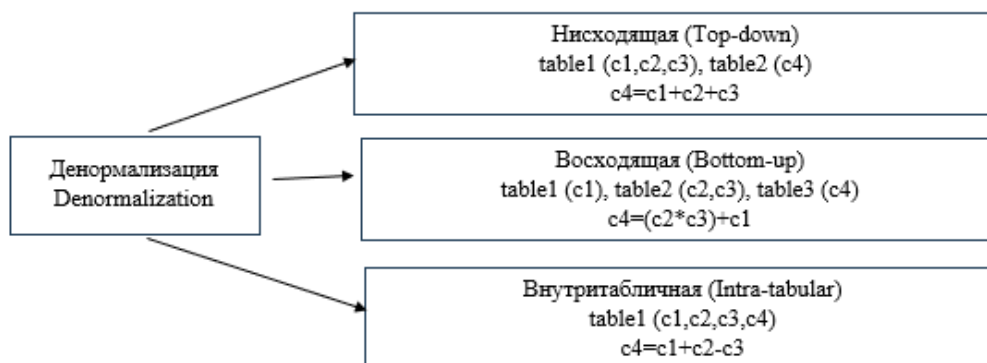
*Evdoshenko Oleg I.*, MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-1318-2822, e-mail: evdoshenko@mirea.ru

The article discusses methods for improving query performance in databases using denormalization. It focuses on top-down, bottom-up, and intra-table denormalization. Various approaches to applying these methods are presented to optimize query performance and reduce query execution time. Experimental results show that combining these methods can significantly increase the speed of read operations, especially in systems with large volumes of data and complex queries.

**Keywords:** performance improvement, databases, denormalization, top-down denormalization, bottom-up denormalization, intra-tabular denormalization

**Graphical annotation (Графическая аннотация)**



## ВВЕДЕНИЕ

Денормализация – это процесс, при котором структура базы данных изменяется с целью повышения производительности и упрощения запросов за счет снижения уровня нормализации. Это особенно актуально в современном мире, где объемы обрабатываемых данных растут, а требования к скорости доступа к информации становятся все более жесткими.

Основной принцип денормализации заключается в том, что следует тщательно анализировать, каких именно улучшений производительности можно достичь, и продумывать, как изменения повлияют на общую структуру и целостность данных. В конечном счете полезность денормализации должна быть взвешена в контексте специфических бизнес-требований и сценариев использования.

В эпоху экспоненциального роста данных [1] задача оптимизации производительности запросов становится критически важной для современных систем реального времени. Денормализация становится важным инструментом для многих организаций, особенно тех, кто работает с большими объемами данных, такими как компании в сфере электронной коммерции, финансов и социальных сетей. Особую актуальность методы денормализации [2, 3] приобретают в контексте систем аналитической обработки OLAP, платформ IoT с высокой нагрузкой на чтение, E-commerce систем с требованиями субсекундного отклика.

**Цель исследования:** провести анализ различных методов денормализации, таких как нисходящая, восходящая и внутритабличная денормализация, а также их влияния на производительность баз данных.

## ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ДЕНОРМАЛИЗАЦИИ

Алгоритм денормализации данных в реляционных базах данных включает несколько ключевых этапов, которые помогут трансформировать схему данных для достижения большей скорости выполнения запросов и оптимизации работы с данными. Подробное описание предлагаемого решения денормализации:

На первом этапе необходимо провести анализ существующей схемы базы данных и выявить, какие таблицы содержат связи, которые могут быть денормализованы для улучшения производительности. Важно проанализировать частоту выполнения конкретных запросов, а также объем данных, так как это поможет определить, какие именно данные наиболее критично нуждаются в оптимизации.

Далее, после выявления таблиц, стоит рассмотреть, какие именно поля можно объединить. Следующий этап включает в себя проектирование новой схемы данных. На этом этапе необходимо создать денормализованную таблицу, которая будет включать в себя как минимум одно или несколько полей из различных связанных таблиц. Это позволит уменьшить количество операций JOIN, которые требуется выполнять при извлечении данных.

На этапе тестирования подразумевается проверка новой денормализованной структуры на производительность. Это можно сделать путем создания и выполнения тех же запросов к новой таблице и сопоставления времени их выполнения по сравнению с первоначальной нормализованной схемой. Важно удостовериться, что изменение не повлияло на целостность данных и что все нужные данные доступны и корректны.

## НИСХОДЯЩАЯ ДЕНОРМАЛИЗАЦИЯ

**Нисходящая денормализация** [4] – транспозиция атрибутов в зависимую, дочернюю, подчиненную сущность-потомка из сущностей родовых предков. Во время использования данного способа в сущность, которая содержит в себе внешний ключ, добавляется атрибут, который определяет внешний ключ. Данный способ денормализации, несмотря на повышение избыточности, увеличивает производительность операций чтения, так как дает возможность избавиться от операций объединения, т. е. операций объединений множества сущностей, их соединений.

На рисунке 1 показана нормализованная логическая модель данных, на которой показаны сущности «клиенты», «заказы» и их связь.

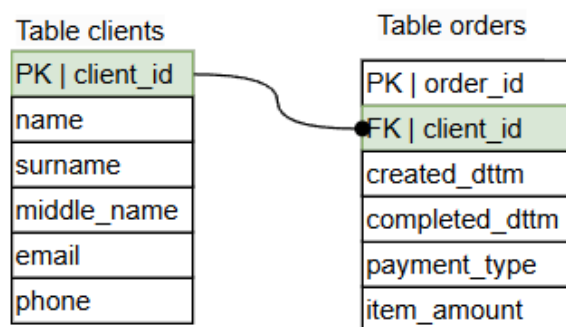


Рисунок 1 – Нормализованная логическая модель данных

На рисунке 2 показана денормализованная логическая модель данных, на которой показаны сущности “clients”, “orders” и их связь.

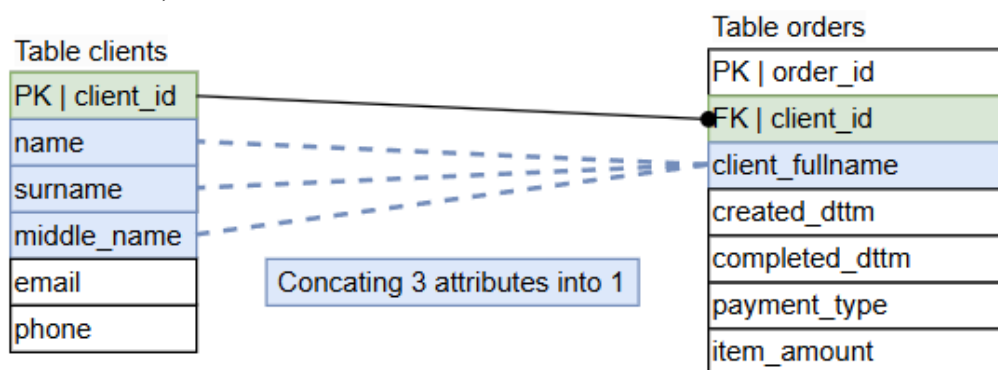


Рисунок 2 – Денормализованная логическая модель данных

На рисунке 2 видно, что атрибуты данных “name”, “surname”, “middle\_name” из родительской сущности “clients” были переведены в дочернюю сущность “orders”. Несмотря на то, что приведенная выше транспозиция добавляет избыточности, данное решение позволяет сократить время выполнения операции чтения за счет исключения операции объединения в случае вывода данных, содержащихся в сущности “clients”, при котором также потребуется вывести атрибуты “name”, “surname”, “middle\_name”.

Запрос для нормализованной базы данных представлен в листинге 1.

Листинг 1 – Запрос к нормализованной базе данных

```
SELECT
  clients.client_id,
  CONCAT(clients.name, ' ', clients.surname, ' ', clients.middle_name) AS client_fullname,
  orders.order_id,
  orders.created_dttm
FROM orders AS orders
INNER JOIN clients AS clients
ON orders.client_id = clients.client_id;
```

Запрос для денормализованной базы данных представлен в листинге 2.

Листинг 2 – Запрос к денормализованной базе данных

```
SELECT
  orders.client_id,
  orders.client_fullname,
  orders.order_id,
  orders.created_dttm
FROM orders AS orders;
```

В таблице 1 приведены метрики минимального, максимального, среднего времени выполнения двух запросов в нормализованной и денормализованной баз данных, которые были получены при помощи скрипта (<https://github.com/busterkeatonnn/denormaliz>). Расчет каждого показателя производился на основании данных 100 (ста) запросов.

Время выполнения запроса в денормализованной базе данных меньше в восемь раз, чем время в нормализованной базе данных. Но, несмотря на явное повышение производительности операций чтения, при применении данного метода денормализации стоит учитывать увеличение нагрузки DML-операций, которое в данной работе не будет рассматриваться.

Таблица 1 – Сравнительная таблица времени выполнения запросов при нисходящей денормализации

Показатель	Кол-во строк в сущности				
	30	300	3000	30000	300000
Минимальное время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды), точность до 2 знаков после запятой	0,09	0,43	4,14	41,53	634,50
Минимальное время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды), точность до 2 знаков после запятой	0,02	0,09	0,80	7,416	80,86
Максимальное время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды), точность до 2 знаков после запятой	0,27	0,70	7,11	82,10	839,60
Максимальное время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды), точность до 2 знаков после запятой	0,70	0,17	1,20	13,36	114,50
Среднее время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды), точность до 2 знаков после запятой	0,09	0,49	4,66	47,36	711,36
Среднее время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды), точность до 2 знаков после запятой	0,03	0,10	0,80	8,66	87,00

### ВОСХОДЯЩАЯ ДЕНОРМАЛИЗАЦИЯ

Метод восходящей денормализации предполагает увеличение количества хранимых данных за счёт перемещения атрибутов из зависимой дочерней сущности-потомка в главную (родительскую) сущность. В отличие от метода нисходящей денормализации, этот способ используется для исключения операций соединения с операциями агрегирования. Он может быть применён ко всем полям, являющимся агрегатами.

На рисунке 3 показана нормализованная логическая модель данных, на которой показаны сущности “deliveries”, “orders”, “order\_products” и их связи.

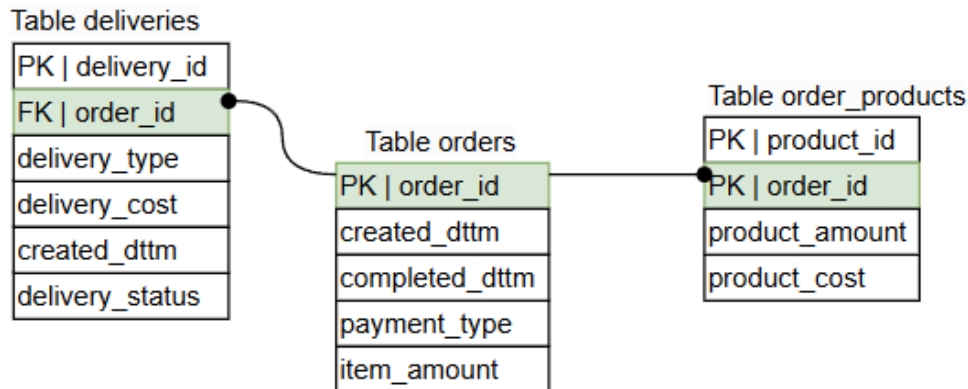


Рисунок 3 – Нормализованная логическая модель данных

На рисунке 4 показана денормализованная логическая модель данных, на которой показаны сущности “deliveries”, “orders”, “order\_products” и их связи.

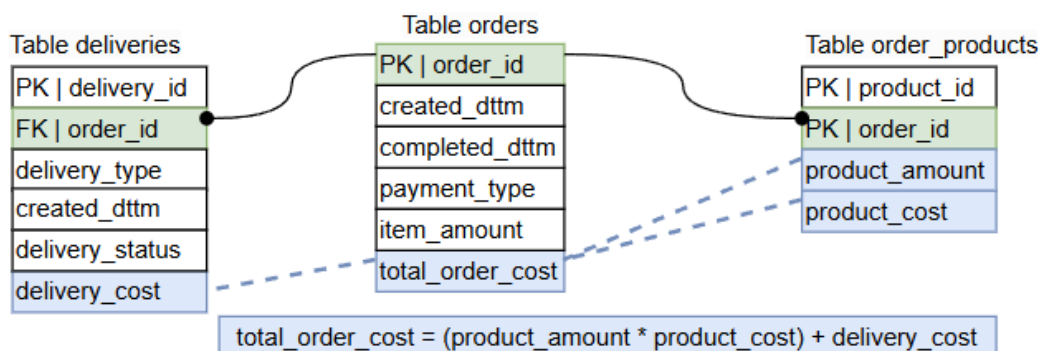


Рисунок 4 – Денормализованная логическая модель данных

На рисунке 4 видно, что в родительскую сущность “orders” был добавлен атрибут “total\_order\_cost”, который обозначает общую сумму заказа и вычисляется как сумма стоимости доставки и сумма всех товаров, принадлежащих заказу. Несмотря на то, что приведенная выше транзакция добавляет избыточности, данное решение позволяет сократить время выполнения операции чтения за счет исключения двух операций объединения в случае вывода данных, содержащих информацию об общей сумме заказа.

Запрос для нормализованной базы данных представлен в листинге 3.

Листинг 3 – Запрос к нормализованной базе данных

```
SELECT
orders.order_id,
orders.total_order_cost,
orders.created_dttm
FROM orders AS orders;
```

Запрос для денормализованной базы данных представлен в листинге 4.

Листинг 4 – Запрос к нормализованной базе данных

```
SELECT
orders.order_id,
orders.total_order_cost,
orders.created_dttm
FROM orders AS orders;
```

В таблице 2 приведены метрики минимального, максимального, среднего времени выполнения запроса в нормализованной и денормализованной баз данных, которые были получены при помощи скрипта (<https://github.com/busterkeatonnn/denormaliz>). Расчет каждого показателя производился на основании данных 100 (ста) запросов.

Таблица 2 – Сравнительная таблица времени выполнения запросов при восходящей денормализации

Показатель	Кол-во строк в сущности				
	30	300	3000	30000	300000
Минимальное время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,25	1,42	13,22	153,40	2135,00
Минимальное время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,022	0,08	0,62	6,05	62,18
Максимальное время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,60	3,03	20,4	299,70	2678,00
Максимальное время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,057	0,30	1,20	13,93	96,51
Среднее время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,32	1,65	15,46	169,49	2330,67
Среднее время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,026	0,09	0,70	6,84	69,94

Время выполнения запроса в денормализованной базе данных меньше в тридцать три раза, чем время в нормализованной базе данных. Несмотря на явное повышение производительности операций чтения, при применении данного метода денормализации стоит учитывать увеличение нагрузки DML-операций, которое в данной работе не будет рассматриваться.

#### ВНУТРИТАБЛИЧНАЯ ДЕНОРМАЛИЗАЦИЯ

Метод внутритабличной денормализации в отличие от методов нисходящей и восходящей денормализаций применяется относительно одной сущности. Суть метода заключается в добавлении в сущность избыточного атрибута, вычисляемого на основании других атрибутов этой же сущности. Данный метод денормализации, несмотря на повышение избыточности, увеличивает производительность операций чтения, так как дает возможность избавиться от дополнительных вычислений

в запросе. Также стоит отметить, что после денормализации сущности после добавления избыточного поля возможно построить индекс по этому полю, что также может привести к уменьшению времени чтения сущности.

На рисунке 5 показана нормализованная сущность движения товаров.

Table stock\_movement

PK   stock_movement_id
item_id
date
beginning_amount
arrival_amount
disposal_amount

Рисунок 5 – Нормализованная сущность движения товаров

На рисунке 6 показана денормализованная сущность движения товаров.

Table stock\_movement

PK   stock_movement_id
item_id
date
beginning_amount
arrival_amount
disposal_amount
final_amount

$$\text{final\_amount} = \text{beginning\_amount} + \text{arrival\_amount} - \text{disposal\_amount}$$

Рисунок 6 – Денормализованная сущность движения товаров

На рисунке 6 видно, что в сущность “stock\_movement” был добавлен атрибут “final\_amount”, который обозначает итоговое количество товара на складе на определенную дату и вычисляется как разность суммы количества товара на начало дня, прихода товара и расхода товара. Несмотря на то, что приведенная выше транспозиция добавляет избыточности, данное решение позволяет сократить время выполнения операции чтения за счет исключения вычислений значения конечного количества товара.

Запрос для нормализованной базы данных представлен в листинге 5.

Листинг 5 – Запрос к нормализованной базе данных

```
SELECT
    stock.stock_movement_id,
    stock.item_id,
    stock.date,
    stock.beginning_amount,
    stock.arrival_amount,
    stock.disposal_amount,
    stock.beginning_amount + stock.arrival_amount - stock.disposal_amount AS final_amount
FROM stock_movement AS stock;
```

Запрос для денормализованной базы данных представлен в листинге 6.

Листинг 6 – Запрос к нормализованной базе данных

```
SELECT
stock.stock_movement_id,
stock.item_id,
stock.date,
stock.beginning_amount,
stock.arrival_amount,
stock.disposal_amount,
stock.final_amount
FROM stock_movement AS stock;
```

В таблице 3 приведены метрики минимального, максимального, среднего времени выполнения запроса в нормализованной и денормализованной баз данных, которые были получены при помощи скрипта (<https://github.com/busterkeatonnn/denormaliz>). Расчет каждого показателя производился на основании данных 100 (ста) запросов.

Таблица 3 – Сравнительная таблица времени выполнения запросов при внутритабличной денормализации

Показатель	Кол-во строк в каждой сущности				
	30	300	3000	30000	300000
Минимальное время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,03	0,18	1,58	15,72	160,30
Минимальное время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,02	0,06	0,424	4,13	41,42
Максимальное время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,07	0,30	2,85	28,91	222,00
Максимальное время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,05	0,10	0,651	5,66	158,2
Среднее время выполнения запроса в нормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,04	0,19	1,81	19,24	178,21
Среднее время выполнения запроса в денормализованной базе данных, мс (миллисекунды)	0,02	0,7	0,46	4,34	45,62

Время выполнения запроса в денормализованной базе данных меньше в четыре раза, чем время в нормализованной базе данных. Несмотря на явное повышение производительности операций чтения, при применении данного метода денормализации стоит учитывать увеличение нагрузки DML-операций, которое в данной работе не будет рассматриваться.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов денормализации – нисходящей, восходящей и внутритабличной – является эффективным инструментом для повышения производительности запросов в базах данных. Каждый из этих подходов позволяет оптимизировать работу системы, сокращает время выполнения аналитических запросов и снижает нагрузку на сервер при выполнении операций чтения. Экспериментальные результаты данного исследования демонстрируют, что применение методов денормализации (уменьшение количества операций соединения, агрегации или добавление новых столбцов, являющихся результатом предварительных вычислений) позволяет снизить среднее время выполнения операций выборки (SELECT) при нисходящей – в восемь раз, восходящей – в тридцать три раза, внутритабличной – в четыре раза.

Денормализация остается актуальным инструментом в современных системах управления базами данных, особенно в контексте быстрого роста объема данных и необходимости высокой производительности. Однако подход к денормализации должен быть сбалансированным и обоснованным, с осторожным учетом всех потенциальных рисков и недостатков.

**Список источников**

1. Осипов, Д. Л. Технологии проектирования баз данных / Д. Л. Осипов // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/124575.html> (дата обращения: 01.05.2025).
2. Космачева, И. М. Проектирование защищенных баз данных : учебное пособие / И. М. Космачева, Н. В. Давидюк // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/95265.html> (дата обращения: 03.05.2025).
3. Лисицина, В. В. Повышение эффективности запросов к PostgreSQL с использованием промежуточных таблиц в денормализованной форме / В. В. Лисицина // XII Конгресс молодых ученых : сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 03–06 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург : Национальный исследовательский университет ИТМО, 2023. – С. 336–339.
4. Levitskii, A. A. Investigation of the effectiveness of using the method of descending denormalization in order to eliminate the hash join / A. A. Levitskii // Современные научные исследования и инновации. – 2021. – № 5 (121).
5. Бронвальд, Л. А. Применение нормализации и денормализации в проектировании баз данных / Л. А. Бронвальд, Д. И. Клеев // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 110–16. – С. 27–31. – DOI: 10.18411/trnio-06-2024-854.
6. Alekseev, K. Relational database problems / K. Alekseev // Кибернетика и программирование. – 2020. – № 2. – P. 7–18. – DOI 10.25136/2644-5522.2020.2.34076. – EDN LSBCIE.
7. Milićev, D. Hyper-Relations: A Model for Denormalization of Transactional Relational Databases / D. Milićev // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2023. – Vol. 35, № 4. – P. 3979–3990. – DOI: 10.1109/tkde.2021.3124134. – EDN CUAIQI.
8. Bansal, N. Query-based denormalization using hypergraph (QBDNH): a schema transformation model for migrating relational to NoSQL databases / N. Bansal, Sh. Sachdeva, L. K. Awasthi // Knowledge and Information Systems. – 2024. – Vol. 66, № 1. – P. 681–722. – DOI: 10.1007/s10115-023-02017-y. – EDN BWCMII.

**References**

1. Osipov, D. L. Database design technologies. *Digital educational resource IPR SMART*. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/124575.html> (accessed 01.05.2025).
2. Kosmacheva, I. M. Davidiuk, N. V. Design of secure databases : a textbook. *Digital educational resource IPR SMART*. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/95265.html> (accessed 03.05.2025).
3. Lisitsina, V. V. Improving the efficiency of PostgreSQL queries using intermediate tables in a denormalized form. *XII Congress of Young Scientists : collection of Scientific Papers, St. Petersburg, 03-06 April 2023*. Saint Petersburg: ITMO National Research University, 2023, pp. 336–339.
4. Levitskii, A. A. Investigation of the effectiveness of using the method of descending denormalization in order to eliminate the hash join. *Modern Sciences and Innovations*, 2021, no. 5 (121).
5. Bronwald, L. A., Kleev, D. I. Application of normalization and denormalization in database design. *Trends in the Development of Science and Education*, 2024, no. 110–16, pp. 27–31. DOI: 10.18411/trnio-06-2024-854.
6. Alekseev, K. Relational database problems. *Cybernetics and Programming*, 2020, no. 2, pp. 7–18. DOI: 10.25136/2644-5522.2020.2.34076. EDN LSBCIE.
7. Milićev, D. Hyper-Relations: A Model for Denormalization of Transactional Relational Databases. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2023, vol. 35, no. 4, pp. 3979–3990. DOI: 10.1109/tkde.2021.3124134. EDN CUAIQI.
8. Bansal, N., Sachdeva, Sh., Awasthi, L. K. Query-based denormalization using hypergraph (QBDNH): a schema transformation model for migrating relational to NoSQL databases. *Knowledge and Information Systems*, 2024, vol. 66, no. 1, p. 681–722. DOI: 10.1007/s10115-023-02017-y. EDN BWCMII.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 13.05.2025; принята к публикации 02.06.2025.

The article was submitted 05.05.2025; approved after reviewing 13.05.2025; accepted for publication 02.06.2025.

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОСТРЕБОВАННОСТИ  
НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СРЕДИ АБИТУРИЕНТОВ**

*Агарков Гавриил Александрович*, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Российская Федерация г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, доктор экономических наук, профессор кафедры анализа систем и принятия решений Института экономики и управления, заведующий Научно-исследовательской лабораторией по проблемам университетского развития, ORCID: 0000-0002-6533-3557, e-mail: g.a.agarkov@urfu.ru

*Зафиров Евгений Ахилесович*, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Российская Федерация г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, аспирант, ORCID ID: 0000-0002-7508-7994, e-mail: e.a.zafirov@urfu.ru.

Прогнозирование поведения абитуриентов образовательных организаций высшего образования является важным фактором, в том числе для повышения финансовой устойчивости и конкурентоспособности университетов на внутрироссийском рынке образовательных услуг в сфере высшего образования. Прогнозирование востребованности тех или иных направлений подготовки абитуриентов потенциально сказывается на объемах финансовых средств, полученных образовательной организацией высшего образования от обучающихся на основании договоров об оказании образовательных услуг («контрактная» форма обучение) и обучающихся за счет средств федерального бюджета. Соответственно, их необходимо учитывать в целях эффективного экономического планирования и использовать в роли инструмента влияния на принятие управленческих решений в университете, например, перераспределение внутренних экономических и человеческих ресурсов. Описаны результаты выбора оптимальных моделей прогнозирования числа абитуриентов, сдающих те или иные предметы в форме Единого государственного экзамен с учетом статистических данных за период с 2019 по 2022 г. с проверкой моделей по данным 2023 г. Приведены расчёты по 8 методикам, методики ранжированы по степени соответствия работы модели фактическим результатам. Работа проводится в рамках разработки новой методики прогнозирования востребованности образовательных программ высшего образования среди абитуриентов, получающих высшее образование впервые, с использованием алгоритма и информационной системы.

**Ключевые слова:** управление университетами, высшее образование, модель прогнозирования, финансирование университетов

**RESULTS OF MODELING OF FORECASTING THE DEMAND  
FOR EDUCATIONAL PROGRAMS OF UNIVERSITIES AMONG APPLICANTS**

*Agarkov Gavriil A.*, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation,

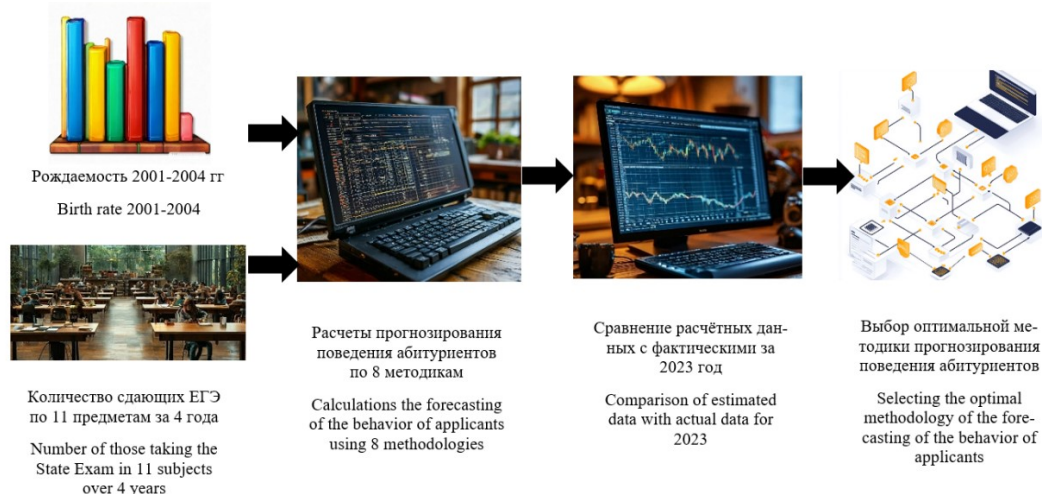
Doct. Sci. (Economics), Professor of the Department of Systems Analysis and Decision Making of the Institute of Economics and Management, Head of the Research Laboratory for University Development Problems, ORCID ID: 0000-0002-6533-3557, e-mail: g.a.agarkov@urfu.ru

*Zafirov Evgenii A.*, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, graduate student, ORCID ID: 0000-0002-7508-7994, e-mail: e.a.zafirov@urfu.ru.

The forecasting of the behavior of applicants to universities is an important factor for increasing the financial stability and competitiveness of universities in Russian Federation. Forecasting the demand for different educational programs among applicants potentially affects the financial resources received by the educational organization of higher education from students of different form of payment of educational services. Accordingly, it should be considered for the purpose of effective economic planning and used as an instrument of influence on the adoption of managerial decisions in the university, for example: redistribution of internal economic and human resources. The study expressed results of the selection of optimal models for forecasting the quantity of applicants who passed different exams after school education are described. The study considered statistical data for the period from 2019 to 2022, with the verification of models based on the data of 2023. The article provides calculations using 8 methods; the methods are ranked according to the criteria of conformity of the model's performance with the actual results. The treatise is carried out as part of the development of a new methodology for forecasting the demand for higher educational programs using an algorithm and an information system among applicants receiving higher education for the first time.

**Keywords:** university management; higher education; financing systems; forecasting model; university funding

Graphical annotation (Графическая аннотация)



**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время успешность и экономическая устойчивость университетов в Российской Федерации напрямую зависит от их востребованности и популярности у потенциальных абитуриентов. Востребованность может складываться из множества факторов: кроме качественного образования, вопросов местоположения и логистики важную роль играет репутация университета, уровень востребованности выпускников и другие факторы. Также зачастую имеет место иррациональное поведение абитуриентов, выражающееся в выборе более «лёгких» предметов Единого государственного экзамена (ЕГЭ) [1]. Полное бюджетное финансирование университетов за счет государственного задания и контрольных цифр приема (КЦП) ушло в прошлое: в настоящее время до 76 % общей величины дохода вуза складываются из собственных доходов, получаемых от оказания образовательных услуг по договорам [2]. При этом данная тенденция характерна не только для университетов Российской Федерации [3]. В связи с этим важной задачей университетов является создание и поддержание эффективной системы привлечения и удержания абитуриентов и прогнозирование их поведения в рамках выбора направлений подготовки для получения первого высшего образования (программы бакалавриата и специалитета).

Ведется разработка информационной системы (ИТ-системы) прогнозирования востребованности направлений подготовки образовательных организаций высшего образования (ООВО) среди абитуриентов, анализирующей одновременно несколько параметров, ключевым из которых является комплект Единого государственного экзамена (результаты экзаменов), состоящий из трех предметов в привязке к направлению подготовки университета [4]. Информационная система нацелена на статистический анализ 6 параметров, делящихся на две группы – статические и динамические. Информационная система представляет собой алгоритм, анализирующий рассматриваемую ситуацию по 6 параметрам на основании функциональных зависимостей с учетом статистической ситуации за определенный период. Система ориентирована на анализ данных по абитуриентам, поступающим на первый уровень высшего образования: направления подготовки бакалавриата и специальности. В качестве параметров рассматриваются: направления науки (предметные области) и комплекты ЕГЭ (два статических параметра); рождаемость, количество сдающих ЕГЭ по комплектам, количество поданных заявлений по направлениям подготовки и контрольные цифры приема по направлениям подготовки, финансируемым за счет средств федерального бюджета (далее – ФБ, «бюджетная» форма обучения) Российской Федерации (четыре динамических параметра, зависящие от года).

Целью работы на первом этапе является создание и апробация оптимальных моделей прогнозирования числа абитуриентов, сдающих те или иные предметы в форме ЕГЭ с учетом статистических данных за период с 2019 по 2022 г. с проверкой моделей по данным 2023 г.

**РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА**

В качестве первого параметра для анализа возьмем рождаемость в Российской Федерации за 2001–2004 гг. по данным Федеральной службы государственной статистики [5]. Выбор годов рождения обусловлен тем, что 18-летние граждане занимают превосходящую долю среди абитуриентов. Также важно отметить, что большая доля 18-летних граждан Российской Федерации поступают именно в образовательные организации высшего образования [6, с. 9], в сравнении с образовательными организациями

профессионального образования. Таким образом, для 2019 г. поступления данный параметр будет равняться 1 311 604 человек, для 2020 г. – 1 139 697 человек, для 2021 г. – 1 477 301 человек и для 2022 г. – 1 502 477 человек. Как видно, количество родившихся в указанные годы постоянно росло.

Количество поступающих на образовательные программы бакалавриата и специалитета (в том числе на места, финансируемые за счет средств федерального бюджета) также растет, о чем уже упоминалось ранее. При этом государство стимулирует обучение техническим и естественно-научным специальностям, предоставляя возможности для обучения за счет средств государственного финансирования (стипендиальное обеспечение) [7, с. 246]. Приведем сведения на примере ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ) (табл. 1) по данным ежегодных отчетных презентаций «Об Итогах деятельности университета» – материалам заседаний ученого совета университета за период с 2020 по 2023 г. за предшествующий отчетный период (календарный год) [8].

Таблица 1 – Количество зачисленных в УрФУ

Направления подготовки бакалавриата											
2019			2020			2021			2022		
ФБ	Дого-вор	Итого	ФБ	Дого-вор	Итого	ФБ	Дого-вор	Итого	ФБ	Дого-вор	Итого
3495	3856	7351	3798	2521	6319	4678	4195	8873	5574	4418	9922
Специальности											
2019			2020			2021			2022		
ФБ	Дого-вор	Итого	ФБ	Дого-вор	Итого	ФБ	Дого-вор	Итого	ФБ	Дого-вор	Итого
444	418	862	482	361	843	551	532	1083	649	617	1226

Для апробации работоспособности моделей на 2023 г. для поступления в ООВО также будут необходимы данные по 2005 г. рождения – они составляют 1 457 376 человек.

В качестве следующего параметра для анализа было рассмотрено количество абитуриентов, сдававших ЕГЭ по тому или иному предмету с 2019 по 2022 г. [9, 10]. Предметы, по которым проводился анализ: русский язык, математика (профильный уровень), физика, информатика и информационно-коммуникационные технологии, история, обществознание, химия, биология, география, литература, английский язык. Полученные результаты были записаны в таблицу 2.

Таблица 2 – Сдававшие ЕГЭ по предметам с 2019 по 2022 г.

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
2019	662000	50,47	367000	27,98	139500	10,64
2020	614000	43,95	362000	25,91	139574	9,99
2021	680000	46,03	393000	26,60	128000	8,66
2022	647000	43,06	302000	20,10	100000	6,66
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
2019	80056	6,10	103330	7,88	315000	24,02
2020	83610	5,99	102330	7,33	292701	20,95
2021	94023	6,36	100000	6,77	307000	20,78
2022	101664	6,77	90000	5,99	267000	17,77
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
2019	139500	10,64	128854	9,82	17794	1,36
2020	139574	9,99	124559	8,92	11841	0,85
2021	128000	8,66	127000	8,60	14500	0,98
2022	95000	6,32	109000	7,25	13000	0,87
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.	Английский язык, %		
2019	51132	3,90	76492	5,83		
2020	46755	3,35	81793	5,86		
2021	48000	3,25	87588	5,93		
2022	42500	2,83	87000	5,79		

Для последующего сравнения результатов работы моделей с фактическими данными, в таблице 3 по аналогии были приведены данные для 2023 года поступления.

Таблица 3 – Сдававшие ЕГЭ по предметам в 2023 г.

Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.		Английский язык, %	
44000	3,02	80000		5,49	

**ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА**

Используя имеющиеся данные рождаемости, количества сдававших ЕГЭ по различным предметам и рассчитанные данные о проценте сдававших ЕГЭ за период с 2019 по 2022 г., проведем расчеты процента сдававших ЕГЭ в 2023 г. с использованием различных методик. По итогу необходимо определить предметы, которые лучше или хуже всего поддаются прогнозированию, и наиболее эффективные (дающие наименьшую погрешность) методики прогнозирования. Результаты с погрешностью выше 10 % рассматриваться не будут, как априорно не дающие необходимого результата. По всем методикам в качестве параметров рассматривались значения за период с 2019 по 2022 г. с применением полученного результата к 2023 г. и с вычислением отклонения полученного значения от реальных данных. Отклонение рассматривается по модулю.

В качестве первой методики было рассмотрено простое вычисление среднего значения процента сдававших тот или иной предмет за 4 года. Результаты записаны в таблице 4.

Таблица 4 – Расчет по методике среднего значения

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	668633	45,88	366519	25,15	130971	8,99
<b>Отклонение</b>	6,82 %	3,13 %	22,79 %	5,73 %	32,05 %	2,88 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	91887	6,30	101880	6,99	304303	20,88
<b>Отклонение</b>	22,98 %	1,45 %	11,66 %	0,82 %	11,27 %	2,35 %
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
<b>Факт 2023</b>	74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
<b>Расчет</b>	129759	8,90	126034	8,65	14760	1,01
<b>Отклонение</b>	42,97 %	3,83 %	16,69 %	1,44 %	11,92 %	0,12 %
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.		Английский язык, %	
<b>Факт 2023</b>	44000	3,02	80000		5,49	
<b>Расчет</b>	48542	3,33	85280		5,85	
<b>Отклонение</b>	9,36 %	0,31 %	6,19 %		0,36 %	

В качестве второй методики было рассмотрено простое вычисление медианы процента сдававших тот или иной предмет. Результаты записаны в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет по методике медианы

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	655690	44,99	382677	26,26	135942	9,33
<b>Отклонение</b>	4,99 %	2,24 %	26,05 %	6,84 %	34,53 %	3,22 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	90854	6,23	102703	7,05	304109	20,87
<b>Отклонение</b>	24,38%	1,52%	12,37%	0,87%	11,22%	2,34%
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
<b>Факт 2023</b>	74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
<b>Расчет</b>	135942	9,33	127616	8,76	13457	0,92
<b>Отклонение</b>	45,56 %	4,25 %	17,72 %	1,55 %	3,40 %	0,03 %
	Литература, чел.	Литература, %		Английский язык, чел.	Английский язык, %	
<b>Факт 2023</b>	44000	3,02		80000	5,49	
<b>Расчет</b>	48065	3,30		85162	5,84	
<b>Отклонение</b>	8,46 %	0,28 %		6,06 %	0,35 %	

В качестве третьей методики было рассмотрено вычисление процента сдававших тот или иной предмет посредством определения дельты между процентом сдававших в 2022 г. и средним значением дельт между последовательными предыдущими годами. Данная методика потенциально способна учитывать восходящие и нисходящие тенденции в востребованности тех или иных предметов в выпускников школ. Результаты записаны в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет по методике определения дельт

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	591580	40,59	254650	17,47	77663	5,33
<b>Отклонение</b>	5,31 %	2,16 %	11,13 %	1,95 %	14,60 %	0,78 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	101832	6,99	78126	5,36	228644	15,69
<b>Отклонение</b>	10,97%	0,77 %	15,20 %	0,81 %	18,09 %	2,84 %
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
<b>Факт 2023</b>	74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
<b>Расчет</b>	71196	4,89	93246	6,40	10222	0,70 %
<b>Отклонение</b>	3,94 %	0,19 %	12,61 %	0,81 %	27,17 %	0,19 %
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.		Английский язык, %	
<b>Факт 2023</b>	44000	3,02	80000		5,49	
<b>Расчет</b>	36027	2,47	84187		5,78	
<b>Отклонение</b>	22,13 %	0,55 %	4,97 %		0,29 %	

Для описания следующих, более сложных методик расчета необходимо ввести условные обозначения, указанные в таблице 7.

Таблица 7 – Условные обозначения

Год	Условное обозначение процента сдававших предмет
2019	A
2020	B
2021	C
2022	D
2023	E

Последующие методики позволяют выразить искомую величину E с учетом соотношений различного типа между величинами процентов сдававших тот или иной предмет в предыдущие годы.

Четвертая методика выражает величину E по формуле (1), учитывающей восходящие и нисходящие тенденции в востребованности тех или иных предметов у выпускников школ без упрощения тенденций на среднее значение, имевшего место в третьей методике:

$$E = D - ((C - D)/(B - C))/((B - C)/(A - B)) * ((C - D)/(B - C)). \quad (1)$$

Полученные результаты приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет по методике дельт без усреднения

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	720909	49,47	4183542	287,06	80767	5,54
<b>Отклонение</b>	13,58 %	6,72 %	93,24 %	267,64 %	10,19 %	0,56 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	103723	7,12	58854	4,04	-80014216	-5490,29
<b>Отклонение</b>	8,94 %	0,64 %	52,92 %	2,14 %	100,34 %	5508,82 %
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
<b>Факт 2023</b>	74000	5,08	105000	7,20%	13000	0,89%
<b>Расчет</b>	70094	4,81	-623992	-208136768,11%	54395	3,73%
<b>Отклонение</b>	5,57 %	0,27 %	116,83 %	208136775,31%	76,10%	2,84%
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.	Английский язык, %		
<b>Факт 2023</b>	44000	3,02	80000			
<b>Расчет</b>	1481688	-101,67	68379			
<b>Отклонение</b>	102,97 %	104,69 %	17,00 %			

В рамках пятой методики величина E выражается по формуле (2), представляющей собой прямую (от более позднего года к более раннему) направленную динамику значений процентов выпускников школ, выбиравших экзамены по тем или иным предметам в период с 2019 по 2022 г.:

$$E = D - (((D - C) - (C - B)) - ((C - B) - (B - A))). \quad (2)$$

Полученные результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет по методике направленной динамики (прямой)

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	826407	56,71	437925	30,05	96996	6,66
<b>Отклонение</b>	24,61 %	13,96 %	35,38 %	10,63 %	8,24 %	0,55 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	105541	7,24	90503	6,21	342512	23,50
<b>Отклонение</b>	7,07%	0,51 %	0,56 %	0,03 %	21,17 %	4,98 %
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
<b>Факт 2023</b>	74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
<b>Расчет</b>	96996	6,66	129200	8,87	25626	1,76
<b>Отклонение</b>	23,71 %	1,58 %	18,73 %	1,66 %	49,27 %	0,87 %
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.	Английский язык, %		
<b>Факт 2023</b>	44000	3,02	80000	5,49		
<b>Расчет</b>	52542	3,61	88223	6,05		
<b>Отклонение</b>	16,26 %	0,59 %	9,32 %	0,56 %		

В рамках шестой методики величина  $E$  выражается по формуле (3), представляющей собой обратную (от более раннего года к более позднему) направленную динамику значений процентов выпускников школ, выбиравших экзамены по тем или иным предметам в период с 2019 по 2022 г.:

$$E = D - (((A - B) - (B - C)) - ((B - C) - (C - D))). \quad (3)$$

Полученные результаты приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Расчет по методике направленной динамики (обратной)

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	428750	29,42	147944	10,15	97000	6,66
<b>Отклонение</b>	45,31 %	13,33 %	91,29 %	9,27 %	8,25 %	0,55 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	91683	6,29	84094	5,77	175458	12,04
<b>Отклонение</b>	23,25%	1,46 %	7,02 %	0,41 %	53,88 %	6,49 %
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
<b>Факт 2023</b>	74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
<b>Расчет</b>	87301	5,99	82256	5,64	-406	-0,03
<b>Отклонение</b>	15,24 %	0,91 %	27,65 %	1,56 %	3299,86 %	0,86 %
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.	Английский язык, %		
<b>Факт 2023</b>	44000	3,02	80000	5,49		
<b>Расчет</b>	29906	2,05	80553	5,53		
<b>Отклонение</b>	47,13 %	0,97 %	0,69 %	0,04 %		

В рамках следующей (седьмой) методики величина E выражается по формуле (4), представляющей собой прямые (от более позднего года к более раннему) соотношения значений процентов выпускников школ, выбиравших экзамены по тем или иным предметам в период с 2019 по 2022 г.:

$$E = D * ((\frac{D}{C}) / (\frac{C}{B})) / ((\frac{C}{B}) / (\frac{B}{A})). \quad (4)$$

Полученные результаты приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет по методике соотношений (прямых)

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	466161	31,99	194493	13,35	93071	6,39
<b>Отклонение</b>	33,64 %	10,76 %	45,51 %	6,07 %	4,37 %	0,28 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	90912	6,24	84115	5,77	196416	13,48
<b>Отклонение</b>	24,30 %	1,52 %	7,00 %	0,40 %	37,46 %	5,05 %
	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
<b>Факт 2023</b>	74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
<b>Расчет</b>	83997	5,76	87112	5,98	5179	0,36
<b>Отклонение</b>	11,90 %	0,69 %	20,53 %	1,23 %	150,99 %	0,54 %
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.	Английский язык, %		
<b>Факт 2023</b>	44000	3,02	80000	5,49		
<b>Расчет</b>	32693	2,24	80695	5,54		
<b>Отклонение</b>	34,59 %	0,78 %	0,86 %	0,05 %		

В рамках восьмой методики величина E выражается по формуле (5), представляющей собой обратные (от более раннего года к более позднему) соотношения значений процентов выпускников школ, выбиравших экзамены по тем или иным предметам в период с 2019 по 2022 г.:

$$E = D * ((\frac{A}{B}) / (\frac{B}{C})) / ((\frac{B}{C}) / (\frac{C}{D})). \quad (5)$$

Полученные результаты приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет по методике соотношений (обратных)

	Русский язык, чел.	Русский язык, %	Математика, чел.	Математика, %	Физика, чел.	Физика, %
<b>Факт 2023</b>	623000	42,75	283000	19,42	89000	6,11
<b>Расчет</b>	844890	57,97	441203	30,27	101091	6,94
<b>Отклонение</b>	26,26 %	15,23 %	35,86 %	10,86 %	11,96 %	0,83 %
	ИКТ, чел.	ИКТ, %	История, чел.	История, %	Обществознание, чел.	Обществознание, %
<b>Факт 2023</b>	113000	7,75	90000	6,18	270000	18,53
<b>Расчет</b>	106965	7,34	90602	6,22	341486	23,43
<b>Отклонение</b>	5,64 %	0,41 %	0,66 %	0,04 %	20,93 %	4,91 %

Продолжение таблицы 12

	Химия, чел.	Химия, %	Биология, чел.	Биология, %	География, чел.	География, %
Факт 2023	74000	5,08	105000	7,20	13000	0,89
Расчет	101091	6,94	128323	8,81	30700	2,11
Отклонение	26,80 %	1,86 %	18,18 %	1,60 %	57,65 %	1,21 %
	Литература, чел.	Литература, %	Английский язык, чел.	Английский язык, %		
Факт 2023	44000	3,02	80000	5,49		
Расчет	51982	3,57	88251	6,06		
Отклонение	15,36 %	0,55 %	9,35 %	0,57 %		

Дополнительно были проведены расчеты с использованием еще трех методик: функций дисперсии, корреляции и коэффициенту вариации. Однако ни одна из трех данных методик не дала приемлемого (в рамках отклонения не более 10 % от фактических значений) результата ни по одному предмету. Исходя из этого, расчетные данные не приводятся.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведя анализ значений, полученных с использованием различных методик (табл. 4–6, 8–12), была определена методика, дающая наиболее приближенные к реальным данным значения количества сдававших ЕГЭ. Для выстраивания рейтинга методик была введена балльная шкала: в рамках каждого предмета определялись три методики, дающие наименьшее отклонение в количестве сдающих предмет (выраженном в процентах), и методика с наименьшим отклонением получала 3 балла, с вторым значением отклонения – 2 балла, с третьим значением отклонения – 1 балл. Если число методик, дающих заданную точность (отклонение не более 10 %), было меньше трех, то меньшие баллы не выставлялись. Результаты балльной шкалы (рейтинга методик) представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Рейтинг методик

Наименование методики	Балл
Среднее значение	3
Медиана	9
Определение дельт	6
Определение дельт без усреднения	3
Направленная динамика (прямая)	7
Направленная динамика (обратная)	4
Соотношения (прямые)	6
Соотношения (обратные)	5

Таким образом, наиболее приемлемой методикой прогнозирования можно считать методику расчета медианы. Она дает лучшие результаты по русскому языку, географии и литературе. Кроме того, дает приемлемые результаты (с погрешностью менее 10 %) по английскому языку.

Дополнительно по данным табл. 4–6, 8–12 были определены предметы, которые лучше всего и хуже всего поддаются прогнозированию по предложенным методикам. Лучше всего поддаются прогнозированию история и английский язык: по данным предметам можно получить прогноз с точностью более 99 % (отклонение в числе сдающих экзамен 0,56 % и 0,69 % соответственно). Хуже всего поддаются прогнозированию математика (профильный уровень), обществознание и биология. По данным предметам ни одна из предложенных методик не дала требуемого значения отклонения менее 10 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты планируется использовать в ходе разработки алгоритма обработки данных и универсальной модели по динамическим параметрам (в частности рождаемость и количество сдающих ЕГЭ) в разрабатываемой информационной системе прогнозирования востребованности направлений подготовки образовательных организаций высшего образования среди абитуриентов.

**Список источников**

1. Гайнанов, Д. А. Иррациональность поведения абитуриентов как фактор дисбаланса рынков труда и образовательных услуг региона / Д. А. Гайнанов, А. Г. Атаева, Л. И. Мигранова, А. Р. Атнабаева // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 194–208. – DOI: 10.15838/esc.2022.1.79.10.
2. Ключенко, С. Б. Структура доходов ВУЗа: анализ и проблемы управления / С. Б. Ключенко, О. В. Комарова // *Universum: Экономика и юриспруденция*. – 2016. – № 6 (27).
3. Адамкулова, Ч. У. Развитие методов стратегического управления финансовой подсистемой вузов в условиях модернизации высшего образования и перехода к самофинансированию (на примере Кыргызского национального университета им. Ж. Баласагына) / Ч. У. Адамкулова // *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. – 2017. – № 39. – С. 138–145.
4. Зафиров, Е. А. Разработка модели информационной системы прогнозирования востребованности направлений подготовки в образовательных организациях высшего образования среди абитуриентов / Е. А. Зафиров // *Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление»*. – 2023. – Вып. 4. – С. 33–44. – DOI: 10.18137/RNU.V9187.23.04.
5. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 15.06.2024).
6. Юдина, Т. А. Прогнозирование численности потенциальных абитуриентов российских университетов в сложившихся в стране демографических условиях с целью актуализации проблем репутационного менеджмента / Т. А. Юдина // *Вестник Евразийской науки*. – 2019. – Т. 11, № 5.
7. Агарков, Г. А. Анализ экономических мотиваций при выборе индивидами образовательных траекторий / Г. А. Агарков, В. А. Кокшаров // *Экономика региона. Отраслевые и межотраслевые комплексы*. – 2015. – № 1. – С. 245–252. – DOI: 10.17059/2015-1-21
8. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – URL: <https://urfu.ru/> (дата обращения: 16.05.2024).
9. VUZOPEDIA (ВУЗОПЕДИЯ): информационное издание России. – URL: <https://vuzopedia.ru/news/5011> (дата обращения: 15.06.2024).
10. Министерство просвещения Российской Федерации. – URL: <https://edu.gov.ru/> (дата обращения: 09.06.2024).

**References**

1. Gainanov, D. A., Ataeva, A. G., Migranova, L. I., Atnabaeva, A. R. Irrationality in the behavior of applicants as a factor in the imbalance of labor markets and educational services in the region. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 194–208. DOI: 10.15838/esc.2022.1.79.10.
2. Klyuschenko, S. B., Komarova, O. V. Structure of higher educational institution income: analysis and management problems. *Economics and Law*, 2016, no. 6 (27).
3. Adamkulova, C. U. Development of the universities financial subsystem strategic management methods under higher education modernization conditions and transition of universities to the self-financing system (on the example of Kyrgyz National University named after J. Balasagin). *Tomsk State University Journal of Economics*, 2017, no. 39, pp. 138–145.
4. Zafirov, E. A. Development of a model of information system for forecasting the demand for educational programs at universities among applicants. *Bulletin of the Russian New University: Complex systems: Models, Analysis, Management*, 2023, iss. 4, pp. 33–44. DOI: 10.18137/RNU.V9187.23.04.
5. Federal State Statistics Service. Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 15.06.2024).
6. Yudina, T. A. Forecasting the number of potential applicants to Russian universities in the current demographic conditions in the country in order to actualize the problems of reputation management. *Bulletin of Eurasian Science*, 2019, vol. 11, no. 5.
7. Agarkov, G. A., Koksharov, V. A. Analysis of economic motivations in the choice of educational trajectories by individuals. *Economy of the Region. Industry and Inter-industry Complexes*, 2015, no. 1, pp. 245–252. DOI: 10.17059/2015-1-21.
8. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin”. Available at: <https://urfu.ru/> (accessed 16.05.2024).
9. VUZOPEDIA: information publication of Russia: website. Available at: <https://vuzopedia.ru/> (accessed 15.06.2024).
10. Ministry of Education of the Russian Federation. Available at: <https://edu.gov.ru/> (accessed 09.06.2024).

Статья поступила в редакцию 31.01.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 26.03.2025.

The article was submitted 31.01.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 26.03.2025.

УДК 004.82

## КОНЦЕПЦИЯ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОНТОЛОГИЙ

**Шульга Татьяна Эриковна**, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, доктор физико-математических наук, профессор, ORCID 0000-0002-5521-5960, e-mail: taiss@yandex.ru

**Сытник Александр Александрович**, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0002-1256-7253, e-mail: as@sstu.ru

**Карташова Марина Владимировна**, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, магистрант, ORCID 0009-0003-5860-0930, e-mail: kartashm19@yandex.ru

Показана актуальность проблемы повторного использования онтологий. Проанализированы существующие инструменты для создания, подбора и отображения онтологий. Отмечено, что эти инструменты ограничены в поддержке полного цикла повторного использования онтологий. Описаны основные этапы процесса повторного использования: определение потребностей и целей, анализ онтологий, сопоставление элементов, адаптация элементов. Представлена архитектура рекомендательной системы, включающая несколько ключевых компонентов: интерфейс для взаимодействия с пользователем, модули профиля пользователя, анализа онтологий, отображения онтологий, модуль рекомендаций и обратной связи. Описаны назначение и принципы работы каждого модуля. Приведено описание сеанса взаимодействия пользователя с предлагаемой системой. Показано, что предложенная система может существенно упростить и оптимизировать процессы, связанные с разработкой новых онтологий, а также с интеграцией и адаптацией существующих структур.

**Ключевые слова:** онтологии, разработка онтологий, проблема повторного использования онтологий, отображение онтологий, рекомендательная система

## RECOMMENDER SYSTEM CONCEPT FOR ONTOLOGY REUSE

**Shulga Tatiana E.**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politehnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, ORCID 0000-0002-5521-5960, e-mail: taiss@yandex.ru

**Sytnik Alexander A.**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politehnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

Doct. Sci. (Technical Science), Professor, ORCID 0000-0002-1256-7253, e-mail: as@sstu.ru

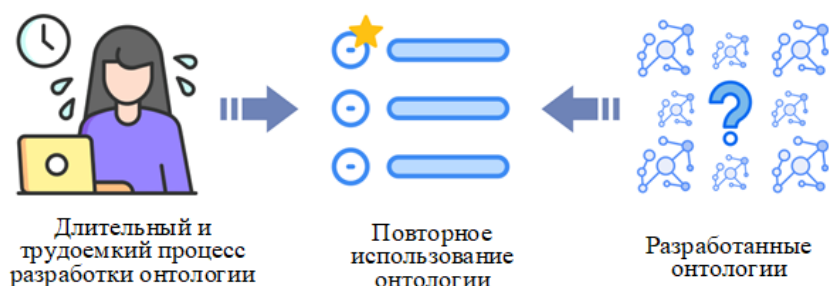
**Kartashova Marina V.**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politehnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

master's student, ORCID 0009-0003-5860-0930, e-mail: kartashm19@yandex.ru

The relevance of the problem of reusing ontologies problem is demonstrated. Existing tools for ontology creation, selection, and matching are analyzed, and it is noted that these tools are limited in supporting the full cycle of ontology reuse. The main stages of the reuse process are described: defining needs and goals, analyzing ontologies, matching elements, and adapting elements. The architecture of a recommendation system is presented, consisting of several key components: a user interface, a user profile module, an ontology analysis module, an ontology mapping module, a recommendation module, and a feedback module. The purpose and working principles of each module are explained. A user interaction session with the proposed system is described. It is shown that the proposed system can significantly simplify and optimize processes related to the development of new ontologies, as well as the integration and adaptation of existing structures.

**Keywords:** ontologies, development of ontologies, problem of reuse of ontologies, mapping of ontologies, recommender system

### Графическая аннотация (Graphical annotation)



## **ВВЕДЕНИЕ**

В современном мире онтологии как формальные модели знаний приобретают все более значимую роль в различных областях: бизнесе [1], науках [2], разработке программного обеспечения [3] и многих других. Онтологии, описывая сущности предметной области и их взаимосвязи, создают основу для обмена знаниями между информационными системами, используемыми в этой области, и участниками процесса, а также позволяют автоматизировать процессы поиска и анализа информации, что важно в условиях постоянного роста объемов данных и усложнения их структуры [4].

Разработка новой онтологии требует глубокого понимания предметной области, а также сложных вычислительных и логических методов для ее реализации. Рост количества разработанных онтологий в различных предметных областях показывает, что их повторное использование может значительно сократить затраты на разработку новых, позволяя исследователям и разработчикам сосредоточиться на решении более специфических задач, связанных с обработкой и анализом данных [5]. Это особенно важно в условиях, когда время и ресурсы ограничены, а необходимость быстрого получения точных и качественных данных возрастает.

В настоящей работе приводится краткий обзор существующих решений в области повторного использования онтологий, а также предлагается архитектура рекомендательной системы, которая может существенно упростить процессы, связанные с разработкой новых онтологий, а также с интеграцией и адаптацией существующих структур.

## **ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Существует множество средств для разработки онтологий, однако большинство из них не предоставляет полноценные механизмы, которые позволят рекомендовать имеющиеся онтологии или их отдельные компоненты для повторного использования. Основная проблема заключается в том, что такие средства не обеспечивают комплексную поддержку процесса создания онтологий на основе уже имеющихся моделей. Согласно данным исследований [5, 6], отсутствуют инструменты, способные полностью автоматизировать процесс разработки новых онтологий повторным использованием существующих компонентов. Доступные на рынке инструменты могут справляться только с отдельными аспектами этого процесса, например, помогать в выборе подходящих онтологий на основе ключевых слов или производить частичное сопоставление сущностей между различными онтологиями. Однако их возможности ограничены, и они не могут предложить полную поддержку итеративного процесса разработки и адаптации онтологий в различных предметных областях, что оставляет значительное пространство для совершенствования и разработки новых, более универсальных систем.

Инструменты для создания онтологий, такие как Protégé [7], широко используются при разработке новых онтологий, предоставляя пользователям широкие возможности для добавления новых понятий, атрибутов и связей между сущностями. При этом Protégé поддерживает различные форматы данных, такие как OWL (Web Ontology Language), и предоставляет интуитивный интерфейс для визуального редактирования онтологий. С его использованием можно легко моделировать сложные предметные области, определяя классы, их иерархические отношения, свойства и ограничения. Этот инструмент стал де-факто стандартом для разработки онтологий как в академических кругах, так и в промышленности из-за гибкости и широких возможностей. Однако, несмотря на преимущества Protégé, использующие его эксперты сталкиваются с определенными ограничениями, когда необходимо создание онтологий объединением существующих моделей. Основное назначение этой платформы – это создание новых онтологий, однако для задач, которые требуют слияния нескольких онтологий или повторного использования компонентов из другой онтологии, Protégé не предоставляет автоматизированного функционала.

Инструмент ViOSS [8] и портал NCBO Ontology Recommender [9] обеспечивают пользователям возможность подбора онтологии на основе ключевых слов, что является полезным в проектах, где требуется найти готовые онтологии. Процесс поиска этими инструментами проходит аналогично: система анализирует ключевые слова и сопоставляет с данными онтологий, которые хранятся в репозитории, затем наиболее релевантные модели выводятся пользователю. Функциональные возможности подобных платформ ограничиваются лишь поиском онтологий. Они не поддерживают итеративного процесса разработки, поэтому после определения подходящей онтологии, если пользователю требуется заменить компонент или часть структуры, то он может осуществить это только ручной корректировкой в другой системе. Также одним из не менее важных недостатков является то, что эти системы содержат исключительно биомедицинские онтологии, поэтому для задач из других предметных областей они неприменимы.

Приложения LYAM++ [10] и OntoSRV [11] осуществляют ключевой этап интеграции данных в процессе повторного использования – отображение онтологий. Процесс отображения – это сопоставление близких компонентов (классов, свойств, экземпляров) из, как правило, двух онтологий. Процесс может осуществляться различными методами и алгоритмами: лексическими, структурными, семантическими. Автоматическое отображение онтологий наиболее актуально при работе

с большим объемом данных или при работе с моделями со сложной структурой, так ручное экспертное сопоставление учитывает только синонимичность или эквивалентность меток и URI, которые не всегда являются показательными, что также занимает большое количество времени.

Однако, несмотря на успешные результаты в нахождении соответствий, взаимодействие пользователей с результатами сопоставления остаётся ограниченным. Эти инструменты предоставляют отчёты обычно в табличной форме, где перечислены сопоставленные сущности из различных онтологий. Пользователям, как правило, необходимо вручную адаптировать структуры онтологий на основе этих отчётов. Это может включать коррекцию ошибок в сопоставлениях, уточнение семантических связей или устранение дублирующихся понятий. В результате, хотя LYAM++ и OntoSRV могут значительно ускорить процесс первичного отображения, они не полностью автоматизируют последующую работу по интеграции онтологий. Это ограничивает потенциал полной автоматизации и требует активного участия человека в процессе адаптации и слияния онтологий для достижения окончательного результата.

### **ЭТАПЫ ПРОЦЕССА ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

В контексте повторного использования онтологий критически важным аспектом становится разработка комплексных автоматизированных систем, способных эффективно решать задачи интеграции, адаптации и оптимизации онтологий для различных прикладных целей. Эти системы должны обладать набором функций, обеспечивающих автоматический анализ и сопоставление существующих онтологий, а также их адаптацию под специфические задачи пользователя с учетом особенностей предметной области и требуемой семантики. Основные задачи, которые должны решать такие системы, можно разбить на несколько этапов, каждый из которых играет важную роль в процессе повторного использования онтологий [12].

Первым этапом процесса является определение потребностей и целей для использования онтологий, который включает несколько ключевых аспектов. На этом этапе система анализирует запросы пользователя, используя такие параметры, как ключевые слова, относящиеся к предметной области, и контекст, в котором онтология будет применяться. Важно не только распознать ключевые термины, а также понимать общий домен запроса независимо от предметной области: биомедицина, информационные технологии, сельское хозяйство или др. Кроме этого, система должна учитывать тип требуемой онтологии. Пользователи могут запрашивать либо простую таксономию, которая представляет собой иерархию понятий с отношениями «is-a» (например, род-вид), либо полную семантическую модель, которая описывает более сложные взаимосвязи и ограничения в предметной области, используя язык OWL и другие концептуальные конструкции. Это помогает системе сужать область поиска и подбирать наиболее подходящие онтологии для конкретных целей пользователя.

Следующим этапом является анализ существующих онтологий. Этот процесс включает детальное изучение имеющихся моделей, их структуры, содержания, семантики и контекста применения. Необходимо, чтобы система работала с сущностями, например классами и их свойствами, а также анализировала внутреннюю структуру онтологий, включая связи между понятиями, их семантические ограничения и зависимости. Только такой подход к анализу онтологий сможет представить пользователям наиболее полные данные для решения их задач.

Третьим этапом является сопоставление сущностей онтологий, т. е. отображение. Этот этап должен включать нахождение семантической близости концептов, а также учитывать структуры онтологий, их наполненность и типы отношений, которые они включают. Для обеспечения этих критериев могут использоваться комплексы семантических, структурных и лексических методов, которые в итоге должны предоставить многоуровневый подход к процессу отображения. Это является ключевым в процессе повторного использования, поэтому важно, чтобы система обеспечивала высокие показатели полноты и точности отображения. Также важно отметить, что проблема гетерогенности (понятие имеет разные значения в различных контекстах) остается нерешенной. Хотя большинство сервисов отображения имеют высокие показатели полноты и точности, важно учитывать экспертную оценку пользователя, чтобы полностью удовлетворить его потребности.

После отображения онтологий необходимо адаптировать их компоненты для совместимости в одной среде. Это может включать преобразование структур, переименование компонентов, создание или удаления связей – всё, что обеспечит согласованность сущностей. Для этого система должна предоставлять гибкий функционал, который сможет автоматически адаптировать компоненты онтологий, а также позволять пользователю управлять этим процессом.

Во многих этапах фигурирует участие пользователя, несмотря на то, что система должна автоматизировать процесс повторного использования. Хотя многие алгоритмы, которые используются в процессе анализа, отображения, адаптации и достигли высоких показателей полноты и точности, однако они не всегда способны учитывать нюансы предметной области или сложные семантические зависимости. Поэтому роль человека остается важной для обеспечения точности и корректности

данных. Цель системы – «взять на себя» выполнение трудоемких и сложных вычислительных процессов, предоставить пользователю возможность работать с результатами и учитывать его экспертную оценку. Для этого такая система должна включать компонент обратной связи, который позволит собирать и анализировать оценки пользователя, чтобы на основе собранной информации корректировать процессы анализа, сопоставления и адаптации в будущем. Такой итеративный подход сможет полностью обеспечить релевантность данных, а также поможет системе адаптироваться под изменяющиеся условия, чтобы удовлетворить постоянно возрастающие потребности пользователя.

### АРХИТЕКТУРА РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

С учетом этапов, описанных выше, разработана архитектура рекомендательной системы для повторного использования онтологий (рис.).

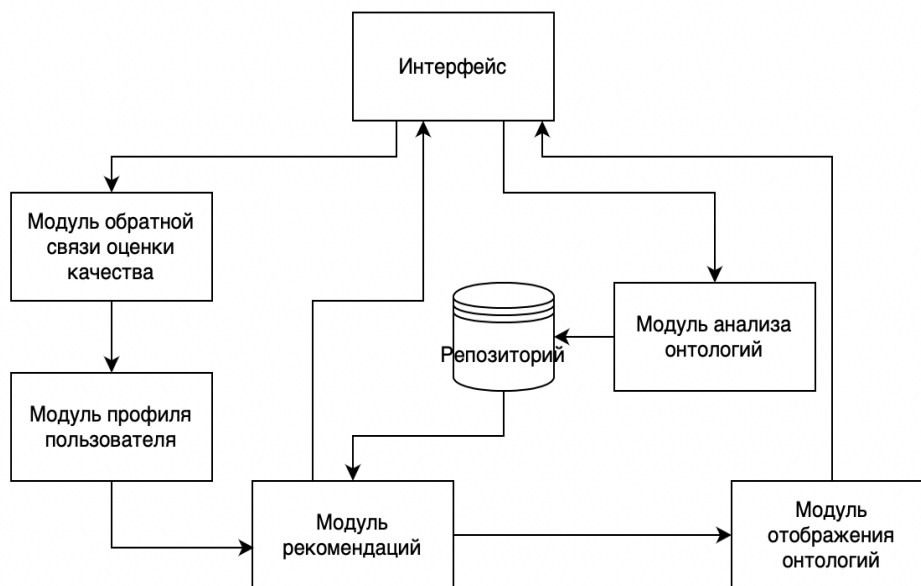


Рисунок – Архитектура рекомендательной системы

Архитектура включает взаимосвязанные модули, каждый из которых отвечает за конкретный этап в общем процессе: от анализа запроса пользователя до финальной адаптации выбранных компонентов. Модульная архитектура представляется лучшим решением, так как следует ориентироваться на появление более современных методов и технологий, которые могут помочь улучшить работу системы. Именно наличие модулей позволит реализовать эти методы и технологии в рамках системы с минимальными затратами на ее модернизацию.

Интерфейс является важной составляющей взаимодействия пользователя с системой. Интерфейс в первую очередь должен быть интуитивно понятным, так как следует ориентироваться на специалистов, которые знакомы с аспектами онтологического инжиниринга, а также на пользователей, не обладающих глубокими знаниями в области онтологий. Интерфейс должен позволять загружать онтологии, формулировать запросы на основе ключевых слов, состоять списки рекомендованных онтологий, а также обеспечивать обратную связь на результат рекомендаций. Также интерфейс должен включать возможность визуализации структуры онтологий, так как большинство онтологий предполагают большое количество концептов и их запись на языке OWL либо в другой нотации не является удобочитаемой. Важно предоставить пользователю графическую интерпретацию для лучшего понимания связей между концептами [13].

Модуль профиля пользователя должен собирать и анализировать информацию о запросах пользователя, его предыдущих взаимодействиях с онтологиями, а также в контексте, в котором он использует систему. История взаимодействия, домены и предметные области должны анализироваться для того, чтобы предоставлять более релевантные рекомендации. Также важно учитывать явные аспекты использования системы, а также неявные паттерны поведения. Например, если пользователь отдает предпочтения таксономиям в текущем сеансе, то модели с более сложной структурой следует опускать ниже в списке рекомендаций.

Модуль анализа онтологий служит для предварительной обработки онтологий, которые хранятся в репозитории. Анализ и хранение ключевых характеристик, таких как структура классов, их иерархические связи, свойства и отношения между понятиями, увеличит скорость подбора онтологий для последующего отображения.

Модуль отображения онтологий имеет важную роль во всем процессе: именно на основе результата отображения принимается решение о том, попадет ли онтология в список рекомендаций. Его основной задачей является поиск подходящих онтологий на основе ключевых характеристик, выделенных модулем анализа, и проведения отображения найденных онтологий с целевой. Процесс отображения включает как поверхностное лексическое сопоставление (эквивалентность меток и URI), так и глубокий семантический анализ, позволяя модулю учитывать контекст использования.

За основу модулей анализа и отображения онтологий решено выбрать компоненты веб-сервиса «OntoSRV». Этот веб-сервис демонстрирует высокие показатели полноты и точности отображения, составляющие 0,854 и 0,902 соответственно [14]. Процесс отображения в OntoSRV базируется на критериях подобия и их коэффициентах достоверности, представленных в таблице. Метод вычисления коэффициента подобия онтологических сущностей в сервисе подробно описан в [15].

Таблица – Критерии подобия онтологических сущностей

Метка	Критерий подобия	Коэффициент достоверности
L1	Метки	0,7
L2	URI	0,7
L3	Свойства	0,029
L4	Домен и диапазон	0,018
L5	Родительские сущности	0,029
L6	Дочерние сущности	0,029
L7	Сущности того же уровня	0,018
L8	Дочерние свойства	0,018
L9	Родительские свойства	0,018
L10	Экземпляры	0,029
L11	Классы экземпляров	0,029
L12	Выборка экземпляров	0,029
L13	Свойства экземпляров	0,018
L14	Связанные экземпляры	0,018
L15	SameAs	1
L16	Ограничение существования	0,018
L17	Ограничение на типы данных	0,029
L18	Ограничение минимальной кардинальности	0,029
L19	Ограничение уточненной кардинальности	0,029
L20	Ограничение максимальной кардинальности	0,029
L21	Ограничение на значения	0,018

Главным преимуществом сервиса является то, что итоговый показатель сравнения двух концептов основывается на прямом литеральном сравнении меток и URI, а также на подобию их связей и ограничений. В системе используется модель Word2Vec [16], словарь синонимов русского языка ASIS.

После проведения отображения найденных онтологий с целевой модуль рекомендаций должен сформировать список рекомендаций с учетом суммированного балла отображения (от онтологий с наиболее высокими баллами к низким). Этот список станет основой для последующих действий пользователя: оценить релевантность списка рекомендаций, просмотреть структуру онтологии и выбрать подходящие концепты для его задач. Также модуль должен учитывать информацию о взаимодействиях, которые будет передавать ему модуль профиля пользователя, чтобы сформировать список рекомендаций с учетом новых данных.

Модуль обратной связи и оценки качества должен выполнять функцию сбора информации о взаимодействиях пользователя с онтологиями из списка, а также о том, насколько точными и полезными оказались предложенные системой рекомендации. Все собранные данные будут передаваться в модуль профиля пользователя для последующего анализа и генерации списка рекомендаций. Например, если пользователь не удовлетворен предложенной онтологией, система должна учесть эту оценку и скорректировать алгоритмы генерации рекомендаций таким образом, чтобы опустить эту онтологию вниз в списке, выдвинув на первые места другие онтологии.

Работа системы предполагает наличие в репозитории онтологий, чтобы сформировать их в список рекомендаций, и возникает логичный вопрос о том, как наполнить репозиторий достаточным количеством онтологий из разных предметных областей. Одним из вариантов решения этой проблемы является интеграция с другими открытыми онтологическими репозиториями. Существует несколько платформ, которые собрали большие объемы онтологий и предоставляют доступ к ним через API.

Примеры таких ресурсов включают: BioPortal (специализируется на биомедицинских онтологиях), AgroPortal (ориентирован на агрономию и сельское хозяйство), Linked Open Vocabularies

(предоставляет каталог вокабуляров, охватывающих широкий спектр тем и областей знаний), The OVO Foundry (набор онтологий для семантического веба и биомедицинских исследований).

Таким образом, подход, включающий интеграцию с открытыми репозиториями, а также активное взаимодействие с пользователями, поможет обеспечить наполненность репозитория системы онтологиями, удовлетворяющими разнообразные потребности пользователей.

### **ТИПОВОЙ СЕАНС РАБОТЫ С РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ**

Для демонстрации возможностей рекомендательной системы с предложенной архитектурой опишем типовой сеанс работы с системой. Система работает в несколько этапов, последовательно обеспечивая пользователя возможностью повторного использования онтологий и их компонентов в зависимости от его предпочтений и задач. Этот процесс ориентирован на максимальную персонализацию и адаптацию системы к специфическим потребностям каждого пользователя. Типовой сеанс взаимодействия пользователя с системой организован следующим образом:

#### **1. Начало сеанса.**

Сеанс начнется с момента, когда пользователь загрузит целевую онтологию из собственной коллекции или выберет подходящую онтологию из репозитория, доступного в системе. Эта онтология является отправной точкой для дальнейшего анализа и сопоставления. Пользователь может выбирать онтологию, исходя из своих потребностей: конкретная предметная область, определенная задача или исследовательский проект.

#### **2. Сбор и формирование профиля пользователя.**

После выбора онтологии модуль профиля пользователя начнет собирать необходимую информацию для точного описания его предпочтений и целей. Этот модуль формирует профиль пользователя на основе двух типов данных: явных и неявных. Явная информация запрашивается у пользователя непосредственно, например, через формы ввода, где он укажет предпочтения относительно онтологий, их доменов и характеристик. Пользователь может указать, какие домены его интересуют, например, медицина, агрономия, экология, предпочитает он использовать онтологии, широко применяемые в сообществе, или требуются специализированные онтологии с узким охватом. Также учитываются типы онтологий, которые предпочитает пользователь: иерархическая таксономия, фокусирующаяся на отношениях типа «is-a» либо полная семантическая модель, использующая более сложные конструкции языка OWL, такие как ограничения и логические правила.

Неявная информация собирается системой автоматического отслеживания действий и взаимодействий пользователя с системой. Например, какие онтологии пользователь чаще просматривает, с какими концепциями работает длительное время, какие рекомендации отклоняет или принимает. Это позволит системе лучше адаптироваться к потребностям пользователя без необходимости явного ввода данных, обеспечивая более точную и персонализированную работу в дальнейшем.

#### **3. Генерация рекомендаций.**

Основываясь на информации, собранной модулем профиля пользователя и на онтологиях, доступных в репозитории, начнется процесс формирования списка рекомендаций. Процесс начинается с поиска подходящих онтологий по характеристикам, которые заранее выделены модулем анализа онтологий и хранятся в репозитории, затем осуществляется отображение найденных онтологий с целевой онтологией. Далее онтологии ранжируются на основе результатов отображения и данных о взаимодействиях пользователя с системой. Результатом работы является список рекомендаций, включающий онтологии и классы, которые семантически соответствуют понятию или понятием, выбранным пользователем. Например, если пользователь работает с биомедицинской онтологией, которая включает класс «болезнь», система может предложить другие онтологии, где этот класс имеет более специфичные подклассы или дополнительные характеристики, которые могут быть полезны для его работы.

#### **4. Обратная связь и оценка.**

После того как рекомендации сформированы, пользователь начинает работать с онтологиями: просматривать их структуру, отмечать онтологии, которые он считает наиболее подходящими, или отказаться от вывода онтологии, если она не удовлетворяет его потребности. Система должна записывать все эти взаимодействия для анализа и учета их в последующих генерациях рекомендаций. Например, если пользователь отклоняет определенные онтологии несколько раз, то система должна зафиксировать, что подобные онтологии не соответствуют его интересам, убрать их из списка рекомендаций и подбирать другие варианты.

#### **5. Адаптация и итеративный процесс.**

После выбора рекомендации система предлагает пользователю следующие шаги для расширения или уточнения целевой онтологии. Весь процесс является итеративным: пользователь выбирает новую сущность, а система генерирует новые рекомендации, основываясь на обновленной онтологии и взаимодействиях. Цикл повторяется до тех пор, пока пользователь не будет удовлетворен полученной онтологией и не завершит сеанс.

Таким образом, система обеспечивает адаптивность на каждом этапе работы пользователя, позволяет учитывать его взаимодействия и предпочтения для создания релевантных рекомендаций, чтобы он получил онтологию повторным использованием, которая удовлетворит его потребности в рамках конкретной задачи.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повторное использование онтологий является важным аспектом онтологического инжиниринга, так как позволяет значительно сократить время и ресурсы по сравнению с разработкой моделей знаний «с нуля». Рекомендательная система для повторного использования онтологий с предложенной в работе архитектурой обладает потенциалом для того, чтобы упростить процесс повторного использования для опытных инженеров по знаниям, а также предоставить возможности разработки для пользователей, которые имеют ограниченные знания в области онтологического инжиниринга. Комплексный подход, используемый в системе, позволит исследователям сосредоточить свои усилия на ключевых аспектах их работы, таких как анализ и интерпретация данных, а не на технических деталях создания новых структур и поиска подходящих компонентов. Авторами осуществляется разработка предложенной системы. Как показала практика, при реализации каждого из модулей системы возникает ряд как методологических, так и технических вопросов, каждый из которых возможно решить разными методами. Выбор этих методов может зависеть как от целей конкретной разработки, так и опыта разработчиков. Авторы открыты для сотрудничества и выражают надежду, что предложенная в работе архитектура может быть использована для создания целого класса рекомендательных систем, реализующих разные методы для каждого из этапов разработки онтологий. Это, в свою очередь, поможет получить данные об эффективности каждого из методов и продолжить совершенствование инструментов онтологического моделирования знаний.

### Список источников

1. Аль-Мерри, Г. М. С. Управление бизнес-процессами в туристической индустрии на основе методов семантической паутины и онтологического моделирования / Г. М. С. Аль-Мерри, А. Г. Кравец, Н. А. Сальникова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 1 (45). – С. 73–84. – DOI: 10.21672/2074-1707.2019.45.1.073-084. – EDN PVBVGD.
2. Чусова, А. Е. Онтология методов моделирования в области архитектурной акустики / А. Е. Чусова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 1 (61). – С. 140–149. – EDN EMSDAI.
3. Шульга, Т. Э. Онтология жизненного цикла разработки программного обеспечения / Т. Э. Шульга, Д. Э. Храмов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 2. – С. 66–74.
4. Поцелуйко, А. С. Персонализация интерфейсов мобильных приложений на основе паттернов интерфейсов для людей с ограниченными возможностями / А. С. Поцелуйко, А. Г. Кравец, М. Б. Кульцова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 3 (47). – С. 17–27. – DOI: 10.21672/2074-1707.2019.47.3.017-027. – EDN ESQCLH.
5. Ojino, R. Selecting Ontologies for Reuse: Case of Constructing Hotel Room Ontology / R. Ojino, B. Villazón-Terrazas, F. Ortiz-Rodríguez, S. Tiwari, A. Goyal, M. Jabbar // Knowledge Graphs and Semantic Web. KGSWC 2021. Communications in Computer and Information Science. – 2021. – № 1459. – С. 169–181. – DOI: 10.1007/978-3-030-91305-2\_13.
6. Zulkarnain, N. Z. Methodology for Biomedical Ontology Reuse / N. Z. Zulkarnain, F. Meziane, G. A. Crofts // International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems. – 2016. – № 9612. – С. 3–14. – DOI: 10.1007/978-3-319-41754-7\_1.
7. Protégé. – URL: <https://protege.stanford.edu/> (дата обращения: 01.10.2024).
8. Martínez-Romero, M. BiOSS: A System for Biomedical Ontology Selection / M. Martínez-Romero, J. M. Vázquez-Naya, J. Pereira // Comput. Methods Programs Biomed. – 2014. – № 114. – P. 125–140. – DOI: 10.1016/j.cmpb.2014.01.020.
9. Martínez-Romero, M. NCBO Ontology Recommender 2.0: An Enhanced Approach for Biomedical Ontology Recommendation / M. Martínez-Romero, C. Jonquet, M. J. O'Connor, J. Graybeal, A. Pazos // J. Biomed. Semant. – 2017. – № 8. – P. 21. – DOI: 10.1186/s13326-017-0128-y.
10. Tigrine, A. N. Light-Weight Cross-Lingual Ontology Matching with LYAM++ / A. N. Tigrine, Z. Bellahsene, K. Todorov // On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2015 Conferences. OTM 2015. Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – № 9415. – P. 527–544. – DOI: 10.1007/978-3-319-26148-5\_36.
11. Шульга, Т. Э. Веб-приложение для сравнения rdf-данных "ONTOSRV". Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023681111, 10.10.2023. Заявка от 26.09.2023 / Т. Э. Шульга, М. В. Карташова.
12. Halper, M. Guidelines for the reuse of ontology content / M. Halper, L. N. Soldatova, M. Brochhausen [et al.] // Applied Ontology. – 2023. – Vol. 18, № 1. – P. 5–29. – DOI: 10.3233/ao-230275. – EDN LZKNWB.
13. Parkhomenko, D. A. Data visualization makes sense of Big data / D. A. Parkhomenko // Big Data and Advanced Analytics. – 2021. – № 7–1. – P. 416–417. – EDN CJBVYJ.
14. Шульга, Т. Э. Использование аксиом классов с ограничениями на свойства в процессе отображения онтологий / Т. Э. Шульга, М. В. Карташова // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: материалы XIX Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2023. – С. 122–124.
15. Сытник, А. А., Шульга, Т. Э. О проблеме увеличения полноты и точности отображения русскоязычных онтологий // Информатизация образования и науки. – 2023. – № 1 (57). – С. 106–116.

16. Sukri, S. Word2vec-based Latent Semantic Indexing (Word2Vec-LSI) for Contextual Analysis in Job-Matching Application / S. Sukri, N. A. Samsudin, E. Fadzrin [et al.] // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2024. – Vol. 15, № 3. – DOI: 10.14569/ijacsa.2024.0150371. – EDN FVXMLP.

#### References

1. Al-Merry, G. M. S, Kravets, A. G., Salnikova, N. A Semantic web model for business process management in the tourism industry. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2019, no. 1 (45), pp. 73–84. DOI: 10.21672/2074-1707.2019.45.1.073-084 (In Russ.).
2. Chusova, A. E. Ontology of modeling methods in the field of architectural acoustics. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2023, no. 1 (61), pp. 140–149 (In Russ.).
3. Shulga, T. E., Khramov, D. E. Software development life cycle. *Bulletin of Astrahan State Technical University. Series: Control, Computer Science and Information Technology*, 2023, no. 2, pp. 66–74 (In Russ.).
4. Potseluko, A. S. H., Kravets, A. G., Kultsova, M. B. Personalization of mobile application interfaces on the basis of interface patterns for people with special needs. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2019, no. 3 (47), pp. 17–27. DOI: 10.21672/2074-1707.2019.47.3.017-027 (In Russ.).
5. Ojino, R., Villazón-Terrazas, B., Ortiz-Rodríguez, F., Tiwari, S., Goyal, A., Jabbar, M. Selecting Ontologies for Reuse: Case of Constructing Hotel Room Ontology. *Knowledge Graphs and Semantic Web. KGSWC 2021. Communications in Computer and Information Science*, 2021, no. 1459, pp. 169–181. DOI: 10.1007/978-3-030-91305-2\_13.
6. Nur Zareen, Zulkarnain, Farid, Meziane, Gillian, Crofts. A Methodology for Biomedical Ontology Reuse. *International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems*, 2016, no. 9612, pp. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-319-41754-7\_1.
7. Protégé. Available at: <https://protege.stanford.edu/> (accessed 01.10.2024).
8. Martínez-Romero, M., Vázquez-Naya, J. M., Pereira, J. BiOSS: A System for Biomedical Ontology Selection. *Comput. Methods Programs Biomed.*, 2014, no. 114, pp. 125–140. DOI: 10.1016/j.cmpb.2014.01.020.
9. Martínez-Romero, M., Jonquet, C., O'Connor, M. J., Graybeal, J., Pazos, A. NCBO Ontology Recommender 2.0: An Enhanced Approach for Biomedical Ontology Recommendation. *J. Biomed. Semant.*, 2017, no. 8, p. 21. DOI: 10.1186/s13326-017-0128-y.
10. Tigrine, A. N., Bellahsene, Z., Todorov, K. Light-Weight Cross-Lingual Ontology Matching with LYAM++. *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2015 Conferences. OTM 2015. Lecture Notes in Computer Science*, 2015, no. 9415, pp. 527–544. DOI: 10.1007/978-3-319-26148-5\_36.
11. Shulga, T. E., Kartashova, M. V. Certificate of state registration of a computer program. *Web application for comparing RDF data «OntoSRV»*, 10.10.2023, no. 2023681111 (In Russ.).
12. Halper, M., Soldatova, L. N., Brochhausen, M. [et al.] Guidelines for the reuse of ontology content. *Applied Ontology*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 5–29. DOI: 10.3233/ao-230275.
13. Parkhomenko, D. A. Data visualization makes sense of Big data. *Big Data and Advanced Analytics*, 2021, no. 7–1, pp. 416–417.
14. Shulga, T. E., Kartashova, M. V. The use of class axioms with restrictions on properties in the process of mapping ontologies. *Problems of management in socio-economic and technical systems: materials of the XIX International Scientific and Practical Conference*, 2023, pp. 122–124 (In Russ.).
15. Shulga, T. E., Sytnik, A. A. On the issue of improving the recall and precision of Russian-language ontologies mapping. *Informatization of Education and Science*, 2023, no. 1 (57), pp. 106–116 (In Russ.).
16. S. Sukri, N. A. Samsudin, E. Fadzrin [et al.] Word2vec-based Latent Semantic Indexing (Word2Vec-LSI) for Contextual Analysis in Job-Matching Application. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2024, vol. 15, no. 3. DOI: 10.14569/ijacsa.2024.0150371.

Статья поступила в редакцию 09.03.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 21.07.2025.

The article was submitted 09.03.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 21.07.2025.

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 004.021

### **ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ АНАЛИЗА ЦИФРОВОГО СЛЕДА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОТДЕЛА УНИВЕРСИТЕТА**

*Логинова Анна Александровна*, Костромской государственной университет, 156005, Российская Федерация, г. Кострома, ул. Дзержинского, 17/11,  
старший преподаватель, ORCID: 0000-0001-8306-4373, e-mail: aloginova255@gmail.com

*Денисов Артем Руфимович*, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова, 197022, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литер Ф,  
доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-3359-4103, e-mail: iptema@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования возможностей анализа цифрового следа в области высшего образования для принятия решений в рамках учебного процесса, а также описание инструментов и возможностей их внедрения в деятельность Информационно-аналитического центра университета. Приводятся механизмы анализа цифрового следа, оставляемого студентами и сотрудниками университета в системе управления обучением, для изучения уровня сформированности компетенций студентов. В статье описывается применение методов анализа текста, процессной аналитики и других инструментов анализа данных для создания компетентностных и поведенческих моделей студентов. Представлены алгоритмы, описывающие возможности описанных инструментов при принятии решений в рамках образовательного процесса, в том числе для формирования учебных планов и отслеживания поведенческих паттернов студентов при освоении образовательной программы. Указываются возможные перспективы применения описанных инструментов.

**Ключевые слова:** высшее образование, компетенция, аналитика, визуализация данных, обработка данных, интеллектуальный анализ процессов, интеллектуальный анализ образовательных процессов, цифровой след

### **APPLICATION OF TOOLS FOR ANALYZING THE DIGITAL FOOTPRINT OF THE LEARNING MANAGEMENT SYSTEM IN THE ACTIVITIES OF THE INFORMATION AND ANALYTICAL DEPARTMENT OF THE UNIVERSITY**

*Loginova Anna A.*, Kostroma State University, 17/11 Dzerzhinskiy St., Kostroma, 156005, Russian Federation,

Senior Lecturer, ORCID: 0000-0001-8306-4373, e-mail: aloginova255@gmail.com

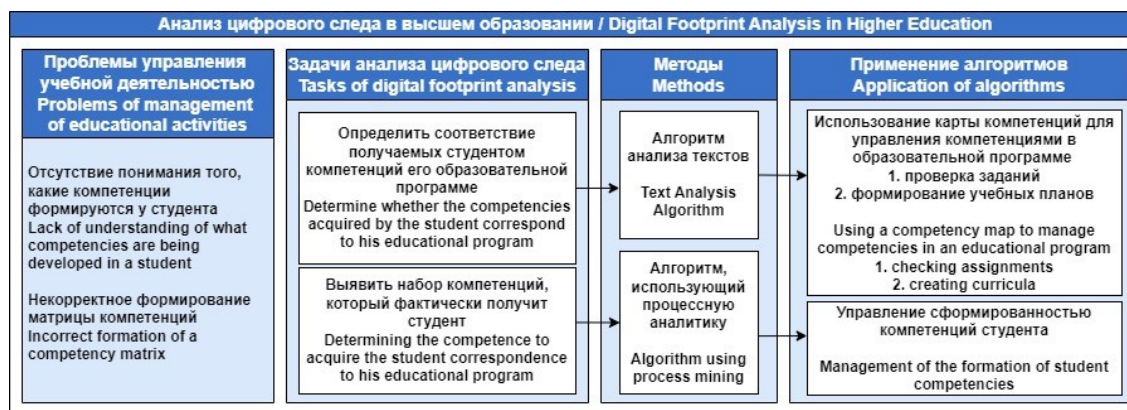
*Denisov Artem R.*, St. Petersburg State Electrotechnical University, liter F, 2 Professor Popov St., Saint Petersburg, 197022, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-3359-4103, e-mail: iptema@yandex.ru

The article presents the results of the analysis of the research possibilities in the field of higher education for decision-making within the educational process, and describes the tools and possibilities of their use in the activities of the Information and Analytical Center of the University. The article gives the mechanisms of analysis of the stages provided to students and university staff in the learning management system to study the levels of formation of students' competencies. The article is dedicated to the application of text analysis methods, process analytics and other data analysis tools for competence and behavioral models of students. Algorithms which are given in the study describe the capabilities of the described tools in studying decisions within the educational process, including for the formation of curricula and determining the behavioral models of students when mastering the educational program. Possible prospects for the application of the described instruments are indicated.

**Keywords:** higher education, competence, analytics, data visualization, data processing, process mining, educational process mining, digital footprint

Graphical annotation (Графическая аннотация)



**ВВЕДЕНИЕ**

Важнейшей задачей высших учебных заведений является обеспечение эффективного освоения обучающимися образовательных программ и получение ими всех необходимых для развития экономики компетенций. Эта особенность находит отражение в федеральном государственном образовательном стандарте высшего образования (ФГОС ВО) третьего поколения, который признает основной целью высшего образования формирование и развитие компетенций. В качестве результата образования рассматриваются не отдельные знания и навыки, а совокупность компетенций, показывающих способность выпускника осуществлять практическую деятельность в своей профессиональной сфере [1]. Высшие учебные заведения Российской Федерации, имеющие государственную аккредитацию, должны ориентироваться на данный стандарт и направить учебный процесс на формирование компетенций. В данной работе обсуждаются особенности организации учебного процесса на примере Костромского государственного университета; учебно-методическую работу в нем организует учебно-методическое управление [2], которое разрабатывает учебные планы образовательных программ для различных направлений подготовки и проверяет их матрицы компетенций на соответствие ФГОС [3]. Учебные планы определяют набор необходимых дисциплин и реализуемых в них компетенций. При этом на формирование компетенций напрямую влияет деятельность преподавателя, поскольку именно он ведет дисциплины, закрепляет за ними компетенции и оценивает компетенции студентов.

При исследовании процессов управления учебно-методической деятельностью в Костромском государственном университете был выявлен ряд проблем [3]. Основная проблема – отсутствие у всех участников образовательного процесса общего понимания того, какие компетенции формируются у студента. Это приводит к тому, что учащийся получает компетенции неравномерно: привязку компетенций для каждой дисциплины преподаватель осуществляет самостоятельно, в результате чего одним компетенциям может быть уделено значительно больше или меньше внимания, чем требуется. Кроме того, как было сказано ранее, матрица компетенций формируется на основе существующего учебного плана, поэтому компетенции подбираются в соответствии с перечнем дисциплин, в то время как матрица компетенций должна, напротив, быть основой для формирования учебного плана.

Очевидно, что решение данных проблем требует комплексного подхода, направленного на изменение многих аспектов образовательного процесса. Необходимо предварительно проанализировать имеющиеся бизнес-процессы, происходящие в вузе, и деятельность его структурных подразделений. Для осуществления такой аналитики в Костромском государственном университете было создано структурное подразделение, названное Информационно-аналитическим центром (ИАЦ КГУ). В задачи центра входит мониторинг, контроль и оценка качества бизнес-процессов университета, а также создание условий для эффективного получения обучающимися необходимых компетенций. Для решения этих задач разработан набор инструментов интеллектуальной поддержки принятия решений, который позволяет, с одной стороны, вести мониторинг существующих образовательных программ, а с другой – анализировать формирование компетенций, чтобы выявить слабые места в образовательных программах, дисциплинах и темах. Данная работа посвящена описанию разработанных инструментов и возможностей их внедрения в деятельность Информационно-аналитического центра.

**МЕТОДЫ**

В связи с повсеместным внедрением дистанционных и смешанных форматов обучения многие исследования говорят о применении в образовательном процессе концепции датацентричного подхода – подхода к принятию решений на основе данных [4]. В Костромском государственном уни-

верситете такой подход возможен ввиду наличия системы управления обучением. Любая деятельность пользователя в системе оставляет так называемый цифровой след – фрагмент данных, хранящий сведения о результатах образовательной деятельности и истории их получения. Сбор и интеллектуальный анализ цифровых следов позволяет выявить особенности поведения студентов, оценить результаты обучения, а также изучить реализацию компетенций через задания практических и лабораторных работ, созданных в системе управления обучением [5]. Все это позволяет сотрудникам ИАЦ оценить бизнес-процессы, связанные с образовательной деятельностью университета, и дать рекомендации по увеличению их эффективности.

Рассмотрим, какие аспекты деятельности университета нуждаются в применении анализа данных. Для этого сформулируем основные позиции, характерные для процесса формирования компетенций.

1. Назовем компетентностной моделью студента совокупность всех компетенций, полученных им в процессе обучения. Компетентностная модель формируется при получении образовательных результатов в ходе освоения учебных дисциплин, при этом каждая дисциплина реализует определенный набор компетенций.

2. В рамках каждой дисциплины преподаватель составляет рабочий план дисциплины (РПД) – документ, содержащий общую информацию о дисциплине, а также перечень компетенций, которые должен получить студент, освоивший данную дисциплину. Для контроля освоенности компетенций, закрепленных за дисциплиной, преподаватель разрабатывает и использует фонды оценочных средств (ФОС), содержащие перечень средств проверки степени сформированности компетенций. Компетенции в РПД и ФОС дисциплин должны соответствовать компетентностной модели образовательной программы.

3. В рамках каждой дисциплины преподаватель осуществляет работу над курсом в системе управления обучением. В каждом элементе курса есть цифровой след в виде текста задания, лекции и т. п. Пусть каждый элемент курса соответствует некоторой образовательной активности, которую выполняет студент. Тогда к каждому элементу курса, а значит, и к соответствующей образовательной активности, привязан тот или иной набор компетенций, который фактически получит студент, освоивший данную активность.

4. Одну и ту же компетенцию можно получить разными комбинациями образовательных активностей. Другими словами, каждая компетенция может реализовываться в рамках нескольких образовательных активностей, и наоборот, за одной образовательной активностью может быть закреплено несколько компетенций.

5. Подтверждение освоения образовательной программы представляет собой совокупность образовательных результатов, каждый из которых достигается путем выполнения набора образовательных активностей. Компетенция может считаться полученной, если для каждой дисциплины освоено некое подмножество необходимых образовательных активностей. Их количество и состав определяет преподаватель. Компетенция не будет считаться сформированной, если для какой-либо дисциплины набор необходимых образовательных активностей не будет освоен студентом.

6. С каждой образовательной активностью в системе связаны цифровые следы, оставляемые пользователями при взаимодействии с элементами курса. Анализируя цифровой след, можно выявить сформированность компетенций студента.

Описанные позиции указывают на необходимость решения следующих задач:

1. Определить соответствие компетенций всех РПД и ФОС соответствующей образовательной программе.

2. Определить соответствие получаемых студентом компетенций его образовательной программе.

3. Выявить набор компетенций, который фактически получит студент, освоивший некоторую образовательную активность, в том числе с использованием системы управления обучением.

4. Выявить и проанализировать состояние сформированности компетенций для отдельного студента или группы студентов.

Решение этих задач с точки зрения датацентричного подхода в образовании требует использования специальных инструментов и технологий, которые позволяют собирать, хранить и анализировать данные, связанные с образовательными процессами. Рассмотрим применение этих инструментов при решении первых двух задач (определение соответствия образовательной программе компетенций студента и компетенций, указанных в составленных преподавателем документах). Наличие цифровых следов в образовательной среде Костромского государственного университета позволило применить методы анализа данных, интеллектуального анализа текстов, кластеризации данных и разработать инструмент построения карты компетенций для определения взаимосвязи между компетенциями из разных источников. Работу данного инструмента можно разделить на несколько этапов:

1. Извлечение и подготовка данных о компетенциях из текстовых файлов с использованием библиотек языка программирования Python, таких как PyPDF2, а также с помощью регулярных выражений. Найденные компетенции сохраняются в формате csv.

2. Кластеризация текстов компетенций по ключевым словам:

а) извлечение и обработка описаний компетенций. С помощью морфологического анализатора PyMorphy2 слова переводятся в нормальную форму, и из текстовых описаний компетенций извлекаются значимые термины (ключевые слова) с помощью библиотеки Ruterextract. Данные очищаются от стоп-слов и шума;

б) создание словаря ключевых слов, токенизация текстов компетенций. Словарь (тезаурус) содержит ключевые слова, значимые для понимания связанных с заданиями компетенций. Далее все тексты трансформируются в многомерное пространство в виде матрицы TF-IDF для оценки важности слова в контексте документа;

в) векторизация токенизированных компетенций. Применяется модель t-SNE для сжатия полученных ранее расстояний комбинаций слов в двумерное пространство с целью формирования близких значений в кластеры. В качестве меры близости кластеров использовалась косинусная мера, которая вычисляет косинус угла между векторами и может принимать значения от 0 до 1, где 0 – отсутствие сходства, близости, а 1 – полное сходство. То есть чем более схожи термины по значению, тем ближе они будут в матрице [6];

г) выделение устойчивых кластеров со сходными смыслами с помощью модели байесово-гауссовой смеси (Bayesian Gaussian Mixture);

д) определение кластера компетенции по ее текстовому описанию. Значимым словам в кластере присваиваются коэффициенты путем создания модели классификации с помощью логистической регрессии с применением L1-регуляризации.

3. Визуализация кластера в виде диаграммы рассеяния (scatter plot). Основу диаграммы составляют изображения значимых слов каждого кластера, а также степень «удаленности» слова от центра кластера и величина коэффициента для слова. Коэффициент отражается на кластере в виде линии, толщина которой соответствует величине коэффициента по модулю, цвет – его знаку (положительные обозначаются красной линией, отрицательные – синей).

Для комплексной оценки компетенций образовательной программы, полноты и корректности ее компетентностного профиля, строятся карты компетенций, указанных в образовательной программе и РПД и ФОС дисциплин. Однако построение карты компетенций не позволяет оценить набор компетенций, который фактически получит студент, освоивший образовательную программу. Для изучения состояния сформированности компетенций для отдельного студента или группы студентов используются другие методы, включая так называемую процессную аналитику, или интеллектуальный анализ процессов [7]. Рассмотрим применение этих инструментов при решении двух оставшихся задач (выявление набора компетенций, который фактически получит студент, освоивший некоторую образовательную активность; выявление и анализ состояния сформированности компетенций для отдельного студента или группы студентов). Аналитика выполняется на основе журналов событий системы управления обучением, содержащих данные о пользователе, выполненном действии, времени работы пользователя в системе и т. д. Работа с данными проводится следующим образом:

1. Построение матрицы переходов, таблицы, строки и столбцы которой соответствуют событиям в системе, а значения в ячейках указывают на количество переходов между этими событиями. Построение матрицы переходов позволяет определить наиболее часто встречающиеся последовательности событий.

2. Для изучения активности студентов строится диаграмма рассеяния по двум измерениям: по оси X отмечаются временные характеристики событий, по оси Y – идентификаторы событий.

3. Действия студентов кластеризуются для выявления групп студентов со схожими поведенческими паттернами. Для каждого выделенного кластера применяются модели процессной аналитики для выявления и визуализации поведенческих моделей студентов, в том числе эвристический алгоритм (процесс визуализируется в виде эвристической сети и сети Петри); граф непосредственного следования (Directly-Follows Graph, DFG); индуктивный алгоритм (процесс визуализируется в виде модели BPMN (Business Process Model and Notation) и дерева решений).

Подробнее данный процесс описан в статье [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение приведенных методов позволяет построить и проанализировать компетентностные и поведенческие модели. Карта компетенций строится в виде дерева специфической структуры, где узлами являются модели классификации, полученные в результате логистической регрессии, которые, в свою очередь, связаны с получившимися в результате кластерами. Построение матрицы компетенций – итеративный процесс. Выделенные кластеры делятся на три категории: удачно сформированные; кластеры, содержащие несколько компетенций с большим количеством отрицательных коэффициентов, ввиду наличия редко встречающихся слов, выбросов данных; дублирующиеся кластеры. Оценка качества кластеров осуществляется вручную, путем анализа соответствующей диаграммы и текстов, попавших в него. Кластеры, попавшие в первую категорию, можно считать

конечными. Кластеры второй и третьей категорий необходимо заново подвергнуть процедуре кластеризации, отредактировав их тезаурус и объединив их с похожими кластерами. При каждой итерации создается новая модель классификации. Процедура повторяется до тех пор, пока конечные кластеры не станут приемлемыми. На рисунке 1 приведен пример визуализации кластера и фрагмент полученной карты компетенций.

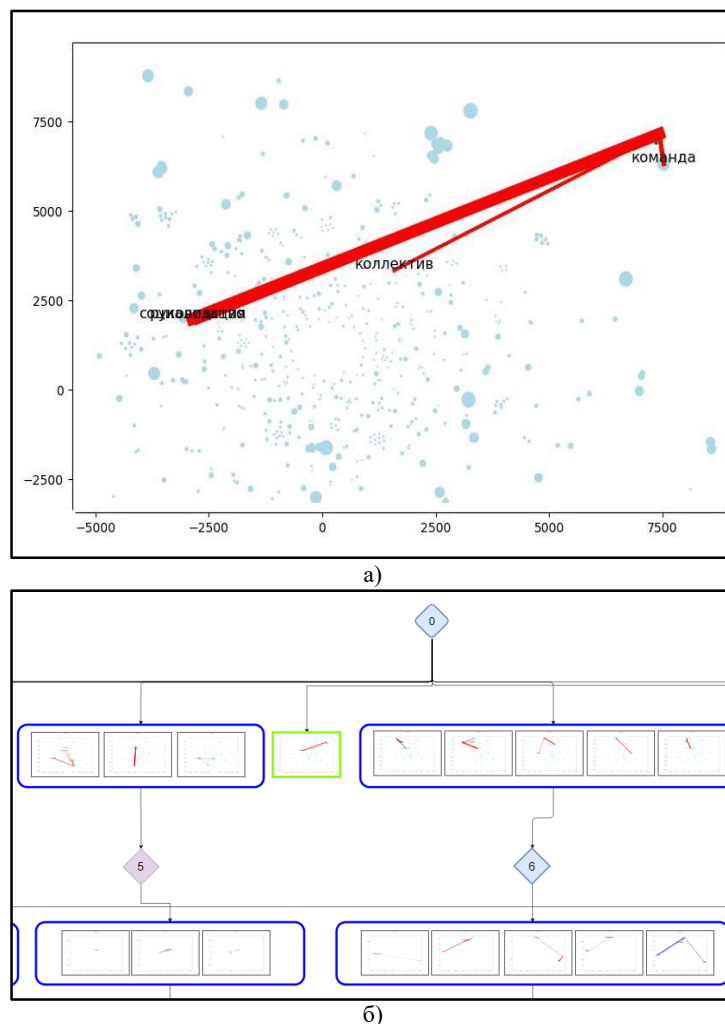
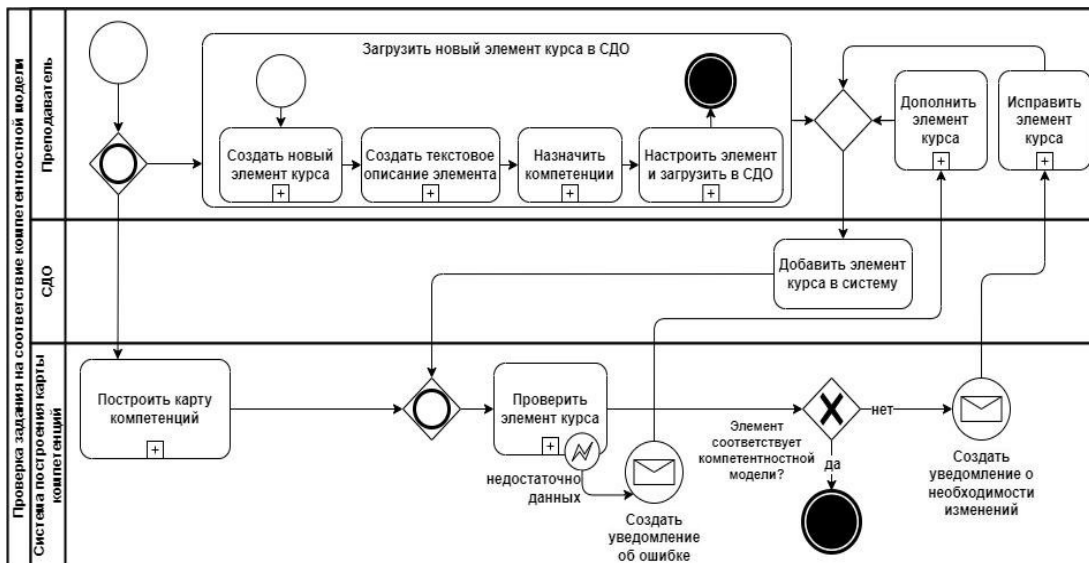


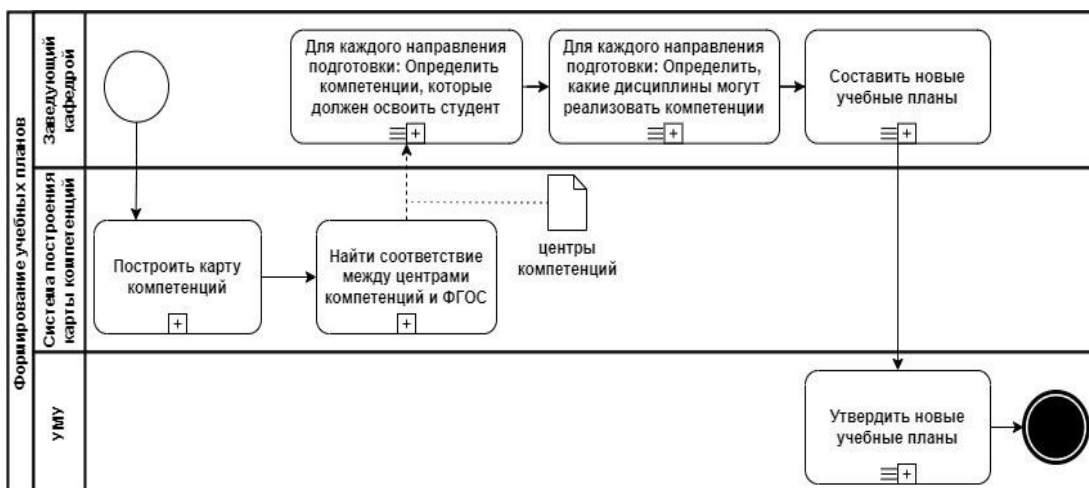
Рисунок 1 – а) Пример визуализации кластера; б) фрагмент карты компетенций (зеленым обозначен представленный конечный кластер, числа обозначают номера моделей классификации)

По сформированной карте можно анализировать новые задания, реализуемые в дисциплинах образовательной программы с помощью системы дистанционного обучения: при размещении нового задания на странице курса преподавателем система определит, с какими компетенциями на карте оно связано. Если автоматически определенные компетенции не соответствуют компетенциям образовательной программы, либо по тексту задания нельзя определить компетенции, система должна сообщить об этом руководителю образовательной программы. На рисунке 2а представлен алгоритм проверки текстов заданий на соответствие матрице компетенций. Кроме того, предложенный подход позволит создать целостное понимание процесса формирования компетенций у студентов, что, в свою очередь, даст возможность корректно распределить компетенции в учебных планах. На рисунке 2б представлен алгоритм формирования учебных планов с использованием карты компетенций.

Процесс освоения выделенных компетенций визуализируется с помощью процессных моделей. Получен ряд моделей, позволяющих выявить поведение студентов: с какими ресурсами они знакомятся в первую очередь (просматривают ли они теоретические материалы или сразу переходят к практике); есть ли циклы, указывающие на то, что студент возвращается к определенным элементам курса позже; проходят ли они все элементы курса или только необходимые для получения удовлетворительной оценки по дисциплине и т. д. Затем все поведенческие модели студентов кластеризуются. На рисунке 3 приведен результат кластеризации, по которому можно заметить четкое разделение путей освоения курса студентами.



а)



б)

Рисунок 2 – Алгоритмы использования карты компетенций для управления формированием компетенций в нотации BPMN: а) проверка заданий; б) формирование учебных планов

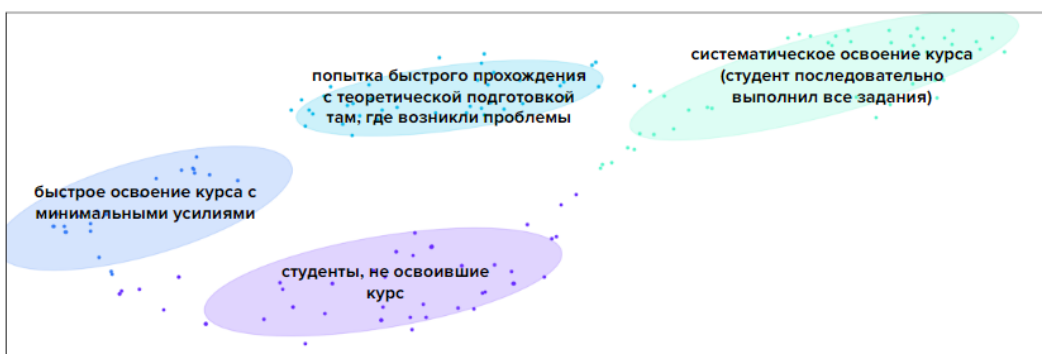


Рисунок 3 – Кластеры активности студентов

Разработанный инструмент позволяет выявить набор компетенций, который фактически получит студент, освоивший некоторую образовательную активность, в том числе с использованием системы управления обучением, а также выявить и проанализировать состояние сформированности компетенций для отдельного студента или группы студентов. Алгоритм анализа поведенческих

паттернов позволяет изучать поведение студентов, выявлять группы студентов, испытывающих затруднения при освоении той или иной дисциплины. В частности, данный инструмент может представлять интерес в контексте отслеживания изменений в поведении студента: резкие перемены в траектории студента могут стать сигналом к будущим проблемам с освоением образовательной программы. Кроме того, данный подход позволяет находить наиболее сложные для освоения блоки и, следовательно, выявлять сложности в формировании определенных компетенций и прогнозировать отношение студента к компетенциям. На рисунке 4 приведен алгоритм управления сформированностью компетенций с использованием приведенной системы.

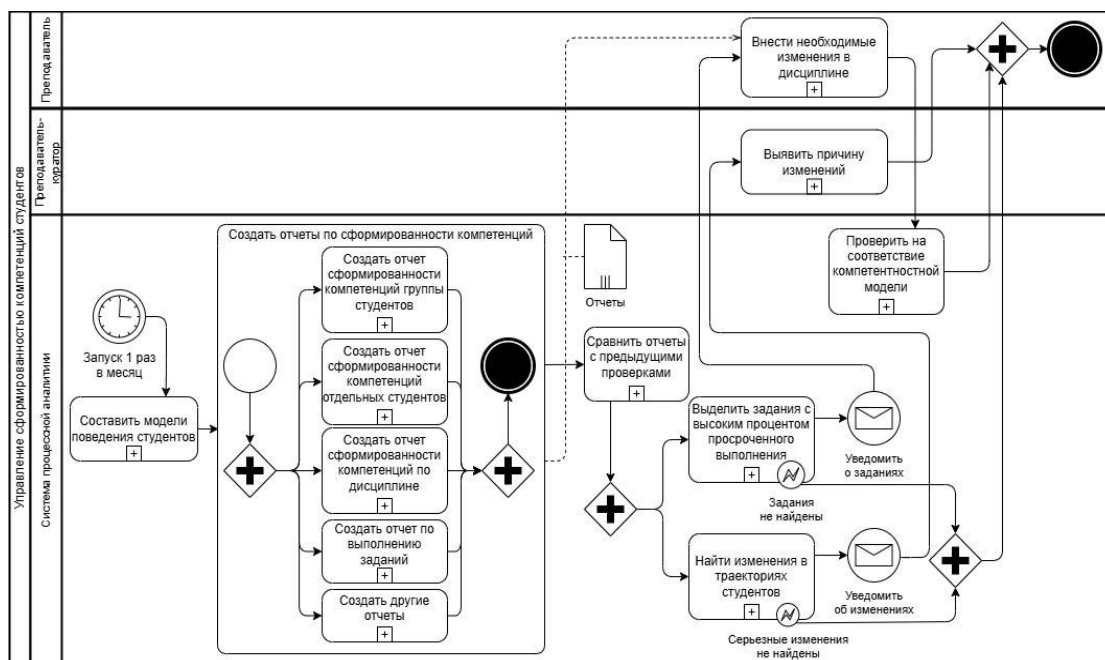


Рисунок 4 – Алгоритм управления сформированностью компетенций в нотации BPMN

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Деятельность информационно-аналитического центра, тесно связанная с анализом бизнес-процессов в образовательной среде, может получить преимущества от применения датацентричного подхода к образовательному процессу. Использование данных позволит прогнозировать результаты обучения, оценить эффективность образовательных программ и персонализировать учебный процесс. Такой подход помогает улучшить качество обучения, повысить успеваемость учащихся и сделать образование более эффективным и доступным.

Разработанный инструмент построения карт компетенций может быть использован для оценки рабочих планов дисциплин и фондов оценочных средств конкретного направления подготовки или всех направлений подготовки в вузе. Эти карты позволят создать комплексное представление о текущем процессе формирования компетенций студентов.

Кроме того, поскольку существует вероятность, что фактически получаемые студентами компетенции могут отличаться от заявленных, данный инструмент позволит оценить, формируются ли указанные компетенции в изучаемых дисциплинах. В такой карте за основу могут быть взяты тексты заданий, методических указаний к практическим и лабораторным работам или тексты лекций, которые часто хранятся в системе дистанционного обучения в виде текстовых описаний, документов и медиафайлов. Для анализа этих данных необходимо подготовить их, извлечь тексты из этих файлов и преобразовать в пригодный для анализа формат. Данный процесс является отдельной задачей анализа компетенций, поскольку процесс получения корректных и полных текстов из набора разрозненных данных достаточно сложен и практически не автоматизируется. Решением данной проблемы может быть трансформация требований к организации курсов преподавателями, а именно минимизация использования прилагаемых файлов и требования к подробному обозначению целей, задач и хода работы в текстовом описании задания. По этой причине необходимо принять ряд организационных мер по стандартизации работы преподавателей на платформе и обеспечить обязательное формирование на платформе корректных цифровых следов.

Использование инструментов анализа поведения студентов может быть применено для своевременного обнаружения проблем или отклонений в поведении студентов. Отслеживание процессных моделей поведения студентов должно стать непрерывным процессом, поскольку наиболее полезным будет выявление типичного поведения отдельного студента или группы студентов, чтобы своевременно выявить отступления от него и вовремя принять необходимые меры.

Использование анализа данных для принятия решений в образовании может привести к повышению качества образования и улучшению результатов обучения студентов. При этом следует помнить, что при использовании анализа данных необходимо учитывать этические и правовые аспекты, чтобы обеспечить защиту данных студентов.

#### Список источников

1. Карпушина, Ю. А. О проблеме формулирования универсальных компетенций ФГОС ВО 3++ (уровень бакалавриата) / Ю. А. Карпушина, О. Ю. Иванова // Ученые записки Орловского государственного университета. – 2019. – № 2 (83). – С. 239–242.
2. Положение об учебно-методическом управлении Костромского государственного университета: редакция с изменениями, утвержденными решением ученого совета от 28.03.2023 г. (протокол № 8), введенными в действие приказом и.о. ректора от 19.04.2023 г. № 115-ОД. – Кострома, 2023. – 6 с.
3. Никерин, К. А. Исследование системы учета сформированности компетенций обучающихся в Костромском государственном университете / К. А. Никерин // Ступени роста – 2021 : материалы 73-й межрегиональной научно-практической конференции молодых ученых, Кострома, 05–24 апреля 2021 года / сост. и отв. редактор Л. А. Исакова. – Кострома : Костромской государственной университет, 2021. – С. 275–276.
4. Свердлов, М. Б. Образовательная аналитика: управление образовательной организацией и создание контента на основе данных / М. Б., Свердлов, Е. В. Вербицкий, А. В. Конобеев, А. И. Крецу, В. Д. Стриканов // Современная аналитика образования. – 2021. – № 9 (58). – 64 с.
5. Ларионова, В. А. Цифровая трансформация университетов: заметки о глобальной конференции по технологиям в образовании Edcrunch Ural / В. А. Ларионова, А. А. Карасик // Университетское управление: практика и анализ. – 2019. – № 23 (3). – С. 130–135.
6. Гиниятуллин, В. М. Оценка семантической близости между критериями оценивания в рабочих программах вуза / В. М. Гиниятуллин, М. А. Салихова, А. В. Хлыбов, Д. А. Чурилов, Е. А. Чурилова // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 1. – С. 12–19.
7. Van der Aalst, W. M. P. *Process mining: Data science in action* / W. M. P. Van der Aalst. – Springer, 2016. – P. 1–477.
8. Логинова, А. А. Использование алгоритмов Process Mining для выявления паттернов поведения студентов / А. А. Логинова, А. Р. Денисов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 3. – С. 75–84.

#### References

1. Karpushina, Y. A., Ivanova, O. Yu. On the issue of formulation of universal competences of FSES for the higher education (3++) (the level of bachelor). *Scientific notes of Orel State University*. 2019. №2 (83). pp. 239–242
2. *Regulations on the educational and methodological department of Kostroma State University: version with amendments approved by the decision of the academic council dated March 28, 2023 (minutes No. 8), put into effect by the order of the acting rector dated April 19, 2023 No. 115-OD*. Kostroma, 2023. 6 p.
3. Nikerin, K. A. Study of the system of accounting for the formation of students' competencies at Kostroma State University. *Growth Steps – 2021: Proceedings of the 73rd Interregional Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Kostroma, April 5–24, 2021*. Compiled and edited by L. A. Isakova. Kostroma: Kostroma State University, 2021, pp. 275–276.
4. Sverdlov, M. B., Verbitsky, E. V., Konobeev, A. V., Kretsu, A. I., Strikanov, V. D. Educational analytics: managing an educational organization and creating content based on data. *Modern Education Analytics*, 2021, no. 9 (58). 64 p.
5. Larionova, V. A., Karasik, A. A. Digital transformation of universities: notes on the global conference Edcrunch Ural on technologies in education. *University Management: Practice and Analysis*, 2019, no. 23 (3), pp. 130–135.
6. Giniyatullin, V. M., Salikhova, M. A., Khlybov, A. V., Churilov, D. A., Churilova, E. A. Evaluation of the semantic similarity between assessment criteria in the educational programs of the university. *Modern High Technologies*, 2021, no. 1, pp. 12–19.
7. Van der Aalst, W. M. P. *Process mining: Data science in action*. Springer, 2016, pp. 1–477.
8. Loginova, A. A., Denisov, A. R. Using process mining algorithms to identify patterns of student behavior. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics*, 2024, no. 3, pp. 75–84.

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 25.03.2025.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 25.03.2025.

УДК 004.001

**ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ  
БЮДЖЕТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ**

*Чичеров Денис Олегович*, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392021, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Сергея Лазо, 26.

аспирант, ORCID: 0000-0001-6682-0325, e-mail: chicherov.workmail@yandex.ru

*Ковалёв Сергей Владимирович*, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392026, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Сенько, 16,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-5961-7561, e-mail: sseedd@mail.ru

*Ковалёва Ольга Александровна*, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392026, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Сенько, 16,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-0735-6205, e-mail: solomina-oa@yandex.ru

В данной работе отражены особенности функционального моделирования и анализа бизнес-процессов бюджетной организации с дальнейшей их оптимизацией при помощи математического аппарата марковских цепей. Приведён пример реального анализа с дальнейшей интерпретацией полученных результатов. В ходе исследования проведён анализ бизнес-процессов бюджетной организации МБУ «Дирекция городского хозяйства» города Тамбова, выявлена их функциональная модель с дальнейшим анализом каждого бизнес-процесса при помощи IDEF0 диаграмм. При анализе выявлен ключевой бизнес-процесс, который подвергся оптимизации с помощью дискретной вероятностной модели, основанной на математическом аппарате цепей Маркова. Полученная математическая модель опробована в реальных условиях и в настоящее время совершенствуется в рамках других, более глобальных исследований в сфере оптимизации бизнес-процессов обозначенной выше организации. Специально для автоматизации расчётов была написана программа для ЭВМ.

**Ключевые слова:** системный анализ, системная декомпозиция, бизнес-процесс, функциональный анализ, цепи Маркова

**FUNCTIONAL MODELING AND ANALYSIS OF BUSINESS PROCESSES  
OF A BUDGET ORGANIZATION USING MARKOV CHAINS**

*Chicherov Denis O.*, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 26 Sergei Lazo St., Tambov, 392021, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0000-0001-6682-0325, e-mail: chicherov.workmail@yandex.ru

*Kovalev Sergey V.*, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 16 Senko St., Tambov, 392026, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-5961-7561, e-mail: sseedd@mail.ru

*Kovaleva Olga A.*, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 16 Senko St., Tambov, 392026, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0735-6205, e-mail: solomina-oa@yandex.ru

This paper reflects the features of functional modeling and analysis of business processes of a budget organization with their further optimization using the mathematical apparatus of Markov chains. An example of a real analysis with further interpretation of the results is given. In the course of the study, an analysis of the business processes of the budgetary institution MBI "Directorate of Urban Economy" of the city of Tambov was carried out, their functional model was identified with further analysis of each business process using IDEF0 diagrams. The analysis revealed a key business process that has been optimized using a discrete probabilistic model based on the mathematical apparatus of Markov chains. The resulting mathematical model has been tested in real conditions and is currently being improved in the framework of other, more global studies in the field of business process optimization of the above-mentioned organization. A computer program was written specifically to automate calculations.

**Keywords:** system analysis, system decomposition, business process, functional analysis, Markov chains

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в области управления организацией (компанией, предприятием) огромную роль играют средства и методы повышения эффективности использования имеющихся ресурсов и бизнес-процессов. В общем случае под термином «ресурсы» могут рассматриваться материальные, интеллектуальные, управленческие средства, непосредственно применяемые для осуществления деятельности организации. Кроме того, в качестве ресурсов может рассматриваться персонал (именуемый также человеческим ресурсом), однако на практике его выделяют в отдельную категорию, при этом методология управления персоналом имеет схожую природу с распределением иных видов ресурсов.

Организацию можно рассматривать как систему со сложной структурой, внутри которой протекают многочисленные бизнес-процессы, в которых используются ресурсы (в общем случае)

для осуществления непосредственной деятельности. При моделировании необходимо помнить о некоторой доле неопределенности, поскольку многие реальные бизнес-процессы имеют ярко выраженный стохастический характер [1]. Эта особенность объясняется не только сложной структурой организации (компании, предприятия), в которой данные бизнес-процессы происходят, но и наличием большого числа внешних и внутренних факторов, влияющих друг на друга и на организационную систему в целом, которые могут быть неочевидными на первых этапах моделирования и выявляются с помощью специализированных методов (например, с помощью факторного анализа). Несмотря на существование огромного количества различных типов организаций, осуществляющих разнообразную деятельность, подходы к моделированию и синтезу соответствующих систем имеют схожие черты. Эта специфика была в полной мере отражена в работах Р. М. Бейсенбаева, В. М. Качкова [2], Н. А. Гукасяна [3], В. С. Анфилатова, А. А. Емельянова, А. А. Кукушкина [4], однако анализ данных источников выявил несколько разрозненные данные в анализе и моделировании специфических типов организаций, в частности бюджетных.

### **СУЩНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ**

Как было отмечено выше, организация или предприятие (вне зависимости от ее типа и вида деятельности) представляет собой сложную многоуровневую систему, содержащую в своем составе более мелкие элементы (в том числе и подсистемы) и имеющую определенную структуру. Рассматривая подобную систему с точки зрения фундаментальной структуры управления можно выявить ярко выраженную иерархию между ее элементами, находящимися на разных уровнях и имеющими друг к другу определенную степень подчиненности, что обусловлено самой структурой (подобного мнения в своих трудах придерживаются В. И. Добренков, А. П. Жабин, Ю. А. Афонин [5], Клейнер Г. Б. [6]).

Очевидно, что иерархическую модель системы можно применить не только для случая структуры управления и контроля, но и для других типов бизнес-процессов, направленных, например, на непосредственную деятельность компании. Каждый бизнес-процесс является элементом иерархической структуры системы и располагается на заданном ее уровне. Он может иметь под собой как дочерние процессы, так и являться частью родительского – более глобального и находящегося на вышестоящем иерархическом уровне, что отражено в работе Н. Н. Моисеева [7].

Из всего вышесказанного необходимо отметить, что любой бизнес-процесс можно рассматривать отдельно, вместе с тем учитывая его влияние на другие процессы и наоборот. Таким образом происходит процесс декомпозиции системы, осуществляющей известный прием «разделяй и властвуй».

Исходя из работ З. Б. Хмельницкой, Т. Е. Евтодиевой, Е. С. Акоповой [8], В. М. Курганова [9], очевидно, что сущность моделирования бизнес-процессов заключается в выявлении его структурных и функциональных особенностей, что позволяет в дальнейшем получить более полную информацию о рассматриваемом процессе и системе в целом. Кроме того, открывается возможность изучения их поведения при изменении входных параметров и внешних воздействий, а также оптимизации. Благодаря возможности декомпозиции системы на необходимое, но достаточное число иерархических уровней, возможно моделировать не всю систему сразу, а лишь ее отдельный уровень или даже ее отдельный элемент.

Исходя из анализа работ [1–9], можно сделать вывод, что методики оптимизации бизнес-процессов и ресурсов организации активно изучаются на протяжении нескольких последних десятилетий, однако существует проблематика оптимизации малых бюджетных организаций с ограниченным объемом персонала и ресурсов. Кроме того, анализ не выявил комплексного подхода к глобальной оптимизации тех или иных взаимосвязанных бизнес-процессов в организациях обозначенного типа. Поскольку число малых бюджетных организаций достаточно велико [10], данная проблема весьма актуальна.

Таким образом, целью данной работы является комплексный анализ взаимосвязанных бизнес-процессов бюджетной организации и их оптимизация с точки зрения минимизации накладных расходов временных и материальных ресурсов. Для достижения данной практической цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать один из ключевых бизнес-процессов целевой бюджетной организации и построить соответствующую функциональную модель;
- разработать подходы к оптимизации рассмотренного бизнес-процесса в совокупности и соответствующую стохастическую математическую модель на основе математического аппарата цепей Маркова;
- разработать алгоритм и его программную реализацию соответствующей стохастической модели;
- проанализировать полученные результаты.

### НОТАЦИЯ IDEF0 И ПРИМЕР ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

При декомпозиции системы на отдельные составляющие используют различные методики функционального моделирования, позволяющие в наглядной форме выразить структуру взаимодействия между элементами системы, их свойства, функциональность, влияние внешней среды и другие факторы. Одной из наиболее распространенных методик моделирования и визуализации бизнес-процессов является нотация IDEF0. Каждый дочерний уровень при использовании нотации IDEF0 имеет собственную диаграмму соответственного уровня иерархии. Функциональные блоки на диаграмме отображаются слева направо в зависимости от их соподчиненности. Верхний уровень иерархии определен контекстной диаграммой с единственным блоком, обозначаемым как А-0, отражающим рассматриваемый бизнес-процесс с соответствующими свойствами.

Для наглядной демонстрации применения функционального моделирования в нотации IDEF0 на рисунке 1 рассмотрена диаграмма бизнес-процесса организации МБУ «Дирекция городского хозяйства» города Тамбова при отношении с позиции (точки зрения) руководителя среднего звена (мастера участка). В данном случае целью моделирования является представление структуры рассматриваемого бизнес-процесса в четком и однозначном виде, что в дальнейшем позволит выявить неоптимальные элементы процесса или несовершенство его структуры. Эта информация будет необходима для конечной оптимизации всего бизнес-процесса.

Рассмотренный бизнес-процесс осуществляет распределение рабочих по бригадам в соответствии с заданными требованиями. Выбор данного примера бизнес-процесса обусловлен относительной простотой его структуры и наглядностью.

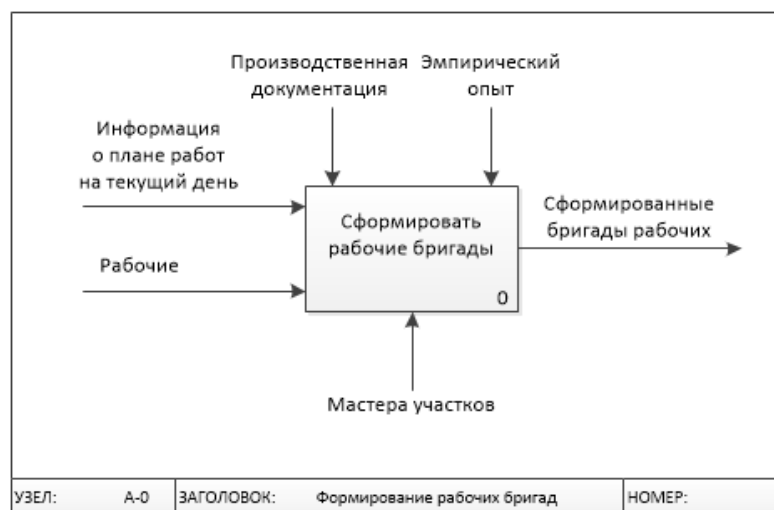


Рисунок 1 – IDEF0-диаграмма А-0

На диаграмме уровня А-0 показан единственный функциональный блок, который указывает на общие свойства данного бизнес-процесса без учета его внутреннего устройства, что полностью соответствует определению «черного ящика». Естественно, с моделью такого уровня работать сложно, однако она позволяет получить общую, глобальную информацию. Для получения более полных сведений, а также возможности взаимодействия со структурой бизнес-процесса необходимо провести его декомпозицию, т. е. перейти на дочерний уровень, IDEF0-диаграмма которого обозначается А0 (т. е. так называемый «нулевой уровень») и отражена на рисунке 2.

Рассматривая диаграмму данного бизнес-процесса, можно получить подробную информацию не только о внутренней его структуре, но и о соподчиненности дочерних процессов. Так, внимательно изучив диаграмму, можно отметить, что дочерний процесс 1 и совокупность процессов 2 и 3 могут протекать параллельно, в то время как отдельно процессы 2 и 3 могут выполняться лишь последовательно, друг за другом. Из-за того, что в качестве ресурсов для данных процессов используется несколько руководителей (мастеров участка), процесс формирования бригад на данном уровне иерархии хорошо оптимизирован: пока одним мастер участка изучает производственный план, другой может вести учёт присутствия рабочих и далее проводить инструктаж по ТБ и ОТ.

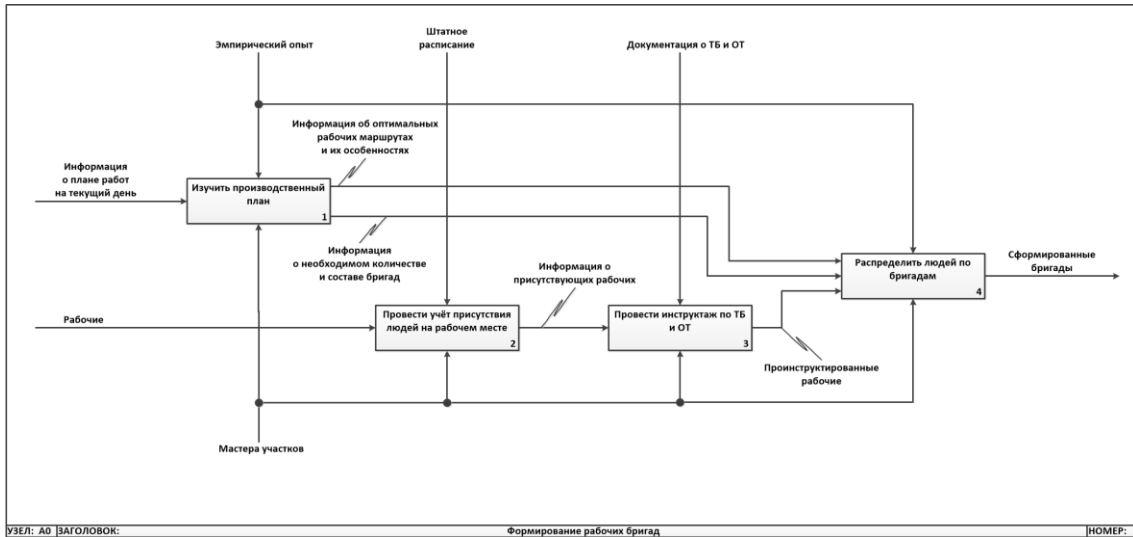


Рисунок 2 – IDEF0-диаграмма А0

Любой из дочерних процессов можно рекурсивно декомпозировать по аналогии с бизнес-процессом на диаграмме А-0, причем уровень декомпозиции устанавливается индивидуально в каждом конкретном случае. Сведения о каждом конкретном бизнес-процессе, его структуре и свойствах, дадут полную картину его функционирования и пути возможной оптимизации (если это требуется). Покажем это, декомпозировав каждый бизнес-процесс на диаграмме уровня А0 и внимательно изучив дочерние процессы.

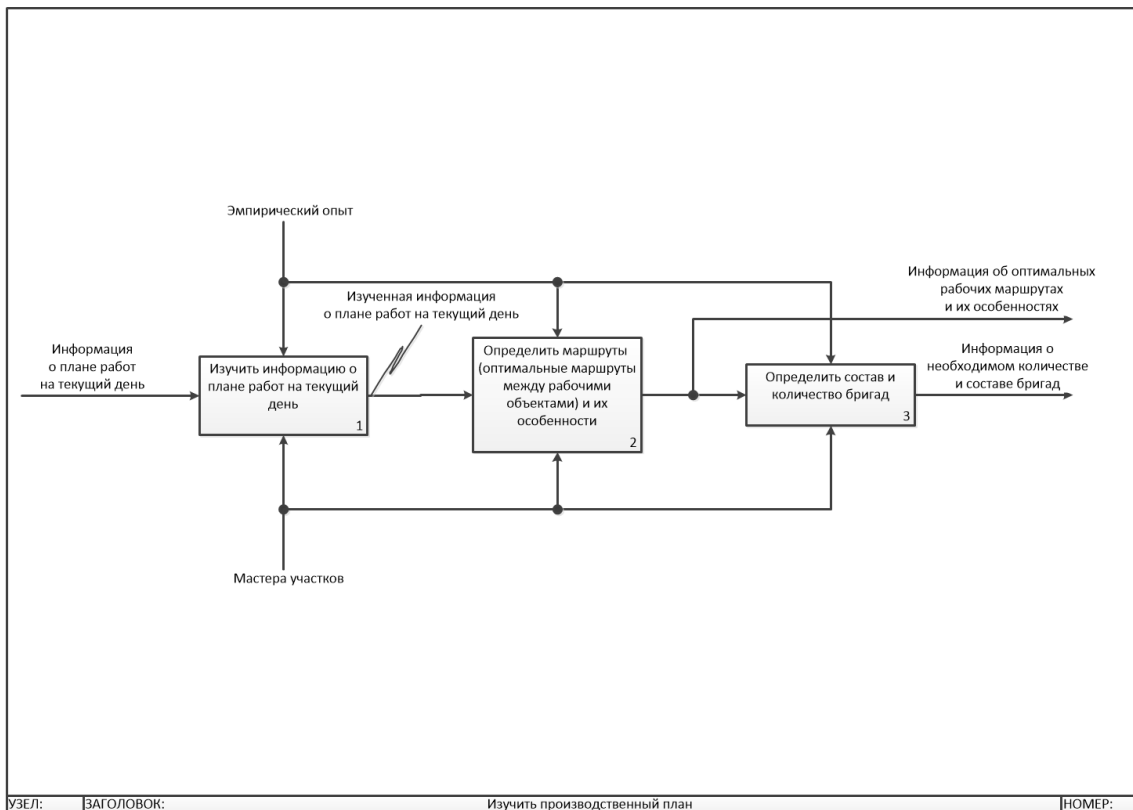


Рисунок 3 – IDEF0-диаграмма А1

На рисунке 3 изображена IDEF0-диаграмма уровня А1. Примечательным здесь является то, дочерний процесс 2 требует серьезного подхода к принятию решений по определению и составлению рабочих маршрутов, включающих в себя информацию о локализации рабочих объектов

и логистических маршрутов передвижения между ними, распределение транспорта и иных необходимых ресурсов. Данная задача сводится к типичной проблеме оптимизации, к ней относительно легко подобрать тот или иной математический метод. Учитывая, что данный бизнес-процесс является довольно продолжительным по времени (относительно прочих процессов) и требует максимально точной оценки адекватности построенных рабочих маршрутов, есть смысл в его большей оптимизации по установленным критериям.

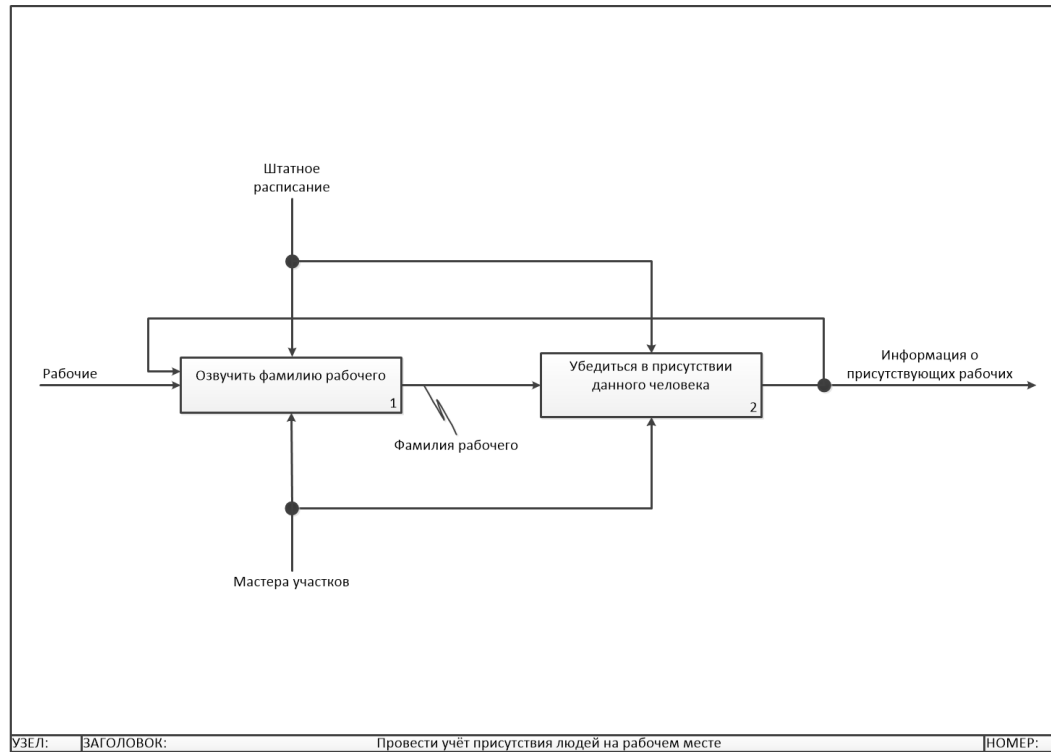


Рисунок 4 – IDEF0-диаграмма A2

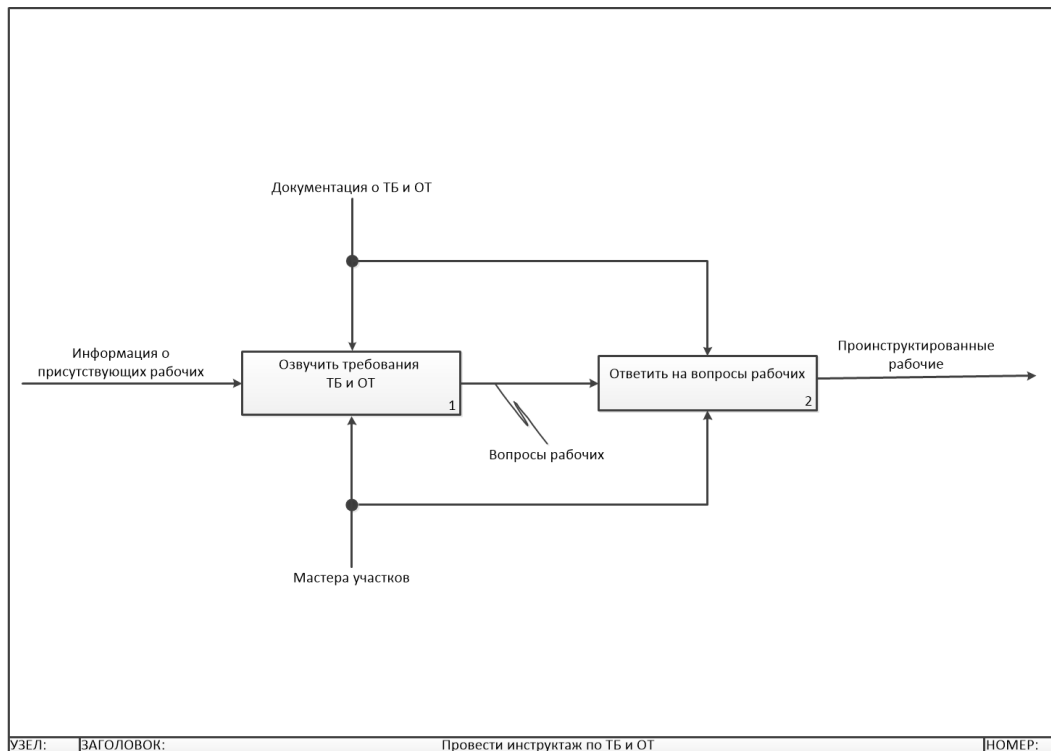


Рисунок 5 – IDEF0-диаграмма A3

Прослеживая структуру процессов на рисунках 4 и 5 и рассматривая их с точки зрения руководителя среднего звена (мастера участка), можно сделать вывод об их относительной простоте и об отсутствии необходимости в их какой-либо оптимизации. Несмотря на наличие на диаграмме А4 обратной связи по входу, можно отметить о достаточно простом функционале и структуре.

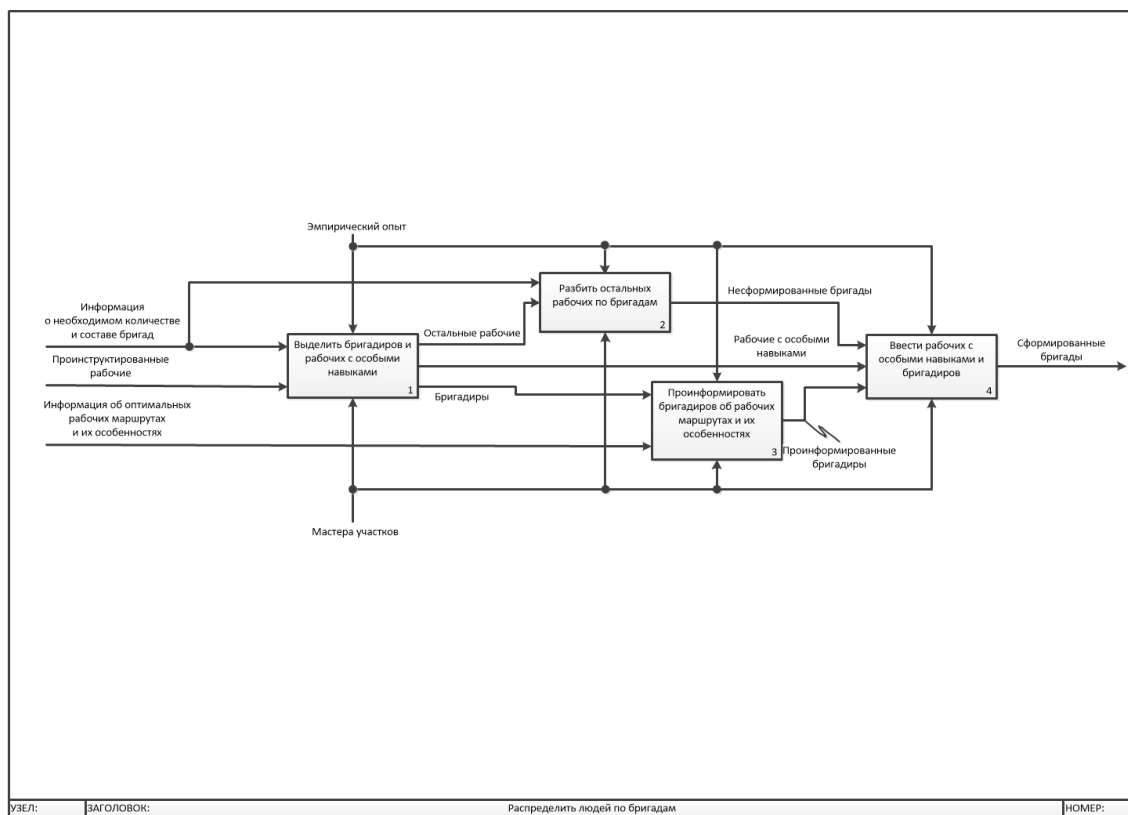


Рисунок 6 – IDEF0-диаграмма А4

На рисунке 6 изображена IDEF0-диаграмма уровня А4. При внимательном анализе данного бизнес-процесса можно сделать вывод о достаточной простоте дочерних процессов с точки зрения руководителя среднего звена (мастера участка), однако при этом следует отметить о некоторых особенностях их функционирования. Так, дочерний процесс 2 на данной диаграмме призван распределить рабочих без узкоспециализированных навыков по необходимому числу бригад. Естественно, что теоретически это можно сделать случайным образом, однако на практике учитывают некоторые особенности, уникальные для каждого отдельно взятого коллектива. Среди них можно отметить, психологическую совместимость определенных индивидуумов, которую необходимо учитывать с целью предупреждения и недопущения конфликтов, а также поддержания доброжелательной атмосферы в коллективе. Кроме того, следует учитывать и необходимое число рабочей силы для каждой конкретной бригады. Это может зависеть, к примеру, от особенностей и количества рабочих объектов каждой бригады, имеющихся в распоряжении транспортных средств для перевозки людей (зависимость от вместимости транспортного средства) и пр.

Кроме того, следует обратить внимание на дочерний процесс 2 диаграммы А1, который призван определить маршруты движения для каждой бригады. Очевидно, что данный процесс имеет косвенное отношение к первоначальной задаче формирования рабочих бригад, однако его результаты имеют существенное влияние на оптимальное функционирование каждой бригады в вопросе оперативности выполнения поставленных задач. Кроме того, оптимизация маршрутов движения транспортных средств позволяет выделить каждой бригаде соответствующее материально-техническое обеспечение, включающее в себя: подходящий вид транспорта (для перевозки людей, самосвалы, трактора), оборудование, расходные материалы и т. д. В данном случае обозначенные бизнес-процессы определяют единую систему и должны рассматриваться комплексно.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ЦЕПЕЙ МАРКОВА

Так как рассмотренный ранее дочерний процесс 2 диаграммы А1 представляет собой типичную транспортную задачу, к тому же имеющую ярко выраженный стохастический характер, то для его

оптимизации необходимо применять соответствующий инструментарий, одним из примеров которого является математический аппарат цепей Маркова. В качестве примера было решено оптимизировать маршрут движения между восемью объектами, находящимися в пределах Советского внутригородского района города Тамбова для одной из бригад. Бригада имеет в своем распоряжении стороннюю тяжелую автомобильную технику подрядчика (несколько самосвалов и тракторов), поэтому необходимо максимально минимизировать время нахождения техники в пути. Задача оптимизации сводится к поиску наиболее оптимального маршрута по всем обозначенным адресам с учетом двух критериев: общее пройденное расстояние и затраченное время движения (причем время пребывания на каждом объекте не учитывается). Карта с рабочими объектами (точками), которые необходимо посетить, показана на рисунке 7.



Рисунок 7 – Карта рабочих объектов (точек) для одной бригады

Данная проблема сводится к типичной задаче коммивояжера и позволяет оптимизировать маршрут как по значению пройденного пути, так и по затраченному на передвижение времени. К сожалению, на практике такая простейшая математическая модель не может гарантировать адекватную степень оптимизации по критерию времени, поскольку сеть автомобильных дорог представляет собой сложную систему, в которой каждый участок имеет свою пропускную способность и загруженность (трафик), значение которых может меняться от множества факторов (время суток, количество транспортных средств на данном участке и пр.). Поскольку все эти влияющие факторы учесть нереально, то в реализуемую математическую модель необходимо внести некий общий вероятностный фактор. В рассматриваемой задаче таким фактором может стать фактор загруженности определенного участка дороги (трафика): к примеру, участков маршрута между каждой из точек. В определенный период времени  $t$  и при влиянии прочих факторов трафик на каждом участке различается, причем между некоторыми из отмеченных на карте рабочих объектов прямого пути может попросту не существовать (в любой момент времени  $t$  трафик всегда равен нулю).

В данном случае рабочие объекты можно представить в виде вершин графа, в то время как участки соединяющих их дорог считать ребрами. Поскольку каждый из путей имеет свою длину, то граф можно представить в виде матрицы расстояний  $D$ , которая для случая, указанного на рисунке 7, будет иметь следующий вид:

$$D = \begin{pmatrix} 0.0 & 1.41 & 3.9 & 4.3 & 6.8 & 6.4 & 8.4 & 2.85 \\ 1.41 & 0.0 & 3.4 & 4.2 & 5.6 & 6.0 & 7.4 & 2.0 \\ 3.9 & 3.4 & 0.0 & 4.7 & 3.6 & 4.7 & 6.3 & 1.82 \\ 4.3 & 4.2 & 4.7 & 0.0 & 3.7 & 4.5 & 5.7 & 3.3 \\ 6.8 & 5.6 & 3.6 & 3.7 & 0.0 & 1.25 & 1.75 & 4.6 \\ 6.4 & 6.0 & 4.7 & 4.5 & 1.25 & 0.0 & 1.54 & 4.1 \\ 8.4 & 7.4 & 6.3 & 5.7 & 1.75 & 1.54 & 0.0 & 5.5 \\ 2.85 & 2.0 & 1.82 & 3.3 & 4.6 & 4.1 & 5.5 & 0.0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

В данном случае каждый элемент  $d_{ij}$  означает расстояние между вершинами  $i$  и  $j$  (размерность указана в километрах). Очевидно, что при случае  $i = j$  расстояние  $d_{ij}$  будет равняться нулю, поэтому вся главная диагональ матрицы  $D$  также будет нулевой.

Поскольку на практике не рассматриваются абсолютно все существующие маршруты, а также то, что все маршруты будут иметь единую отправную (начальную) точку, то для анализа предварительно выделяют несколько конкретных маршрутов, в первом приближении описывающих наиболее оптимальные варианты движения. В рассматриваемом случае были выделены четыре различных маршрута, имеющих единую отправную точку 1 (рис. 7). Каждый из этих маршрутов можно записать в виде соответствующего кортежа, содержащего упорядоченный набор пронумерованных рабочих объектов:

$$R_1 = \langle 1, 2, 4, 8, 3, 5, 6, 7 \rangle, \quad (2)$$

$$R_2 = \langle 1, 2, 4, 6, 7, 5, 8, 3 \rangle, \quad (3)$$

$$R_3 = \langle 1, 2, 3, 8, 4, 6, 7, 5 \rangle, \quad (4)$$

$$R_4 = \langle 1, 2, 4, 8, 3, 5, 7, 6 \rangle. \quad (5)$$

Следует отметить, что в рассматриваемом случае введено допущение, что любой из анализируемых маршрутов не будет иметь каких-либо циклов. Если же задача будет требовать рассмотрения маршрута такого вида, последний следует разбить на несколько частей, не имеющих циклов, и рассматривать их отдельно.

Каждый из кортежей, определяющих маршрут, можно изобразить в виде эквивалентной разреженной матрицы переходов. Так, для кортежа  $R_1$  эквивалентная матрица переходов  $M_1$  будет иметь следующий вид:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Начиная с отправной точки 1, соответствующей строке 1, можно найти переход на следующую строку, соответствующую значению номера столбца единичного элемента. В конце маршрута на каждой последующей итерации предыдущий переход будет указывать на самого себя. Благодаря введению матрицы переходов  $M_1$  появляется возможность быстрого поиска длины любого заданного маршрута. Для этого необходимо поэлементно умножить матрицу переходов  $M_1$  на матрицу расстояний  $D$ , а затем просуммировать все элементы полученного в ходе умножения матрицы:

$$S_{Mk} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (M_k \circ D)(i, j), \quad (7)$$

где  $n$  – порядок матриц  $M_1$  и  $D$ ;

$k$  – номер конкретного маршрута.

Следует отметить, что практическая реализация разработанной математической модели осуществлена в виде программы на языке программирования Python. Так, реализация формулы (7) представлена в виде отдельной программной функции (рис. 8).

```

def get_matrix(traffic_matrix, route_matrix):
    new_matrix = np.zeros((Len(route_matrix), Len(route_matrix)))
    traffic_matrix = 10 - (traffic_matrix - 1)
    for i in range(Len(traffic_matrix)):
        traffic_matrix[i] = traffic_matrix[i] / 10
    for i in range(Len(route_matrix)):
        if (1 in route_matrix[i]):
            transition_index = route_matrix[i].tolist().index(1)
            new_matrix[i][i] = 1.0 - traffic_matrix[i][transition_index]
            new_matrix[i][transition_index] = traffic_matrix[i][transition_index]
    return new_matrix

```

Рисунок 8 – Программный модуль, реализующий функцию (7)

Как было отмечено выше, время в пути зависит не только от расстояния, но и от времени, затраченного на его преодоление. Поскольку время зависит от скорости передвижения, то сторонние факторы, влияющие на скорость передвижения, влияют также и на затраченное время. Одним из наиболее значащих факторов является загруженность участка дороги. Как правило, уровень загруженности определяется в виде дискретной N-балльной шкалы, в ряде случаев – десятибалльной. Для оценки трафика на некоторых участках дорог (рис. 7) во временном промежутке с 9:00 до 9:30 по московскому времени 14.11.2024 г. была составлена соответствующая матрица  $T$ , определяющая степень загруженности участков дорог между определенными объектами (данные взяты из сервиса «Яндекс Карты» [11]):

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 4 & 5 & 4 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 3 & 3 & 4 & 6 & 4 & 4 \\ 4 & 3 & 1 & 5 & 4 & 4 & 5 & 5 \\ 2 & 2 & 5 & 1 & 4 & 4 & 4 & 7 \\ 4 & 4 & 5 & 6 & 1 & 1 & 2 & 4 \\ 4 & 4 & 5 & 3 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 5 & 5 & 5 & 3 & 3 & 1 & 1 & 4 \\ 6 & 3 & 4 & 3 & 4 & 3 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Следует отметить, что трафик оценивается по десятибалльной шкале, причём значение 1 балла означает свободный проезд по участку дороги, в то время как 10 – отсутствие возможности проехать по данному участку пути (временно перекрыт в связи с аварией или ремонтом дороги, либо же не существует вообще). Кроме того, следует принять условность, что перемещение по участку  $T_{ij}$  в  $T_{ij}$  (т. е. фактически отсутствие факта передвижения) можно оценить значением 1 по десятибалльной шкале.

Как правило, при попадании в плотный трафик (так называемый дорожный затор) с некоторой вероятностью  $Q$  проблемный участок можно преодолеть (или же остаться на нем в противном случае), причем с увеличением времени  $t$  вероятность  $Q$  будет возрастать:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = 1 \quad (9)$$

Поскольку учитывать каждый момент времени проблематично, было решено реализовать модель с дискретным временем. Из этого следует, что наиболее оптимальным маршрутом относительно затраченного времени будет являться тот, который требует на свое прохождение минимальное число шагов  $\Delta t$  с вероятностью не менее  $Q$ , которую в данном случае примем равной 0,9.

Для решения данной задачи необходимо преобразовать элементы матрицы  $T$  в диапазон значений  $[0; 1]$ , получив новую матрицу  $T'$ , причем сумма элементов любой строки должна равняться единице:

$$\sum_{j=0}^n T'(i,j) = 1, \quad (10)$$

где  $n$  – порядок матрицы  $T'$ ;  $i \in \{0..n\}$ .

Кроме этого, необходимо ввести вектор начальной вероятности  $p_0$ , размерность которого соответствует порядку соответствующих матриц переходов  $M_k$ . Поскольку в условии постановленной



производиться самым широким спектром методов. Поскольку на практике очень часто рассматриваются сложные системы, структура которых может быть полностью не ясна (или затруднена для анализа), а количество воздействующих на систему внешних и внутренних факторов огромно, то бывает полезным свести рассматриваемую математическую модель в категорию стохастических, т. е. искусственно внести некоторую вероятностную оценку в работу модели. Это позволит рассмотреть поведение системы с самых разнообразных сторон, а значит, и выявить большее количество грамотных стратегий и подходов к задачам оптимизации.

Таким образом, в ходе исследования был продемонстрирован практический пример оптимизации бизнес-процессов малой бюджетной организации с учетом ограниченного количества ресурсов. В ходе работы были решены следующие задачи:

- проанализирован один из ключевых бизнес-процессов бюджетной организации МБУ «Дирекция городского хозяйства» города Тамбова, построена соответствующая функциональная модель;
- разработаны подходы к оптимизации бизнес-процесса в совокупности, а также стохастическая математическая модель на основе математического аппарата цепей Маркова;
- разработан алгоритм и его программная реализация соответствующей стохастической модели на языке программирования Python;
- проанализированы полученные результаты.

Безусловно, задача оптимизации бизнес-процессов организации (в том числе при условии ограниченного количества ресурсов различного типа) является крайне сложной и многогранной. Данная сфера прикладного системного анализа далеко не ограничивается подходами, основанными на математическом аппарате цепей Маркова, однако его стохастическая природа неоспорима, что обуславливает примененный в ходе данной работы метод исследования.

#### Список источников

1. Агафонов, В. А. Системный анализ в стратегическом управлении / В. А. Агафонов. – Москва : Русайнс, 2016. – 88 с.
2. Бейсенбаев, Р. М. Системный подход к внедрению реверсивной логистики / Р. М. Бейсенбаев, В. М. Каточков // Социальные и экономические системы. – 2022. – № 2 (26). – С. 127–136.
3. Гукасян, Н. А. Менеджмент предприятия. Просто о сложном / Н. А. Гукасян. – Санкт-Петербург : BHV, 2015. – 156 с.
4. Анфилатов, В. С. Системный анализ в управлении / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин. – Москва : Финансы и статистика, 2018. – 76 с.
5. Добренков, В. И. Управление человеческими ресурсами: социально–психологический подход / В. И. Добренков, А. П. Жабин, Ю. А. Афонин. – Москва : КДУ, 2009. – 313 с.
6. Клейнер Г. Б. Системная экономика как платформа развития современной экономической теории // Вопросы экономики. 2013. № 6.
7. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – Москва : Либроком, 2018. – 64 с.
8. Хмельницкая, З. Б. Теоретические и концептуальные проблемы логистики : монография / З. Б. Хмельницкая, Т. Е. Евтодиева, Е. С. Акопова [и др.] ; под науч. ред. З. Б. Хмельницкой. – Пенза : ПГАУ, 2021. – 203 с.
9. Курганов, В. М. Логистика. Транспорт и склад в цепи поставок товаров / В.М. Курганов. – Москва : Книжный мир, 2016. – 321 с.
10. Федеральная служба государственной статистики. Количество федеральных государственных учреждений по организационно-правовым формам (по данным государственной регистрации). – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/FGU-01012023.xlsx> (дата обращения: 12.11.2024).
11. Яндекс Пробки. – URL: <https://yandex.ru/maps/13/tambov/probki/> (дата обращения: 14.11.2024).
12. Андреев, В. Н. Эти замечательные цепи : монография / В. Н. Андреев, А. Я. Иоффе. – Москва : Знание, 1987. – 41 с.

#### References

1. Agafonov, V. A. *System analysis in strategic management*. Moscow, Rusains Publ., 2016. 88 p.
2. Beisenbaev, R. M., Katochkov, V. M. A systematic approach to the implementation of reverse logistics. *Social and Economic Systems*, 2022, no. 2 (26), pp. 127–136.
3. Gukasyan, N. A. *Enterprise management. Just about the difficult*. St. Petersburg, BHV Publ., 2015. 156 p.
4. Anfilatov, V. S., Yemelyanov, A. A., Kukushkin, A. A. *System analysis in management*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2018. 76 p.
5. Dobrenkov, V. I., Zhabin, A. P., Afonin, Yu. A. *Human resource management: a socio-psychological approach*. Moscow, KDU, 2009. 313 p.
6. Kleiner, G. B. System economics as a platform for the development of modern economic theory. *Voprosy Ekonomiki*, 2013, № 6.
7. Moiseev, N. N. *Mathematical problems of system analysis*. Moscow, Librokom Publ., 2018. 64 p.
8. Khmel'nitskaya, Z. B. (ed.), Evtodieva, T. E., Akopova, E. S. [et al.] *Theoretical and conceptual problems of logistics : a monograph*. Penza, PSAU, 2021. 203 p.
9. Kurganov, V. M. *Logistics. Transport and warehouse in the supply chain of goods*. Moscow, Knizhnyy mir Publ., 2016. 321 p.

10. *Federal State Statistics Service. The number of federal state institutions by organizational and legal forms (according to state registration data)*. Available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/FGU-01012023.xlsx> (accessed 12.11.2024).

11. *Yandex Traffic Jams*. Available at: <https://yandex.ru/maps/13/tambov/probki/> (accessed 14.11.2024).

12. Andreev, V. N., Ioffe, A. Ya. *These wonderful chains : a monograph*. Moscow: Znanie Publ., 1987. 41 p.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 03.04.2025.

The article was submitted 17.01.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 03.04.2025.

УДК 004.942

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ БИМОДАЛЬНОГО СИГНАЛА  
В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ  
БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ**

**Железняков Дмитрий Викторович**, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

аспирант, ORCID: 0009-0004-7449-7563, e-mail: dv.zheleznyakov@yandex.ru

**Головки Юлия Александровна**, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-5401-270X, e-mail: pjulia2014@yandex.ru

**Ликхтер Анатолий Михайлович**, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9133-7998, e-mail: likhter@bk.ru

В статье описан подход к моделированию и анализу изменения бимодального сигнала при управлении биологическими объектами в водной среде. Распространение таких сигналов сопровождается изменениями их первоначальных характеристик и, как следствие, изменением эффективности воздействия на объекты управления. В работе рассмотрена модель процесса распространения бимодального сигнала, состоящего из акустического и оптического сигналов, учитывающая основные характеристики каналов передачи информации. В результате установлено, что при этом степени изменения оптического и акустического сигналов значительно различаются из-за их разной взаимосвязи с физическими свойствами каналов передачи информации. Выявлены ключевые факторы, влияющие на обловленный объем и количество передаваемой оптической и акустической информации, и определены условия, при которых возможно сохранение первоначальных характеристик сигналов.

**Ключевые слова:** передача информации, бимодальный сигнал, водная среда, биологический объект, моделирование, изменение сигнала, распространение акустических и оптических сигналов

**MODELING CHANGES IN A BIMODAL SIGNAL DURING INFORMATION TRANSMISSION  
IN CONTROLLING BIOLOGICAL OBJECTS IN THE AQUATIC ENVIRONMENT**

**Zheleznyakov Dmitry V.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0009-0004-7449-7563, e-mail: dv.zheleznyakov@yandex.ru

**Golovko Julia A.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-5401-270X, e-mail: pjulia2014@yandex.ru

**Likhter Anatoliy M.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-9133-7998, e-mail: likhter@bk.ru

The article describes an approach to modeling and analyzing changes in a bimodal signal when controlling biological objects in an aquatic environment. The propagation of such signals is accompanied by changes in their initial characteristics and, as a consequence, a change in the effectiveness of the impact on the objects of control. The paper considers a model of the process of propagation of a bimodal signal consisting of acoustic and optical signals, taking into account the main characteristics of the information transmission channels. As a result, it was found that the degrees of change in the optical and acoustic signals differ significantly due to their different relationships with the physical properties of the information transmission channels. The key factors influencing the caught volume and amount of transmitted optical and acoustic information are identified, and the conditions under which it is possible to preserve the original characteristics of the signals are determined.

**Keywords:** information transmission, bimodal signal, aquatic environment, biological object, modeling, signal modification, propagation of acoustic and optical signals

**ВВЕДЕНИЕ**

Биологические объекты в водной среде обладают сложными механизмами восприятия и реагирования на внешние сигналы [1]. Управление их поведением с целью исследования, мониторинга или промышленной деятельности требует разработки эффективных систем передачи информации. При этом система управления состоит из следующих основных элементов: источник управляющего

сигнала, внешняя среда как канал передачи информации и объект управления. Поэтому задача оптимизации процесса управления может быть сведена к максимизации пропускной способности каналов передачи информации [2]:

$$P_{resmax} = \sum_{i=1}^n P_{max_i}(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1)$$

где  $P$  – количество информации, передаваемой ОУ через различные рецепторы;

$x_1, x_2, \dots, x_m$  – рабочие параметры системы управления. При этом для любого канала передачи информации пропускная способность рассчитывается по формуле  $P = \Delta f \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$ , где  $\frac{S}{N}$  – функция «отношение сигнал – шум»,  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания канала передачи информации, воспринимаемая объектом управления.

В свою очередь, производительность технической системы рассчитывается по формуле (2) [3].

$$Q = \rho \varphi V, \quad (2)$$

где  $V$  – величина обловленного объема;

$\rho$  – плотность концентрации рыбы в объеме;

$\varphi$  – коэффициент уловистости.

Так как процесс передачи информации различным рецепторам гидробионта через внешнюю среду зависит от совокупности параметров, присущих каналу передачи информации, а именно: скорости распространения сигналов, инерциальных свойств приемника информации, характеристик канала передачи и параметров исходного сигнала, что приводит к изменению величины обловленного объема и, соответственно производительности установки.

Одним из распространенных вариантов технических систем являются бимодальные системы, использующие оптические и акустические сигналы. Для такого сигнала критерий оптимизации будет выглядеть следующим образом:

$$P_{res} = P_a(P_o) + P_o(P_a), \quad (3)$$

где  $P_a$  – пропускная способность канала при использовании акустического сигнала;

$P_o$  – пропускная способность при использовании оптического сигнала, причем каждый из них в общем случае может зависеть от характеристик другого.

Данная работа посвящена анализу изменений бимодального сигнала, состоящего из двух видов сигналов различной природы (акустический и оптический), вызванных естественными и искусственными причинами в процессе передачи информации от источника к объекту управления.

Бимодальные сигналы, использующие оптические и звуковые компоненты, предоставляют широкие возможности для воздействия на гидробионтов, учитывая их сенсорные особенности [4]. Оптические сигналы с определенным спектром способны привлекать или отпугивать гидробионтов, влияя на их визуальные рецепторы. Звуковые сигналы, в свою очередь, воздействуют на слуховые органы или механорецепторы гидробионтов, вызывая поведенческие реакции объектов управления. Сочетание этих двух типов сигналов в бимодальном формате позволяет повысить эффективность управления, создавая более комплексное и целенаправленное воздействие, поскольку увеличивают пропускную способность канала передачи информации [5].

Поскольку функции, определяющие параметры сигналов, зависят от вида канала передачи информации, при распространении в водной среде бимодальный сигнал подвергается различным изменениям. Такие физические свойства воды, как поглощение, рассеяние, преломление и турбулентность, существенно влияют на характеристики как оптического, так и звукового сигналов. Помимо искажений отдельных компонентов бимодального сигнала, изменения возникают и относительно комбинации компонентов. Например, из-за разницы в средней скорости распространения светового и звукового сигналов при большой протяженности рыбного косяка могут возникать значительные временные задержки между воздействиями на отдельные объекты акустическим и оптическим сигналами [6–7]. Все это приводит к изменению эффективности процесса управления биологическими объектами в водной среде.

Допустим, необходимо привлечь рыбу с помощью сочетания звукового сигнала (имитирующего шумы кормления) и светового сигнала (имитирующего биолюминесценцию). Звуковой сигнал может распространяться на большие расстояния, но высокочастотные компоненты шума кормления будут затухать быстрее, изменяя характер звука. Световой сигнал быстро затухает, и на расстоянии может стать незаметным, а цветовая составляющая может измениться из-за поглощения.

В результате в один и тот же момент времени рыба может услышать звуковой сигнал, но не увидеть светового сопровождения, или наоборот, если находится вблизи. Искаженный звуковой сигнал или измененный спектр света может не вызвать ожидаемую поведенческую реакцию, так как объект управления не распознает измененный сигнал как значимый.

Далее, следуя ранее предложенному примеру, рассмотрим бимодальный сигнал, состоящий из акустического и оптического компонентов и изменения управляющего сигнала, вызванных каналом передачи информации.

#### АКУСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

Характер упомянутого ранее примера акустического сигнала не является моночастотным, а представлен сложным спектром (рис.) [8].

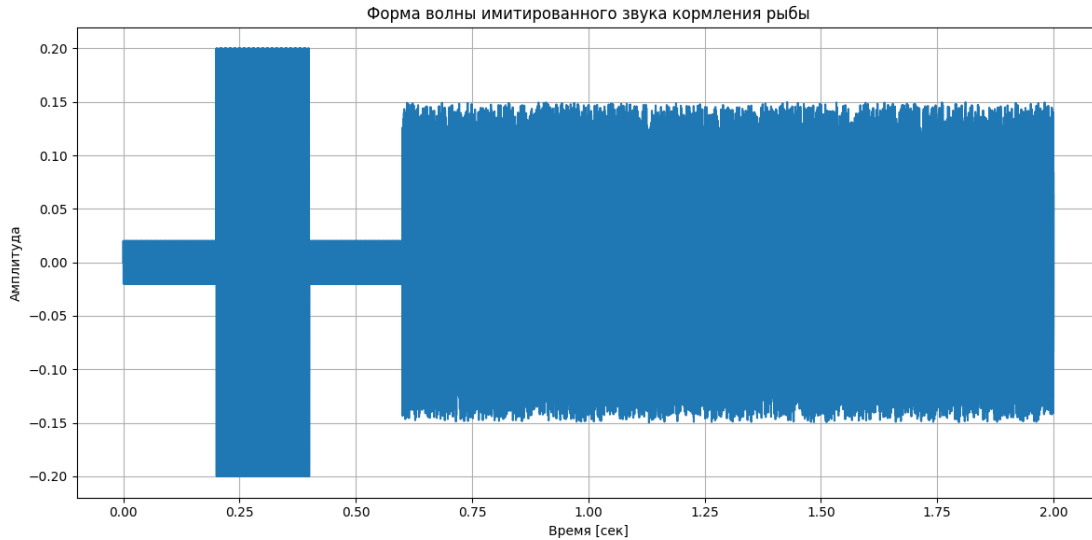


Рисунок – Спектрограмма акустического сигнала кормления

В научной литературе исследуется влияние различных факторов на распространение акустических сигналов в водной среде [9]. Одним из таких факторов является зависимость скорости звука от частоты, что может приводить к изменению акустического сигнала при его распространении. Однако в чистой воде скорость звука в диапазоне звуковых частот практически не зависит от частоты, и вода считается недиспергирующей средой для звука в этом диапазоне. Изменения акустического сигнала, связанные с различием скорости звука для разных частот, обычно незначительны [10].

Тем не менее существуют условия, при которых частотная дисперсия становится заметной. В воде, содержащей пузырьки воздуха или других газов, скорость звука становится сильно частотно-зависимой. Это связано с тем, что пузырьки обладают резонансными свойствами, и около резонансной частоты происходит сильное рассеяние и поглощение звука. Высокая концентрация взвешенных частиц, включая планктон или осадочные материалы, также влияет на дисперсионные свойства среды, вызывая частотно-зависимые изменения. Вблизи границы вода – воздух, а также в слоях с резкими изменениями температуры или солености возникают условия для дисперсии звука [11].

В диспергирующей среде скорость распространения звука зависит от частоты, что приводит к тому, что различные компоненты немонахотного сигнала распространяются с разными скоростями. Это вызывает временное растяжение или сжатие сигнала, изменение его формы и фазовые сдвиги [12]. Поглощение звука в воде также зависит от его частоты. Высокочастотные компоненты затухают быстрее, чем низкочастотные. Это приводит к изменению амплитуд различных частотных составляющих [13].

Акустический сигнал можно представить в виде гармонической волны [14]:

$$s_a(t) = A_a \cdot \cos(2\pi f_a t + \phi_a), \quad (4)$$

где  $A_a$  – амплитуда акустического сигнала;

$f_a$  – частота акустического сигнала;

$t$  – время;

$\phi_a$  – начальная фаза акустического сигнала.

Затухание можно описать с помощью экспоненциального закона:

$$S_a(x, t) = A_a \cdot e^{-\alpha_a x} \cdot \cos(2\pi f_a t - k_a x + \phi_a), \quad (5)$$

где  $S_a(x, t)$  – акустический сигнал в точке  $x$  и времени  $t$ ;

$\alpha_a$  – коэффициент поглощения акустического сигнала в воде (непоглощающий компонент затухания), зависящий от частоты и свойств воды;

$k_a$  – волновое число акустического сигнала;

$c$  – скорость звука в воде (около 1500 м/с);

$x$  – расстояние от источника до объекта управления.

Коэффициент поглощения акустического сигнала  $\alpha_a$  можно вычислить по формуле или использовать экспериментальные данные. Например, в морской воде на частотах до 1 МГц основным фактором поглощения является вязкость и теплопроводность [15].

Также при прохождении информации через канал передачи на изменение сигнала влияет как естественный шум среды, так и характеристики приемника или рецептора объекта управления, на который поступает сигнал. Таким образом, сигнал, воспринимаемый объектом управления, можно записать формулой:

$$S_a(x, t) = A_a \cdot e^{-\alpha_a x} \cdot \cos(2\pi f_a t - k_a x + \phi_a) \cdot N_{ae}(f_a) \cdot R_a(f_a), \quad (6)$$

где  $N_{ae}$  – функция естественного акустического шума среды;

$R_a$  – функция частотной чувствительности рецепторов объекта управления.

Поглощение ( $\alpha_a$ ): увеличивается с частотой. Для модельных расчетов можно использовать эмпирическую формулу поглощения в морской воде, например [16]:

$$\alpha_a(f) = \left( \frac{A_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 f^2 \right) \times 10^{-3} \text{ дБ/м}, \quad (7)$$

где  $A_1, A_2, A_3, f_1, f_2$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от температуры, солености и давления.

Рассеяние может быть учтено дополнительным коэффициентом затухания или моделироваться более сложными методами. Изменение скорости звука с глубиной приводит к искривлению пути звуковой волны. Для упрощения можно считать среду однородной или использовать модель слоистой среды [11].

### ОПТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

Оптический сигнал значительно ограничен из-за сильного поглощения и рассеяния в воде, эффективная дальность составляет от десятков до сотен метров в ясной воде и значительно меньше в мутной, в то время как акустический компонент может распространяться на километры, особенно на низких частотах [5].

Оптический сигнал в воде обычно моделируется как модулированный по интенсивности свет. Его можно представить как [17]:

$$s_o(t) = A_o \cdot \cos(2\pi f_o t + \phi_o), \quad (8)$$

где  $A_o$  – амплитуда оптического сигнала (световой интенсивности);

$f_o$  – частота модуляции оптического сигнала;

$\phi_o$  – начальная фаза оптического сигнала.

Оптический сигнал испытывает экспоненциальное затухание из-за поглощения и рассеяния, описываемое законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$S_o(x, t) = A_o \cdot e^{-\alpha_o x} \cdot \cos(2\pi f_o t - k_o x + \phi_o), \quad (9)$$

где  $S_o(x, t)$  – оптический сигнал в точке  $x$  и времени  $t$ ;

$\alpha_o$  – коэффициент затухания оптического сигнала в воде, включающий поглощение и рассеяние;

$k_o$  – волновое число оптического сигнала;

$c$  – скорость света в воде;

$x$  – расстояние от источника.

Коэффициент затухания оптического сигнала  $\alpha_o$  зависит от длины волны света и параметров воды (мутность, содержание растворенных веществ) [18].

Аналогично акустическому сигналу, на оптический сигнал воздействуют как естественный шум среды, так и характеристики приемника или рецептора объекта управления, на который поступает сигнал. Таким образом, оптический сигнал, воспринимаемый объектом управления, можно записать формулой:

$$S_o(x, t) = A_o \cdot e^{-\alpha_o x} \cdot \cos(2\pi f_o t - k_o x + \phi_o) \cdot N_{oe}(f_o) \cdot R_o(f_o), \quad (10)$$

где  $N_{oe}$  – функция естественного оптического шума среды;

$R_o$  – функция спектральной чувствительности рецепторов объекта управления.

Поглощение ( $\alpha_o$ ): зависит от длины волны  $\lambda$ . В чистой воде минимальное поглощение в синей и зеленой областях спектра (~450–550 нм) [19].

Рассеяние ( $\beta_o$ ): также зависит от длины волны и концентрации взвешенных частиц [20].

Общий коэффициент затухания:

$$\alpha_o(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda), \quad (11)$$

Закон Бугера – Ламберта – Бера записывается как:

$$S_o(x) = S_{o0} \cdot e^{-\alpha_o(\lambda)x}, \quad (12)$$

где  $S_{o0}$  – начальная интенсивность оптического сигнала.

**ИТОГОВЫЙ СИГНАЛ**

Совмещая выражения для акустического и оптического сигналов (6) и (10), получаем выражение для бимодального сигнала:

$$S(x, t) = S_a(x, t) + S_o(x, t).$$

Подставляя выражения для  $S_a(x, t)$  и  $S_o(x, t)$ :

$$S(x, t) = A_a \cdot e^{-\alpha_a x} \cdot \cos(2\pi f_a t - k_a x + \phi_a) \cdot N_{ae}(f_a) \cdot R_a(f_a) + A_o \cdot e^{-\alpha_o x} \cdot \cos(2\pi f_o t - k_o x + \phi_o) \cdot N_{oe}(f_o) \cdot R_o(f_o). \quad (13)$$

Для примера рассмотрим бимодальный сигнал на расстоянии  $x = 100$  метров со следующими параметрами:

Акустический сигнал:  $A_a = 1$  (норм),  $f_a = 10$  кГц,  $\phi_o = 0$ .

Оптический сигнал:  $A_o = 1$  (норм),  $f_o = 1$  МГц (мод),  $\phi_o = 0$ ,  $\lambda = 500$  нм.

Для коэффициента затухания акустического сигнала используем упрощенное значение  $\alpha_o = 0,1$  дБ/м при 10 кГц. Для оптического сигнала на длине волны 500 нм в чистой воде  $\alpha_o = 0,05$ .

Рассчитаем акустический сигнал:

$$S_a(100, t) = A_a \cdot e^{-0.0115 \times 100} \cdot \cos(2\pi \times 10^4 t - k_a \times 100),$$

где затухание амплитуды:

$$e^{-0.0115 \times 100} = e^{-1.15} \approx 0,317.$$

Далее рассчитаем оптический сигнал:

$$S_o(100, t) = A_o \cdot e^{-0.05 \times 100} \cdot \cos(2\pi \times 10^6 t - k_o \times 100),$$

где затухание амплитуды:

$$e^{-0.05 \times 100} = e^{-5} \approx 0.00674.$$

Амплитуда акустического сигнала на расстоянии 100 м снизилась до ~31,7 % от первоначальной. Амплитуда оптического сигнала на том же расстоянии снизилась до ~0,674 % от первоначальной.

Из-за дисперсии среды возможны фазовые искажения, приводящие к изменению формы сигнала. В общем случае нужно учесть зависимость волнового числа от частоты [21]:

$$k(f) = \frac{2\pi f}{c(f)},$$

где скорость распространения  $c(f)$  зависит от частоты из-за дисперсионных свойств среды.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Бимодальный сигнал в водной среде подвергается сложным искажениям из-за специфических свойств воды и взаимодействия каждого компонента сигнала и объекта управления. Акустический и оптический компоненты искажаются по-разному, что может привести к изменению их первоначальных характеристик и взаимной согласованности. Для эффективного использования бимодальных сигналов необходимо моделировать процесс их распространения и приема объектом управления, учитывая факторы изменения.

**Список источников**

1. Stevens, M. Sensory Ecology, Behaviour, and Evolution / M. Stevens. Oxford : Oxford University Press, 2013. 246 p.
2. Лихтер, А. М. Моделирование систем управления процессами лова рыбы : монография / А. М. Лихтер. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2006. – 315 с.
3. Мельников, В. Н. Биотехнические основы промышленного рыбловства / В. Н. Мельников. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 215 с.
4. Кудрявцев, В. И. Об использовании высокочастотных акустических полей для управления поведением рыб / В. И. Кудрявцев // Рыбное хозяйство. – 2003. – № 4. – С. 50–53.
5. Железняков, Д. В. Оценка эффективности использования систем управления различной модальности в аквакультуре / Д. В. Железняков, Ю. А. Головкин, А. М. Лихтер // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2024 : труды Семнадцатой международной конференции. г. Москва, 24–26 сентября 2024 г. – Москва : Изд-во ИПУ РАН, 2024. – С. 511–518.
6. Mobley, C. D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters / C. D. Mobley. – Academic Press, 1994. – 595 p.
7. Jerlov, N. G. Marine Optics / N. G. Jerlov. – Elsevier, 1976. – 230 p.
8. Helfman, G. S. The Diversity of Fishes: Biology, Evolution, and Ecology / G. S. Helfman, B. B. Collette, D. E. Facey, B. W. Bowen, Wiley-Blackwell. – 2022. – 720 p.
9. Clay, C. S. Fundamentals of Acoustical Oceanography / C. S. Clay, H. Medwin. – ACADEMIC PRESS, 1998. – 739 p.
10. Кравчун, П. Н. О проблемах создания многочастотных резонансных подводных излучателей малых волновых размеров / П. Н. Кравчун // Акустика океана. – 2022. – С. 232–237.
11. Jensen, F. B. Computational Ocean Acoustics / F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt. – New York : Springer, 2011. – 794 p.
12. Wang, P. A Stratified Acoustic Model Accounting for Phase Shifts for Underwater Acoustic Networks / P. Wang, L. Zhang, Vok Li // Sensors. – 2013. – Vol. 13, № 5. – P. 6183–6203. <https://doi.org/10.3390/s130506183>.

13. Applied Underwater Acoustics : Absorption of Sound in Seawater / eds: Thomas H. Neighbors, David Bradley, Elsevier, 2017. – P. 273–295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00004-7>.
14. Кузнецов, В. П. Исследования нелинейных и параметрических процессов в акустике океана / В. П. Кузнецов. – 2005. – 386 с.
15. Ярошенко, А. А. Затухание звука в морской среде (обзор) / А. А. Ярошенко, А. Д. Дегтяр // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 70–81.
16. Вадов, Р. А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде / Р. А. Вадов // Акустический журнал. – 2000. – Т. 46, № 5. – С. 624–631.
17. Wei, J. Noise Analysis and Modulation Optimization for Nonlinear Visible Light Communication System With Signal-Dependent Noise / J. Wei, Y. Wang, C. Gong, N. Huang // IEEE Photonics Journal. – 2023. – P. 1–12. – DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3323139.
18. Kirk, J. T. O. Absorption of light within the aquatic medium / J. T. O. Kirk // Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. – Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – P. 50–97.
19. Pope, R. M. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements / R. M. Pope, E. S. Fry, R. M. Pope // Appl. Opt. – 1997. – Vol. 36. – P. 8710–8723.
20. Jensen, H. W. A Practical Model for Subsurface Light Transport / H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, P. Hanrahan // Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries. – 2023. – Vol. 2. – P. 319–326. <https://doi.org/10.1145/3596711.3596747>.
21. Kaushal, H. Underwater Optical Wireless Communication / H. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 1518–1547. – DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.

#### References

1. Stevens, M. *Sensory Ecology, Behaviour, and Evolution*. Oxford, Oxford University Press, 2013. 246 p.
2. Likhter, A. M. *Modeling of control systems for fishing processes : monograph*. Astrakhan, Publishing House "Astrakhan University", 2006. 315 p. (In Russ.).
3. Melnikov, V. N. *Biotechnical foundations of industrial fishing*. Moscow, Light and food industry, 1983. 215 p. (In Russ.).
4. Kudryavtsev, V. I. On the use of high-frequency acoustic fields to control fish behavior. *Fisheries*, 2003, no. 4, pp. 50–53 (In Russ.).
5. Zheleznyakov, D. V., Golovko, Yu. A., Likhter, A. M. Evaluation of the effectiveness of using control systems of various modalities in aquaculture. *Management of Large-Scale Systems Development MLSD'2024: proceedings of the 17th International Conference*, 2024, pp. 511–518 (In Russ.).
6. Mobley, C. D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press, 1994. 595 p.
7. Jerlov, N. G. *Marine Optics*. Elsevier, 1976. 230 p.
8. Helfman, G. S., Collette, B. B., Facey, D. E., Bowen, B. W., Wiley-Blackwell. *The Diversity of Fishes: Biology, Evolution, and Ecology* /; 2022. 720 p.
9. Clay, C. S., Medwin, H. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. ACADEMIC PRESS, 1998. 739 p.
10. Kravchun, P. N. On the problems of creating multi-frequency resonant underwater emitters of small wave sizes. *Ocean Acoustics*, 2022, pp. 232–237 (In Russ.).
11. Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., Schmidt, H. *Computational Ocean Acoustics*. New York, Springer, 2011. 794 p.
12. Wang, P., Zhang, L., Li, Vok. A Stratified Acoustic Model Accounting for Phase Shifts for Underwater Acoustic Networks. *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 5, pp. 6183–6203. <https://doi.org/10.3390/s130506183>.
13. Applied Underwater Acoustics: Absorption of Sound in Seawater. Eds: Thomas H. Neighbors, David Bradley. Elsevier, 2017, pp. 273–295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00004-7>.
14. Kuznetsov, V. P. *Research of nonlinear and parametric processes in ocean acoustics*. 2005. 386 p. (In Russ.).
15. Yarochenko, A. A., Degtyar, A. D. Sound Attenuation in the Marine Environment (Review). *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 70–81 (In Russ.).
16. Vadov, R. A. Low-Frequency Sound Absorbption and Attenuation in Marine Medium. *Acoustic Journal*, 2000, vol. 46, no. 5, pp. 624–631 (In Russ.).
17. Wei, J., Wang, Y., Gong, C., Huang, N. Noise Analysis and Modulation Optimization for Nonlinear Visible Light Communication System With Signal-Dependent Noise. *IEEE Photonics Journal*, 2023, pp. 1–12. 10.1109/JPHOT.2023.3323139.
18. Kirk J.T.O. Absorption of light within the aquatic medium. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010, pp. 50–97.
19. Pope, R. M., Fry, E. S., Pope, R. M. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Appl. Opt.*, 1997, vol. 36, pp. 8710–8723.
20. Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M., Hanrahan, P. A Practical Model for Subsurface Light Transport. *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries*, 2023, vol. 2, pp. 319–326. <https://doi.org/10.1145/3596711.3596747>.
21. Kaushal, H., Kaddoum, G., Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 2016, vol. 4, pp. 1518–1547. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.

Статья поступила в редакцию 17.03.2025; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was submitted 17.03.2025; approved after reviewing 25.04.2025; accepted for publication 05.05.2025.

УДК 004.42

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРАКТИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ**

**Лапина Мария Анатольевна**, Северо-Кавказский федеральный университет, 355002, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,

кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8117-9142, e-mail: mlapina@ncfu.ru

**Ледян Денис Игоревич**, Московская финансово-юридическая академия, 327210, Российская Федерация, г. Москва, ул. Серпуховский Вал, 17,

аспирант, ORCID: 0009-0005-1462-0635, e-mail: denisledyan@gmail.com

**Лапин Виталий Геннадьевич**, Северо-Кавказский федеральный университет, Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, 1,

доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики, кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-0611-7002, e-mail: vitlx@yandex.ru

**Головин Иван Владимирович**, Северо-Кавказский федеральный университет, 355002, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,

студент, ORCID: 0009-0008-0512-7242, e-mail: ivangolovin085@gmail.com

**Багаутдинова Алина Раисовна**, Северо-Кавказский федеральный университет, 355002, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,

студент, ORCID: 0009-0003-4952-4497, e-mail: bagaauttdinova@mail.ru

В статье рассмотрены современные подходы к проектированию и внедрению систем бизнес-аналитики, направленных на повышение эффективности обработки и анализа больших объемов данных за счет применения интерактивных инструментов визуализации. Основной фокус исследования сосредоточен на изучении передовых технологий обработки данных, включая машинное обучение и искусственный интеллект, а также на анализе методов визуализации, таких как адаптивные графики, динамические диаграммы, тепловые карты и интерактивные панели управления. Особое внимание уделено вопросам интеграции этих технологий в корпоративные системы для поддержки принятия управленческих решений. Авторы также исследуют влияние визуализации данных на скорость и точность аналитики, рассматривают преимущества и недостатки различных платформ бизнес-аналитики, таких как Tableau, Power BI и QlikView. В заключение представлены рекомендации по выбору оптимальных инструментов в зависимости от специфики бизнес-задач и объема обрабатываемой информации.

**Ключевые слова:** системы визуализации, большие данные, бизнес-аналитика, обработка данных

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-30007, <https://rscf.ru/project/25-71-30007/>.

**USING INTERACTIVE VISUALIZATION TOOLS  
FOR BUSINESS PROCESS MODELING**

**Lapina Maria A.**, North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355002, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics & Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8117-9142, e-mail: mlapina@ncfu.ru

**Ledyan Denis V.**, Moscow Financial and Law Academy, 17 Serpukhovskiy Val St., Moscow, 327210, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0009-0005-1462-0635, e-mail: denisledyan@gmail.com

**Lapin Vitalii G.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Cand. Sci. (Physics & Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-0611-7002, e-mail: vitlx@yandex.ru

**Golovin Ivan I.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355002, Russian Federation,

student, ORCID: 0009-0008-0512-7242, e-mail: ivangolovin085@gmail.com

**Bagautdinova Alina R.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355002, Russian Federation,

student, ORCID: 0009-0003-4952-4497, e-mail: bagaauttdinova@mail.ru

The article discusses modern approaches to the design and implementation of business intelligence systems aimed at improving the efficiency of processing and analyzing large amounts of data through the use of interactive visualization tools. The main focus of the research is on the study of advanced data processing technologies, including machine learning and artificial intelligence, as well as on the analysis of visualization methods such as adaptive graphs, dynamic

diagrams, heat maps and interactive control panels. Special attention is paid to the integration of these technologies into corporate systems to support management decision-making. The authors also explore the impact of data visualization on the speed and accuracy of analytics, and consider the advantages and disadvantages of various business intelligence platforms such as Tableau, Power BI, and QlikView. In conclusion, recommendations are presented on the selection of optimal tools, depending on the specifics of business tasks and the amount of information processed.

**Keywords:** visualization systems, big data, business analytics, data processing

*Financial support:* the research was supported by the Russian Science Foundation grant № 25-71-30007, <https://rscf.ru/project/25-71-30007/>.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современные бизнес-процессы становятся все сложнее из-за роста объемов данных, увеличения числа взаимосвязанных операций и необходимости быстрого реагирования на изменения рынка. В этих условиях традиционные методы анализа и проектирования бизнес-процессов, основанные на текстовых описаниях и статических схемах, оказываются недостаточно эффективными. Они не позволяют оперативно выявлять узкие места, тестировать альтернативные сценарии и наглядно демонстрировать логику workflows всем участникам процесса.

Для решения этих задач все чаще применяются интерактивные инструменты визуализации, которые обеспечивают динамическое представление бизнес-процессов в формате графических моделей, диаграмм и симуляций. Такие инструменты позволяют не только отображать последовательность операций, но и анализировать их в режиме реального времени, изменяя параметры и сразу оценивая последствия. Интерактивная визуализация способствует более глубокому пониманию процессов, упрощает коммуникацию между заинтересованными сторонами и ускоряет принятие управленческих решений.

Особую значимость эти технологии приобретают в условиях цифровой трансформации, когда компании стремятся к автоматизации, внедрению процессного подхода и использованию data-driven-методов управления. Визуальные модели помогают выявлять избыточные операции, оптимизировать ресурсное планирование и прогнозировать результаты изменений до их реализации. Кроме того, интерактивные инструменты позволяют создавать прототипы будущих процессов, что особенно важно при внедрении новых ИТ-систем или реорганизации структурных подразделений.

Таким образом, применение интерактивных средств визуализации для моделирования бизнес-процессов становится ключевым фактором повышения эффективности управления. В данной работе рассматриваются основные технологии, методы и практические примеры их использования, а также оценивается их влияние на качество процессного анализа и оптимизации.

## **ИНСТРУМЕНТЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ**

Объемы данных, которые ежедневно генерируются бизнесом, растут в геометрической прогрессии. При этом необходимость эффективного использования этих данных для принятия обоснованных решений становится критически важной для поддержания конкурентоспособности. Традиционные методы анализа, такие как статические отчеты, уже не удовлетворяют потребности компаний, поскольку они не позволяют гибко и быстро анализировать информацию. Именно поэтому системы бизнес-аналитики с акцентом на интерактивные инструменты визуализации становятся одним из ключевых инструментов управления. Интерактивные визуализации дают пользователям возможность глубже понимать данные, исследовать их с разных точек зрения и находить скрытые взаимосвязи. Благодаря таким инструментам компании могут быстрее реагировать на изменения рынка, оптимизировать внутренние процессы и улучшать результаты своей деятельности. Особую актуальность эта тема приобретает в условиях растущей популярности цифровой трансформации, когда бизнес ищет решения, которые обеспечивают высокую адаптивность и эффективность. Поэтому дашборды становятся ключевым элементом аналитики компании и системы ее контроля. Рассмотрим каждый из них подробнее.

Одним из преимуществ Power BI является интеграция с другими продуктами Microsoft и доступность для пользователей с разным уровнем подготовки.

Tableau, в свою очередь, славится удобством и мощными возможностями визуализации. Эта платформа позволяет создавать сложные графики и диаграммы, а также предоставляет интерактивные возможности для глубокого анализа данных.

QlikView предлагает инновационный подход к обработке данных, используя ассоциативные модели для визуализации, что позволяет пользователям лучше исследовать взаимосвязи в данных.

Также, несмотря на наличие функций для обработки данных из разных источников, эти системы не всегда обеспечивают полноценную работу с нестандартными или сложными источниками данных. Например, интеграция с определенными внутренними системами компании может быть трудоемким процессом, требующим индивидуальных решений и дополнительных усилий

для настройки. Важно сделать дашборд максимально удобным для восприятия, повысить его эффективность, чтобы за короткое время пользователь мог принять результативное решение.

Не менее важной проблемой является ограниченная поддержка многозадачности и большого объема данных в реальном времени. Хотя эти платформы могут справляться с обработкой больших объемов информации, их производительность может снизиться при работе с очень большими наборами данных или при необходимости выполнения вычислений в реальном времени. Это ограничивает возможности платформ для использования в ситуациях, когда требуется анализ данных в процессе их поступления или в условиях динамично меняющихся условий.

Таблица 1 – Сравнительный анализ инструментов визуализации данных

Критерий	Power BI	Tableau	QlikView
Стоимость	Доступен бесплатный план, платные версии по подписке	Дорогие лицензии, бесплатный пробный период	Высокая стоимость, бесплатная версия ограничена
Интерфейс	Интуитивно понятный, легкий в освоении	Очень гибкий, но может требовать обучения	Сложнее в освоении, менее интуитивен
Гибкость	Хорошая настройка визуализаций, ограниченная кастомизация	Высокая кастомизация, поддержка пользовательских функций	Хорошая кастомизация, возможность работы с большими данными
Количество визуализаций	Множество стандартных визуализаций	Огромное количество стандартных и пользовательских визуализаций	Базовые визуализации, но поддержка интеграции с внешними инструментами
Поддержка различных источников данных	Поддержка большинства популярных источников данных	Поддержка широкого спектра источников данных	Поддержка множества источников, включая нестандартные
Производительность	Хорошая производительность для небольших данных	Очень высокая производительность, особенно для больших данных	Высокая производительность, особенно для работы с большими наборами данных
Доступность	Поддержка мобильных приложений и облака	Есть мобильная версия и облачная версия	Мобильное приложение и облачная версия доступны
Поддержка аналитики в реальном времени	Есть поддержка в платных версиях	Отличная поддержка в реальном времени	Сильная аналитика в реальном времени
Сложность настройки и интеграции	Легко интегрируется с продуктами Microsoft	Требует значительных усилий для интеграции с внутренними системами	Сложная интеграция и настройка, требуется время для освоения
Поддержка коллаборации и совместной работы	Хорошая поддержка для командной работы и совместного использования отчетов	Интуитивно понятные инструменты для совместной работы	Совместная работа возможна, но требует дополнительных настроек

В наше время компании все чаще используют облачные сервисы в системах бизнес-аналитики, чаще всего используются: Google Cloud, Microsoft Azure или же AWS. Все эти платформы способны хранить и обрабатывать большие массивы данных с большим уровнем доступности и масштабируемости. Это уместно для компаний, ведущих работу со своими географически распределенными командами, так как они могут использовать дашборды из любого уголка света. Применение облачных технологий также позволяет интегрировать дашборды с различными источниками данных, такими как базы данных, CRM системы и IoT-устройства, делая их намного полезнее для бизнеса.



Рисунок 1 – Архитектура облачного дашборда

Дополнительным ключевым аспектом является то, что это сочетание обусловлено анализом данных с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта. Современные панели мониторинга все чаще наделяются функциями прогнозирования и автоматической обработки информации. Это позволяет не только анализировать текущее положение дел, но и прогнозировать будущие изменения, например, используя алгоритмы машинного обучения для выявления отклонений в данных или прогнозирования объемов продаж на основе исторических данных. Таким образом, панели мониторинга стали больше, чем просто инструментом отображения информации, они оказались полезным вспомогательным инструментом в процессе принятия решений.



Рисунок 2 – Пример интеграции машинного обучения в дашборд

Дизайн и удобство использования также играют важную роль в создании эффективных дашбордов. Современные подходы включают принципы простоты и понятной навигации, чтобы пользователи могли легко находить нужную информацию и работать с данными. Важно, чтобы дашборды работали на разных устройствах, таких как компьютеры, планшеты и смартфоны. Для этого используется адаптивный дизайн, который позволяет корректно отображать данные на экранах любого размера.

### **АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИЗНЕС-СИСТЕМ**

Интерактивность является одной из ключевых характеристик современных дашбордов. Пользователи должны иметь возможность не только просматривать данные, но и взаимодействовать с ними: фильтровать, сортировать, детализировать и сравнивать. Это достигается за счет использования интерактивных элементов: выпадающих списков, слайдеров, переключателей и других инструментов. Пользователь может выбрать как пример определенный временной период для анализа данных или, если в этом есть необходимость, выделить конкретный регион для получения нужной информации.

Таблица 2 – Сравнительный анализ показателей бизнес-систем

Показатель	Источник данных	Логика обновления	Уведомления
План продаж	CRM-система	Ежедневное обновление	Уведомление при отклонении > 10 %
Конверсия	Google Analytics	Ежедневное обновление	Уведомление при снижении конверсии
Средний чек	База данных	Еженедельное обновление	Уведомление при изменении > 5 %

Информация в условиях постоянно растущей конкуренции представляет сегодня основной актив предприятия. Проблема защиты информации существовала всегда, но в реалиях настоящего времени из-за огромного скачка научно-технического процесса она приобрела особую актуальность. В качестве примера можно рассмотреть анализ бизнес-процессов о последствиях инцидентов безопасности в деятельности организаций.

На предприятии присутствуют два бизнес-процесса, которые связаны с функционированием подразделения, отвечающего за комплексную защиту информации, не включая защиту сведений, составляющих государственную тайну:

- защиту сведений, подлежащих отнесению к коммерческой тайне;
- защиту персональных данных.

Определим общие цели безопасности промышленного предприятия для рассматриваемых бизнес-процессов, которые могут включать:

- надежность обработки информации (доступность, целостность, конфиденциальность);
- сохранение ценности инвестиций в технологию, информацию, рабочие процессы и знания;
- защита незаменимой ценности информации о процессе, когда она служит основанием для решений с большими последствиями;
- обеспечение требований согласно законодательству РФ;
- сокращение затрат, понесенных, когда происходит инцидент безопасности (и его предотвращение);
- обеспечение непрерывности рабочих процессов на предприятии.

События ИБ на предприятиях могут быть обнаружены непосредственно неким лицом или лицами, заметившими нечто, являющееся причиной беспокойства и имеющее технический, физический или процедурный характер.

Обнаружение может осуществляться, например, детекторами огня/дыма или с помощью охранной сигнализации, путем передачи сигналов тревоги в заранее определенных места (для осуществления человеком определенных действий).

Технические события ИБ могут обнаруживаться автоматически, например, сигналы тревоги, производимые устройствами анализа записей аудита, межсетевыми экранами, системами обнаружения вторжений, антивирусными программами, в каждом случае с заранее установленными параметрами.

На следующей схеме можно проанализировать то, как система будет реагировать на событие ИБ в бизнес-процессе.

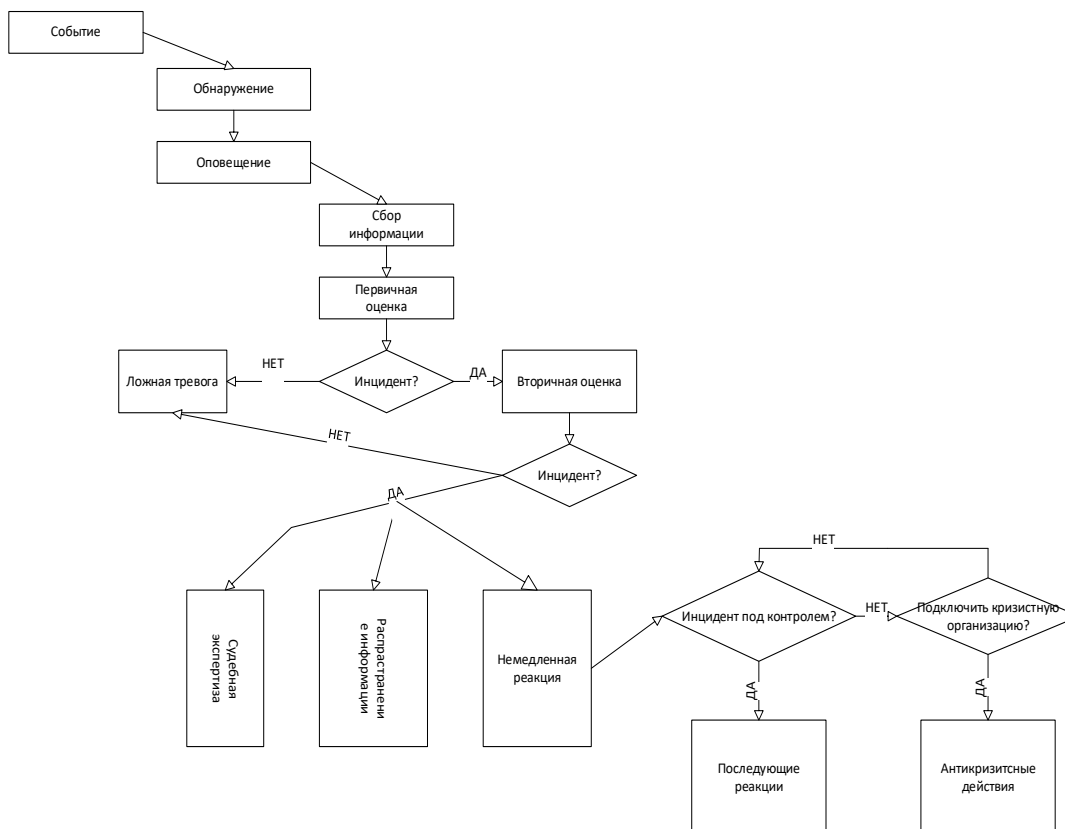


Рисунок 3 – Схема события ИБ

В [3] приведено определение уровня безопасности информации, обрабатываемой в бизнес-процессах предприятия (табл. 3).

Таблица 3 – Определение уровня безопасности информации бизнес-процессов предприятия

Процессы	Информация, обрабатываемая в процессах	Требования к защите информации, обрабатываемой в процессах, в соответствии с целостностью, конфиденциальностью и доступностью	Уровень безопасности
П-3_КТ	Сведения, подлежащие отнесению к коммерческой тайне	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Защита сведений, подлежащих отнесению к коммерческой тайне предприятия как части конфиденциальной информации, должна удовлетворять высоким требованиям безопасности и быть гарантирована.</li> <li>2. Обработанная информация должна быть верной.</li> <li>3. Есть критические по времени процедуры или множество задач, которые не могут быть выполнены без использования ИТ. Возможно только очень короткий простои</li> </ol>	Очень высокий (отказ ИТ приводит к серьезным последствиям для значительной части персонала и экономики, негативно сказывается на репутации предприятия)

Продолжение таблицы 3

<p>П-3_ПД</p>	<p>Персональные данные</p>	<p>1. Защита персональных данных как части конфиденциальной информации должна удовлетворять высоким требованиям безопасности. 2. Обработанная информация должна быть корректной. 3. Ошибки должны быть обнаруживаемыми и преодолимыми. 4. Есть критические по времени процедуры или множество задач, которые не могут быть выполнены без использования ИТ. 5. Увеличенное время простоя может негативно сказаться на репутации предприятия</p>	<p>Высокий (в случае повреждения: ограниченное время не смогут в обычном ключе работать ключевые подразделения предприятия, например, дирекция по персоналу)</p>
---------------	----------------------------	--	--

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обеспечение информационной безопасности можно рассматривать как бизнес-процесс, который заключается в контроле защищенности, выявлении «узких мест» в системе функционирования предприятия, обоснований и реализации наиболее рациональных путей совершенствования и развития системы защиты. Однако определение бизнес-процессов по защите информации и желаемого уровня безопасности – это сложный процесс построения информационной безопасности на предприятии. Конкретные решения относительно ресурсов и инвестиций, которые возникают в ходе процесса обеспечения безопасности подлежат отражению в политике безопасности и исполнению сотрудниками. Построение дашбордов для отображения процессов в области информационной безопасности позволит осуществлять мониторинг и контроль за состоянием системы.

Создание эффективных интерактивных дашбордов – это сложный процесс, который требует не только владения современными технологиями, но и глубокого понимания бизнес-процессов и нужд пользователей. Успешное применение таких решений возможно только при гармоничном сочетании качественной визуализации данных, их доступности в реальном времени и грамотной интеграции с бизнес-логикой. Именно это превращает дашборды из инструмента отображения информации в мощное средство анализа, способное существенно ускорить принятие обоснованных решений. Важно учитывать, что результативность дашбордов напрямую зависит от способности разработчиков, учитывать особенности конкретной отрасли и адаптировать решение под специфические запросы бизнеса. В эпоху, когда данные становятся главным активом, дашборды играют ключевую роль в достижении стратегических целей, позволяя компаниям быть гибкими и конкурентоспособными.

### Список источников

1. Буряков, И. Т. Дашборд: приемы эффективной визуализации / И. Т. Буряков, Е. В. Зубкова // ВІ-технологии и корпоративные информационные системы в оптимизации бизнес-процессов цифровой экономики. – 2022. – С. 63–65.
2. Когденко, В. Г. Современные тенденции в бизнес-анализе: исследование экосистемы компании, анализ информационной составляющей бизнес-модели, оценка возможностей роста / В. Г. Когденко, М. В. Мельник // Экономический анализ: теория и практика. – 2017. – Т. 16, № 10 (469). – С. 1878–1897.
3. Егорова, А. И. Анализ бизнес процессов обеспечения информационной безопасности на примере промышленного предприятия / А. И. Егорова // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. – 2015. – № 16.
4. Маркова, В. Д. Цифровизация, или управление на основе потока данных / В. Д. Маркова, А. А. Марков // Инновации. – 2019. – № 7 (249). – С. 83–87.
5. Кривоногова, А. Е. Инструменты разработки интерактивных дашбордов для анализа больших данных с использованием ИИ / А. Е. Кривоногова // Аллея науки. – 2020. – Т. 1, № 11 (50). – С. 761.
6. Харанен, Л. М. Обзор ВІ-платформ для применения в проектах информатизации здравоохранения / Л. М. Харанен, А. В. Гусев // Менеджер здравоохранения. – 2015. – № 10. – С. 41–53.
7. Гармаш, Е. В. Дашборд – инструмент визуализации данных / Е. В. Гармаш, А. А. Прошина // Формирование механизмов устойчивого развития экономики. – 2023. – С. 386–391.
8. Голованова, О. С. Дашборд – цифровой инструмент повышения эффективности управления человеческим капиталом / О. С. Голованова. – 2021. – С. 93.

9. Вильчевская, А. С. Дашборды как инструмент управления и контроля / А. С. Вильчевская // Сборник тезисов студенческой открытой конференции. – 2022. – С. 211–213.
10. Кустицкая, Т. А. Дашборды учебной аналитики для поддержки обучения по дисциплине / Т. А. Кустицкая, Р. В. Есин, Н. Н. Осипов. – 2023.
11. Бармашов, К. С. Эффективные бизнес-модели предпринимательства / К. С. Бармашов, Ю. В. Ляндау. – 2019.
12. Моазед, А. Платформа: Практическое применение революционной бизнес-модели / А. Моазед, Н. Джонсон. – Альпина Паблшер, 2019.
13. Трачук, А. В. Влияние информационно-коммуникационных технологий на бизнес-модели современных компаний / А. В. Трачук, Н. В. Линдер, Д. А. Антонов // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2014. – № 5 (86). – С. 60–68.
14. Орехова, С. В. К вопросу о феномене бизнес-модели / С. В. Орехова, Ю. С. Баусова // Современная конкуренция. – 2020. – Т. 14, № 1 (77). – С. 58–75.
15. Лапина, М. А. Исследование эффективности применения визуализации данных при моделировании бизнес-процессов / М. А. Лапина, М. Д. Федоренко, Е. Р. Семиколонова, А. Г. Золотова // Auditorium. – 2023. – № 1 (37). – С. 48–52.
16. Лапина, М. А. Исследование функционального моделирования бизнес-процессов на основе нотаций IDEF0 и eers / М. А. Лапина, Н. В. Ржевская, А. С. Медведева // Вопросы современной науки и практики. – 2023. – № 3 (89). – С. 65–75.
17. Лапина, М. А. Использование и внедрение технологии интеллектуального анализа процессов на современных предприятиях и производствах / М. А. Лапина, А. А. Вакалов, А. В. Дмитриенко // Студенческая наука для развития информационного общества : сборник материалов XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Ставрополь, 27–28 декабря 2021 года. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2022.

#### References

1. Buryakov, I. T., Zubkova, E. V. Dashboard: effective visualization techniques. *BI-technologies and corporate information systems in optimizing business processes of the digital economy*, 2022, pp. 63–65 (In Russ.).
2. Kogdenko, V. G., Melnik, M. V. Modern trends in business analysis: a study of the company's ecosystem, an analysis of the information component of the business model, an assessment of growth opportunities. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, no. 10 (469), pp. 1878–1897 (In Russ.).
3. Egorova, A. I. Analysis of business processes of information security on the example of an industrial enterprise. *New word in science and practice: hypotheses and approbation of research results*, 2015, no. 16 (In Russ.).
4. Markova, V. D., Markov, A. A. Digitalization, or data flow-based management. *Innovations*, 2019, no. 7 (249), pp. 83–87 (In Russ.).
5. Krivonogova, A. E. Interactive dashboard development tools for big data analysis using AI. *Alley of Science*, 2020, vol. 1, no. 11 (50), p. 761 (In Russ.).
6. Kharanen, L. M., Gusev, A. V. Review of BI-platforms for use in healthcare informatization projects. *The health care manager*, 2015, no. 10, pp. 41–53 (In Russ.).
7. Garmash, E. V., Proshina, A. A. Dashboard – a data visualization tool. *Formation of mechanisms for sustainable economic development*, 2023, pp. 386–391 (In Russ.).
8. Golovanova, O. S. *Dashboard – a digital tool for improving the efficiency of human capital management*, 2021, p. 93 (In Russ.).
9. Vilchevskaya, A. S. Dashboards as a management and control tool. *Collection of abstracts of the student open conference*, 2022, pp. 211–213 (In Russ.).
10. Kustitskaya, T. A., Yesin, P. V., Osipov, H. H. 4.3. *Dashboards of educational analytics to support learning in the discipline*. 2023 (In Russ.).
11. Barmashov, K. S., Lyandau, Yu. V. *Effective business models of entrepreneurship*, 2019 (In Russ.).
12. Moazed, A., Johnson, N. *Platform: Practical application of a revolutionary business model*. Alpina Publisher, 2019 (In Russ.).
13. Trachuk, A. V., Linder, N. V., Antonov, D. A. The influence of information and communication technologies on the business models of modern companies. *Strategic Decisions and Risk Management*, 2014, no. 5 (86), pp. 60–68 (In Russ.).
14. Orekhova, S. V., Bausova, Yu. S. On the phenomenon of the business model. *Modern Competition*, 2020, vol. 14, no. 1 (77), pp. 58–75 (In Russ.).
15. Lapina, M. A., Fedorenko, M. D., Semikolenova, E. R., Zolotova, A. G. Investigation of the effectiveness of data visualization in business process modeling. *Auditorium*, 2023, no. 1 (37), pp. 48–52 (In Russ.).
16. Lapina, M. A., Rzhetskaya, N. V., Medvedeva, A. S. Research of functional modeling of business processes based on IDEF0 and eers notations. *Issues of Modern Science and Practice*, 2023, no. 3 (89), pp. 65–75 (In Russ.).
17. Lapina, M. A., Vakalov, A. A., Dmitrienko, A. V. The use and implementation of technology for intelligent process analysis in modern enterprises and industries. *Student science for the development of the information society: proceedings of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation, Stavropol, December 27–28, 2021*. Stavropol: North Caucasus Federal University, 2022 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 05.06.2025; одобрена после рецензирования 01.07.2025; принята к публикации 04.07.2025.

The article was submitted 05.06.2025; approved after reviewing 01.07.2025; accepted for publication 04.07.2025.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

УДК 681.5

### **ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ УСТАЛОСТИ ВОДИТЕЛЯ И СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ**

*Дорошенко Арина Викторовна*, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, аспирант кафедры систем автоматического управления, ORCID: 0009-0000-5988-8030, e-mail: ardorosh294@gmail.com

*Кулик Алексей Анатольевич*, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления, ORCID: 0000-0002-4099-1641, e-mail: kulikalekse@yandex.ru

Приводится оценка влияния двухфакторного аварийного сочетания событий на изменение момента и пути торможения беспилотного автомобиля, которая выполняется на основе математической модели торможения беспилотного автомобиля. Предложенная математическая модель учитывает степень усталости оператора беспилотного автомобиля и коэффициент сцепления дорожного покрытия с колесной базой автомобиля. Математическая модель торможения построена для автомобилей с передним и полным приводом. В результате моделирования торможения автомобиля определено влияние на безопасность его движения аварийного сочетания усталости оператора и состояния дорожного покрытия, показано изменение тормозного момента, расстояния тормозного пути в зависимости воздействующих факторов на безопасность движения. Также в процессе выполнения работы проведено моделирование оценки аварийности движения автомобиля с учетом состояния бортового оборудования с использованием базы знаний определения угрозы дорожно-транспортного происшествия. Полученные результаты моделирования торможения беспилотного автомобиля и оценки безопасности его движения с учетом внешних и внутренних воздействующих факторов целесообразно использовать для исследований аварийных сочетаний факторов, влияющих на безопасность движения автомобиля, а также при формировании базы правил предотвращения угрозы дорожно-транспортного происшествия и разработке программно-алгоритмического обеспечения систем управления безопасностью движения беспилотного автомобиля.

**Ключевые слова:** беспилотный автомобиль, аварийные комбинации событий, оценка влияния аварийных сочетаний, модель торможения

### **RESEARCH THE SAFETY OF DRIVING AN UNMANNED VEHICLE UNDER THE INFLUENCE OF DRIVER FATIGUE AND THE CONDITION OF THE ROAD SURFACE**

*Doroshenko Arina V.*, Bauman Moscow State Technical University, bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation, graduate student, Department of the Automatic Control Systems, ORCID: 0009-0000-5988-8030, e-mail: ardorosh294@gmail.com

*Kulik Aleksey A.*, Bauman Moscow State Technical University, bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, Department of the Automatic Control Systems, ORCID: 0000-0002-4099-1641, kulikalekse@yandex.ru

An assessment of the impact of a two-factor emergency combination of events on the change in the moment and braking distance of an unmanned vehicle, which is performed on the basis of a mathematical model of unmanned vehicle braking. The proposed mathematical model takes into account the degree of fatigue of the unmanned vehicle operator and the coefficient of adhesion of the road surface to the wheelbase of the vehicle. The mathematical model of braking is built for vehicles with front-wheel drive and all-wheel drive. As a result of modeling the braking of the vehicle, the impact of an emergency combination of operator fatigue and the condition of the road surface on the safety of its movement is determined, the change in the braking moment, the braking distance is shown depending on the factors affecting traffic safety. Also, in the process of performing the work, a modeling of the assessment of the accident rate of the vehicle was carried out taking into account the state of the on-board equipment using the knowledge base for determining the threat of a road accident. The obtained results of modeling the braking of an unmanned vehicle and assessing the safety of its movement taking into account external and internal influencing factors are advisable to use for research into emergency combinations of factors affecting the safety of vehicle movement, as well as in the formation of a base of rules for preventing the threat of a road accident and the development of software and algorithmic support for the control systems for the safety of movement of an unmanned vehicle.

**Keywords:** self-driving car, emergency combinations of events, assessment of the impact of emergency combinations, model of the braking

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводятся активные работы по созданию беспилотных автомобилей (БПА), проектирование которых связано с обеспечением безопасности их движения [1–5]. В работах [6–8] проводится анализ причин аварий с участием беспилотных автомобилей и определены факторы воздействия на безопасность движения, к которым относятся техническое состояние транспортного средства, внешние воздействующие факторы, психофизическое состояние оператора БПА. Стоит отметить, что каждый воздействующий фактор безопасности движения БПА может быть представлен в форме лингвистической переменной, значение которых определяется системой управления безопасностью движения автомобиля (СУБ БПА). Структурная схема взаимодействия системы управления безопасностью движения с бортовым оборудованием БПА представлена на рисунке 1.

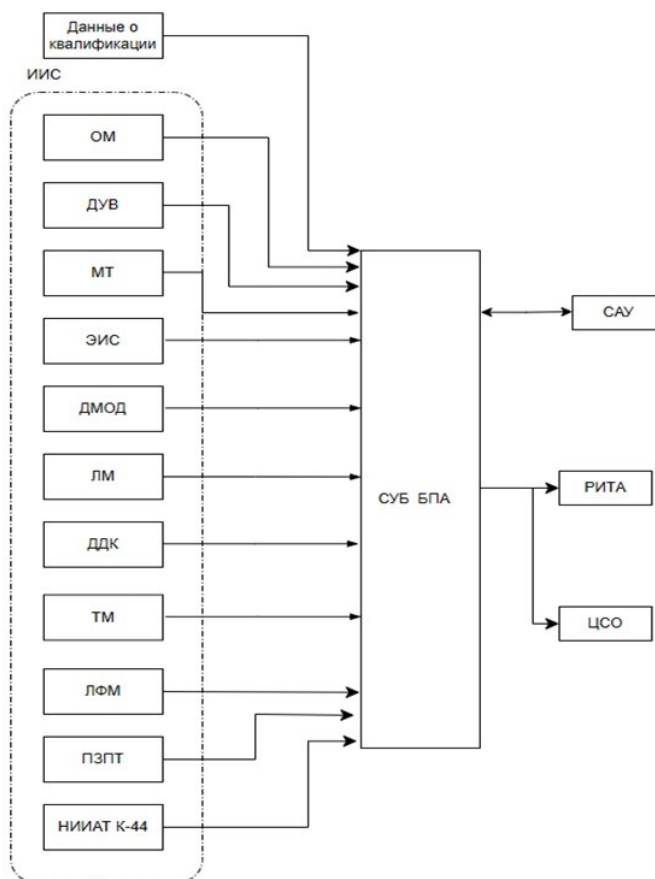


Рисунок 1 – Структурная схема взаимодействия СУБ БПА с комплексом бортового оборудования: ОМ – осадкомер; МТ – мотортестер; ЭИС – электронный измеритель стресса; ДМОД – датчик метеорологической оптической дальности; ЛМ – люксметр; ДДК – дорожно-диагностический комплекс; ТМ – термометр; ДУВ – датчик усталости водителя; ЛФМ – люфтметр; ПЗПТ – прибор замера параметров торможения; НИИАТ К-44 – прибор проверки трансмиссии; САУ – система автоматического управления; ЦСО – центральная система оповещения; РИТА – речевой информационный транслятор

Согласно структурной схеме, СУБ БПА взаимодействует с измерительным оборудованием, которое формирует сигналы, характеризующие психофизическое состояние оператора, техническое состояние автомобиля и внешние воздействующие факторы. Выходными переменными системы являются оценка безопасности движения автомобиля и корректирующие воздействия, направленные на обеспечение движения БПА. Сформированные системой безопасности движения сигналы передаются в САУ БПА, а также в средства индикации и сигнализации приборной панели оператора.

Учитывая, что психофизическое состояние оператора и внешние воздействующие факторы оказывают важное влияние на безопасность движения автомобиля, тогда оценка угрозы дорожно-транспортного происшествия с участием БПА выполняется на основании этих факторов, принимающих предаварийные значения. Примерами таких факторов является скользкая дорога и усталость водителя. При этом скользкая дорога приводит к снижению скорости, устойчивости и управляемости транспортного средства, усталость водителя оказывает влияние на точность и корректность управления беспилотным автомобилем. Поэтому на этапе проектирования систем управления безопасностью беспилотного автомобиля необходимо оценить влияние усталости оператора и покрытие асфальта на безопасность движения БПА.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является оценка изменения тормозного пути и требуемого тормозного момента движения автомобиля при сочетании усталости водителя и состояния дорожного покрытия в условиях их предаварийного состояния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Построить математическую модель оценки изменения тормозного пути автомобиля с учетом покрытия асфальта.
2. Выполнить моделирование торможения автомобиля с учетом комплексного воздействия двух факторов: состояния дорожного покрытия и состояния водителя.
3. Выполнить оценку безопасности движения беспилотного автомобиля в зависимости от состояния дорожного покрытия и степени усталости оператора БПА.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТОРМОЗНОГО ПУТИ АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ ПОКРЫТИЯ АСФАЛЬТА

Движение легкового автомобиля может быть представлено в виде математической модели, к которой предъявляются следующие требования: модель движения должна обеспечивать безаварийность движения беспилотного автомобиля, и выходной сигнал СУБ БПА должен учитывать время реагирования с учетом усталости водителя.

В работе [9] представлена математическая модель движения автомобиля с распределением тормозных моментов и имеющая следующий вид:

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{(M_{T1} + M_{T2} + M_{f1} + M_{f2})/r_k + Fw}{\delta_{п.м} m_a}, \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_y}{dt} = \frac{-(\Delta F_{z1} l_1 + \Delta F_{z2} l_2) + M_{T1} + M_{T2}}{J_y}, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_{k1}}{dt} = \frac{R_{x1} r_k - M_{T1} - M_{f1}}{J_{k1}}, \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_{k2}}{dt} = \frac{R_{x2} r_k - M_{T2} - M_{f2}}{J_{k2}}, \quad (4)$$

где  $M_{T1}, M_{T2}$  – тормозные моменты передних и задних колес, Н·м;

$M_{f1}, M_{f2}$  – моменты сопротивления качению колес при взаимодействии с опорной поверхностью дороги, Н·м;

$r_k$  – радиус колес, м;

$Fw$  – сила сопротивления воздуха, Н;

$\delta_{п.м}$  – коэффициент приведенной массы;

$m_a$  – масса автомобиля, кг;

$\Delta F_{z1}$  и  $\Delta F_{z2}$  – усилия элементов подвески передних и задних колес, Н;

$l_1$  и  $l_2$  – координаты осей вращения колес относительно центра масс автомобиля, м;

$J_y$  – момент инерции автомобиля относительно оси  $y$ , кг·м<sup>2</sup>;

$J_{k1}, J_{k2}$  – моменты инерции соответственно передних и задних колес относительно осей вращения, кг·м<sup>2</sup>.

На основании уравнений (1–4) можно составить модель параметров торможения для передне- и полноприводного автомобиля, включающую в себя суммарные моменты сцепления и тормозные моменты [10]. Суммарные моменты сцепления передних и задних колес с поверхностью земли представлены выражениями:

– для полноприводного автомобиля:

$$M_{T1} = \frac{G_a(l2 + \varphi h_g)\varphi r_k}{L}, \quad (5)$$

$$M_{T2} = \frac{G_a(l1 - \varphi h_g)\varphi r_k}{L}; \quad (6)$$

– для автомобиля с передним приводом:

$$M_T = \frac{G_a(L + \varphi h_g)\varphi r_k}{L}. \quad (7)$$

Тормозные моменты вычисляются по формулам:

– на переднее и заднее колесо полноприводного автомобиля:

$$M'_{T1} = \frac{G_a(l2 + \varphi h_g)\varphi r_k}{2L}, \quad (8)$$

$$M'_{T2} = \frac{G_a(l1 - \varphi h_g)\varphi r_k}{2L}, \quad (9)$$

– для автомобиля с передним приводом:

$$M'_T = \frac{G_a(L + \varphi h_g)\varphi r_k}{4L}. \quad (10)$$

Стоит отметить, что максимальным значением момента сцепления автомобиля с дорогой является момент, полученный при одновременной блокировке всех колес. Наибольшая интенсивность торможения достигается при доведении тормозных моментов до требуемых значений:

$$M'_T = M_{Td}. \quad (11)$$

Отсюда следует, что:

$$\frac{G_a(l2 + \varphi h_g)\varphi r_k}{2L} = 2N_{\Pi}\mu r_c. \quad (12)$$

Для автомобиля с полным приводом усилие составит:

$$N_{\Pi} = \frac{G_a(l2 + \varphi h_g)\varphi r_k}{4\mu r_c L}, \quad (13)$$

$$N_3 = \frac{G_a(l1 - \varphi h_g)\varphi r_k}{4\mu r_c L}. \quad (14)$$

Для переднеприводного автомобиля:

$$N = \frac{G_a(L + \varphi h_g)\varphi r_k}{8\mu r_c L}. \quad (15)$$

Тормозной путь вычисляется по формуле:

$$S = \frac{K_T * V^2}{254 * \varphi}, \quad (16)$$

где  $K_T$  – тормозной коэффициент (равен 1 для легкового автомобиля);

$V$  – скорость автомобиля, км/ч;

$\varphi$  – коэффициент сцепления с дорогой: при сухом асфальте – 0,7; на мокром асфальте – 0,4; если укатан снег – 0,2; обледеневшая дорога – 0,1.

Скорость реакции водителя в нормальном состоянии составляет 0,3–1,5 с., в уставшем – 3–4 с.

Время срабатывания тормозной системы составляет не более 0,6 с.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ БПА

В процессе моделирования безопасности беспилотного автомобиля рассматривались сочетания факторов, характеризующих состояние дорожного покрытия и усталости оператора беспилотного автомобиля, которые с течением времени принимают предаварийные значения. При этом начальными условиями моделирования являются нормальные условия движения автомобиля, согласно которым коэффициент сцепления колес с дорогой равен 0,7, время реакции оператора БПА составляет 1,5 с. Такое время реакции оператора беспилотного автомобиля определяется его высокой активностью, уравновешенным состоянием, нахождению за контролем и управлением движением автомобиля предшествовал сон и отсутствие нервных потрясений. Для оценки изменений при сочетании предаварийного состояния дороги и средней степени усталости оператора БПА характеристики воздействующих факторов примут следующие значения: коэффициент сцепления 0,4, что соответствует торможению на мокром асфальте, время реакции водителя увеличивается до 4 с. Значения переменных для моделирования торможения автомобиля представлены в таблице.

Таблица – Исходные данные для моделирования

Обозначение	Наименование параметра	Вариант 1	Вариант 2
$G_a$	Сила тяжести автомобиля при полной нагрузке, Н	16660	16660
$L$	База автомобиля (расстояние между осями передних и задних колес), м	2,7	2,7
$h_g$	Высота центра тяжести, м	0,57	0,57
$l_1$ и $l_2$	Координаты ЦТ, м	1,31 и 1,39	1,31; 1,39
$\varphi$	Коэффициент сцепления шин с дорогой	0,7	0,4
$r_k$	Радиус колес, м	0,335	0,335
$\mu$	Коэффициент трения между тормозным диском и фрикционной накладкой	0,4	0,4
$r_c$	Средний радиус фрикционной накладки, м	0,115	0,115
$V$	Скорость автомобиля, км/ч	60	60
$K_T$	Тормозной коэффициент	1	1

В результате моделирования получены зависимости тормозного момента и пути от коэффициента сцепления с дорогой, степени усталости водителя и их взаимного влияния на длину тормозного пути (рис. 2–5):

1. Влияние коэффициента сцепления на тормозной момент.

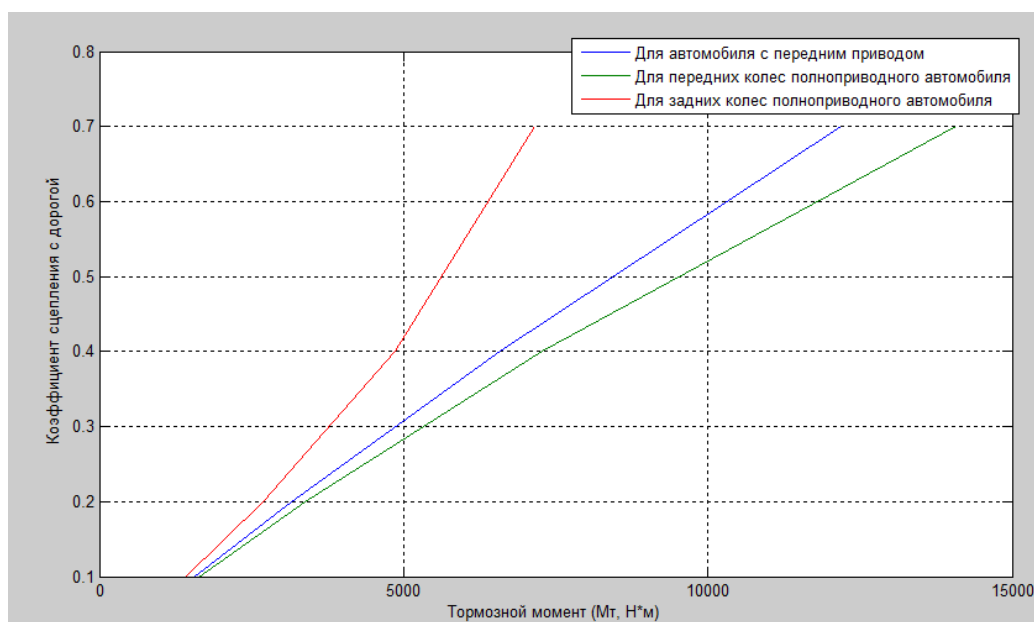


Рисунок 2 – Зависимость тормозного момента автомобиля от коэффициента сцепления с дорогой

Согласно зависимостям, представленным на рисунке 2, видно, что необходимый тормозной момент имеет прямо пропорциональную зависимость от коэффициента сцепления колес с дорожным покрытием. При сухом асфальте и скорости движения в 60 км/ч тормозной момент составляет 12185 Н·м, для мокрого асфальта момент составит 6579 Н·м. Таким образом, эффективность торможения снижается на 54 % для рассматриваемых условий движения автомобиля.

2. Влияние коэффициента сцепления на длину тормозного пути.

В процессе моделирования было принято, что время реакции водителя без учета усталости составляет 1,5 с. При этом на скорости 60 км/ч за 1 с автомобиль проезжает 16,67 м.

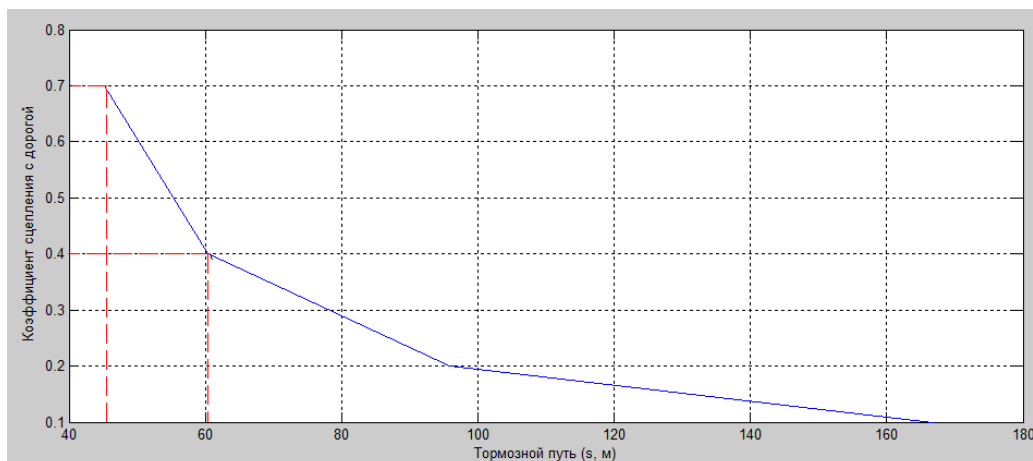


Рисунок 3 – Зависимость длины тормозного пути автомобиля от коэффициента сцепления

В результате моделирования торможения БПА определено, что с уменьшением коэффициента сцепления колес с дорогой тормозной путь увеличивается на 32 %. Так, при движении по сухому асфальту тормозной пути БПА составит 46 м, а при движении по мокрому – 61 м.

### 3. Влияние усталости оператора БПА на длину тормозного пути.

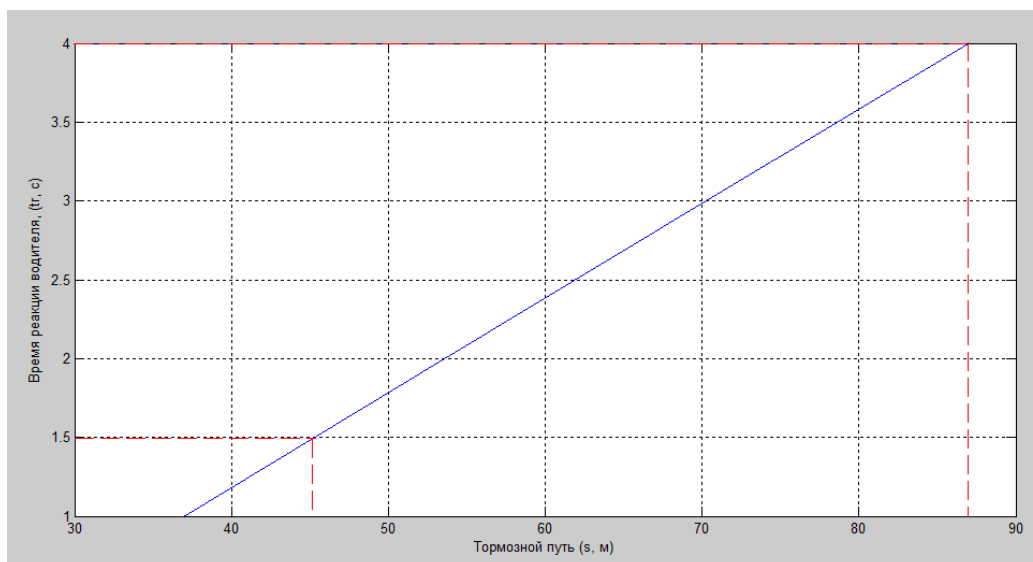


Рисунок 4 – Зависимость длины тормозного пути от времени реакции оператора БПА

В процессе моделирования тормозного пути от усталости оператора БПА был принят коэффициент сцепления колес автомобиля с дорожным покрытием, соответствующий начальным условиям движения – 0,7.

Согласно зависимости, представленной на рисунке 4, видно, что увеличение усталости оператора БПА (водителя) приводит к увеличению тормозного пути автомобиля. Если время реакции оператора составляет 1,5 с, тормозной путь составит 45 м, при реакции в 4 с – 87 м. Таким образом, тормозной путь увеличится на 93 %.

### 4. Влияние аварийного сочетания факторов «Состояние дороги» и «Усталость» на длину тормозного пути.

На рисунке 5 представлено изменение тормозного пути при нормальных условиях и в условиях скользкой дороги и средней степени усталости водителя.

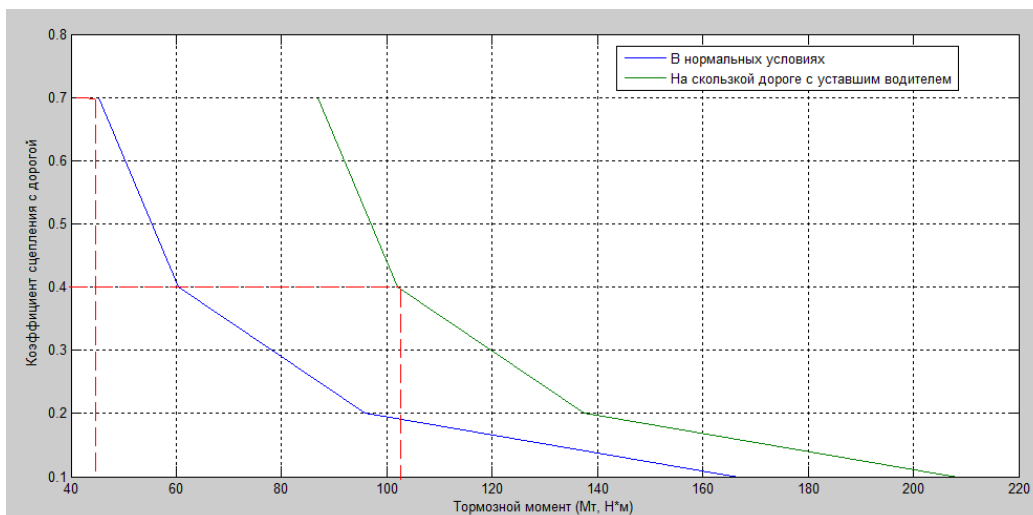


Рисунок 5 – Тормозной момент автомобиля при нормальных и аварийных условиях движения автомобиля

На сухом асфальте при своевременной реакции водителя тормозной путь составит 45 м, на мокром асфальте с водителем со средней степени усталости – 103 м. Во втором случае тормозной путь увеличивается в более чем 2 раза, что может являться угрозой дорожно-транспортного происшествия.

На основе данных двухфакторной матрицы рисков на стадии предаварийного движения БПА [6] и моделирования изменения условий торможения автомобиля в зависимости от состояния дорожного покрытия и психофизиологического состояния оператора можно оценить безопасность движения беспилотного автомобиля. База правил, используемая для оценки безопасности движения беспилотного автомобиля, представлена на рисунке 6.

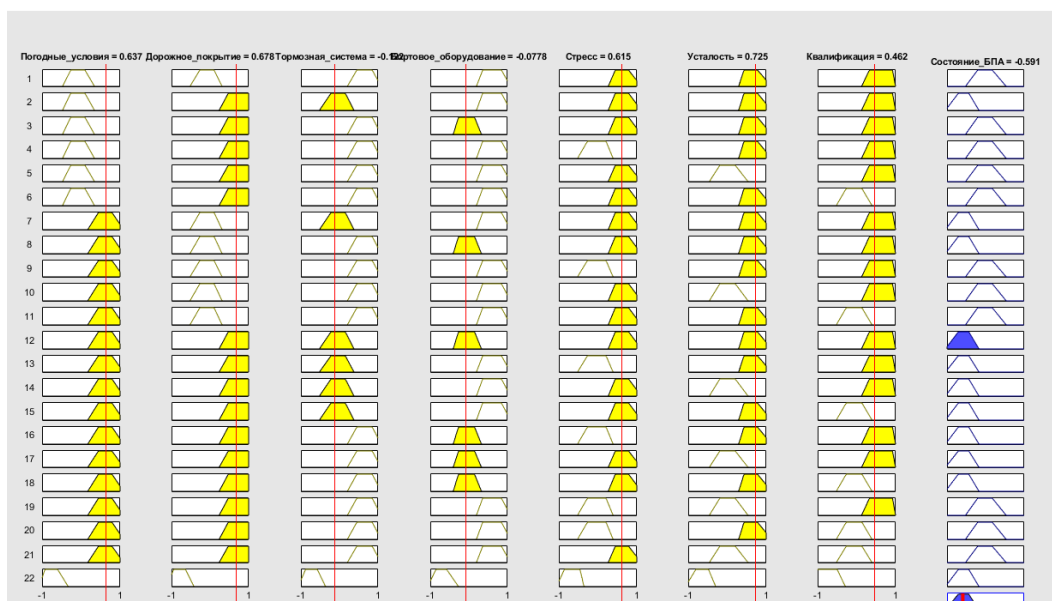


Рисунок 6 – Графическое изображение базы правил оценки безопасности движения БПА

Согласно представленной базе правил для рассматриваемых условий моделирования безопасности движения беспилотного автомобиля, оценка угрозы дорожно-транспортного происшествия соответствует аварийной ситуации  $-0,6$  (правило 12). Однако при исправном бортовом оборудовании и системы управления беспилотным автомобилем условия его движения являются безаварийными (правило 3)

Также в процессе моделирования условий движения автомобиля наряду с оценкой внешних воздействующих факторов и психофизиологического состояния оператора учитывалось изменение состояния бортового оборудования автомобиля. Результаты модулирования оценки безопасности движения автомобиля представлены на рисунке 7.

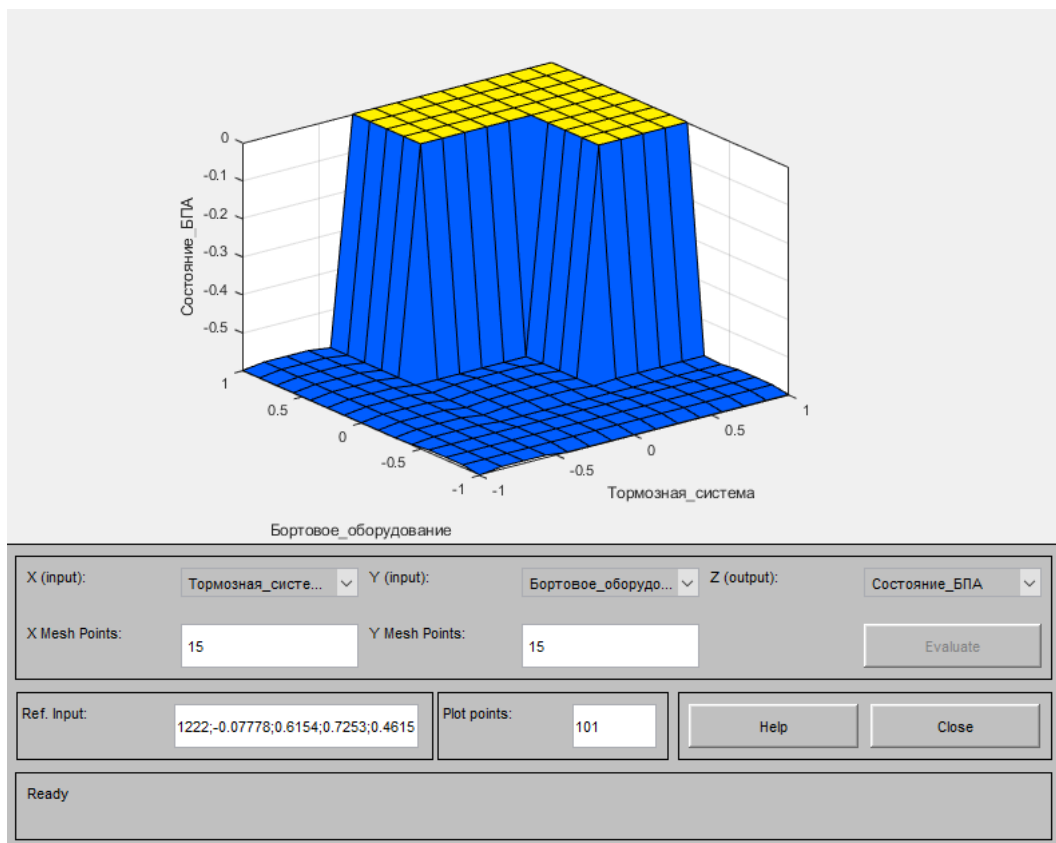


Рисунок 7 – Диаграмма состояния БПА при различных значениях технического состояния автомобиля

Из рисунка видно, что безопасность движения беспилотного автомобиля является безаварийной при значениях переменных, характеризующих техническое состояние объекта управления (состояние бортового оборудования и тормозной системы) не ниже 0,2. При этом ухудшение показателей внешних воздействующих факторов и психофизиологического состояния оператора БПА способно привести к аварийным условиям движения и угрозе дорожно-транспортного происшествия.

Таким образом, полученные результаты моделирования торможения беспилотного автомобиля показывают, как сочетание нескольких факторов в степени среднего риска приводят к аварийной ситуации, что требует разработки отдельного комплекса мер по корректировке сигнала управления движением автомобиля.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы проведена оценка изменения тормозного пути и тормозного момента движения автомобиля при сочетании усталости водителя и состоянии дорожного покрытия в условиях их предаварийного состояния, согласно которым ухудшение показателей дорожного покрытия и психофизиологического состояния оператора БПА приводит к значительному увеличению тормозного пути и снижению тормозного момента автомобиля. Отличительной особенностью модели оценки безопасности движения БПА является сочетание динамики движения автомобиля и базы данных оценки угрозы дорожно-транспортного происшествия с учетом внешних и внутренних воздействующих факторов, что позволяет определить источник и степень его влияния на угрозу аварийного происшествия.

Также полученные результаты исследования оценки безопасности движения беспилотного автомобиля при сочетании дорожного покрытия и усталости оператора БПА позволяют разработать и реализовать методы предотвращения угрозы дорожно-транспортного происшествия.

Предложенная в процессе выполнения модель оценки безопасности движения БПА может быть использована при проектировании систем управления безопасностью движения беспилотных автомобилей.

### Список источников

1. Святков, К. В. Система управления беспилотным автомобилем на основе мультимодального ввода с выявлением иерархии признаков / К. В. Святков, Д. П. Канан, С. В. Сухов // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 1 (67). – С. 52–59.

2. Немонтов, В. А. Аппаратное обеспечение беспилотного автомобиля как автономного мобильного робота / В. А. Немонтов // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств : материалы XXIII Международной научно-практической конференции, Владимир, 18–19 ноября 2021 года / под общ. ред. Ю. В. Баженова. – Владимир : Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2021. – С. 301–305.

3. Chengbo, Wang. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environment / Wang Chengbo, Zhang Xinyu, Cong Longze, Li Junjie // *Evolving Systems*. – 2019. – Vol. 10. – P. 649–658.

4. Катасев, А. С. Технология формирования нечетких правил в интеллектуальных системах диагностики состояния сложных объектов / А. С. Катасев // Аналитическая механика, устойчивость и управление : труды XI Международной Четаевской конференции. – 2017. – Т. 4. – С. 67–70.

5. Katasev, A. Fuzzy rules reduction in knowledge bases of decision support systems by objects state evaluation / A. Katasev, M. Dagaeva // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2021. – P. 113–123.

6. Дорошенко, А. В. Разработка алгоритма формирования базы знаний для определения аварийных сочетаний воздействующих факторов при эксплуатации беспилотного автомобиля / А. В. Дорошенко, А. А. Кулик // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2023. – № 4. – С. 48–56.

7. Кулик, А. А. Алгоритм формирования базы знаний выявления дорожно-транспортного происшествия при эксплуатации беспилотного автомобиля / А. А. Кулик, А. В. Дорошенко // Вестник НЦБЖД. – 2023. – № 4(58). – С. 26–32.

8. Дорошенко, А. В. Разработка алгоритма оценки угрозы аварийного происшествия при эксплуатации беспилотного автомобиля / А. В. Дорошенко, А. А. Кулик // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 11. – С. 62–67.

9. Тарасик, В. П. Методика моделирования экстренного торможения автомобиля / В. П. Тарасик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 4 (73). – С. 76–87.

10. Методические указания по выполнению практических занятий по расчёту дисковых и барабанно-колочных тормозов : методические указания / сост. А. В. Русинов. – Саратов : ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2016. – 30 с.

#### References

1. Svyatov, K. V., Kanin, D. P., Suhov, S. V. Multimodal Input-Based Control System for Unmanned Vehicles with Feature Hierarchy Discovery. *Automation of Management Processes*, 2022, no. 1 (67), pp. 52–59 (In Russ.).

2. Nemontov, V. A. Hardware of a driverless car as an autonomous mobile robot. *Current issues of vehicle operation : proceedings of the XXIII International scientific and practical conference, Vladimir, November 18–19, 2021*. Edited by Yu.V. Bazhenov. Vladimir: Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov, 2021, pp. 301–305. (In Russ.).

3. Chengbo, Wang. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environment. *Evolving Systems*, 2019, vol. 10, pp. 649–658.

4. Katasev, A. S. Technology of formation of fuzzy rules in intelligent systems of diagnostics of the state of complex objects. *Analytical mechanics, stability and control : proceedings of the XI International Chetaev Conference*, 2017, vol. 4, pp. 67–70 (In Russ.).

5. Katasev, A., Dagaeva, M. Fuzzy rules reduction in knowledge bases of decision support systems by objects state evaluation. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, pp. 113–123.

6. Doroshenko, A. V., Kulik, A. A. Development of an algorithm for forming a knowledge base to determine emergency combinations of influencing factors during the operation of an unmanned vehicle. *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2023, no. 4, pp. 48–56 (In Russ.).

7. Kulik, A. A., Doroshenko, A. V. Algorithm for forming a knowledge base for identifying a road traffic accident during the operation of an unmanned vehicle. *Herald of NCBZHD*, 2023, no. 4 (58), pp. 26–32 (In Russ.).

8. Doroshenko, A. V., Kulik, A. A. Development of an algorithm for assessing the risk of an accident during the operation of an unmanned vehicle. *Mathematical Methods in Technology and Engineering*, 2023, no. 11, pp. 62–67 (In Russ.).

9. Tarasik, V. P. Guidelines for modeling emergency braking of a car. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2021, no. 4 (73), pp. 76–87 (In Russ.).

10. *Guidelines for practical training on calculating disc and drum-shoe brakes : guidelines*. Compl. A. V. Rusinov. Saratov : FSBEI HE “Saratovskiy FAU”, 2016. 30 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 06.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 06.04.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 19.05.2025.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 676.052.484, 534.2

### ИСПЫТАНИЯ СПОСОБА КОРРЕКЦИИ ФАЗОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКЕ, ОСНОВАННОГО НА ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗАДЕРЖЕК

**Леонов Денис Владимирович**, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», 127051, Российская Федерация, г. Москва, ул. Петровка, 24, стр. 1; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Российская Федерация, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1; Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, 119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, 44, к. 2,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ORCID: 0000-0003-0916-6552, e-mail: strat89@mail.ru

В данной статье исследуется новый метод коррекции фазовых искажений в ультразвуковой визуализации. Аберрации корректируются с помощью полиномов Лежандра. Тестирование проводилось с использованием 64-элементного секторного датчика на калибровочном фантоме с виртуальными фазовыми аббераторами, вносимые ими искажения варьировались от 0,96 до 1,17 мм по полуширине автокорреляционной функции. Метод показал уменьшение среднеквадратичной ширины углового распределения интенсивности на 32 % и рост пиковой интенсивности в 2,15 раза в результате коррекции искажений. Таким образом, исследуемый метод успешно корректирует фазовые аберрации в ультразвуковой визуализации. Однако он требует наличия режима синтеза апертуры и доступа к исходным радиочастотным сигналам, что ограничивает его применимость в обычных сканерах.

**Ключевые слова:** аберрация, фазовая коррекция, фантом, синтетическая апертура, формирование пучка, фокусировка, медицинская визуализация

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках НИОКР «Разработка конструкции, технологии изготовления и производство фантомов для повышения информативности ультразвуковых диагностических исследований» (№ ЕГИСУ: 123031500001-4).

### EVALUATION OF THE ABERRATION CORRECTION METHOD IN ULTRASOUND IMAGING BASED ON POLYNOMIAL APPROXIMATION OF PHASE DELAYS

**Leonov Denis V.**, Moscow State Budgetary Healthcare Institution "Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Healthcare", bld. 124, Petrovka St., Moscow, 127051, Russian Federation; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", bld. 1, 14, Krasnokazarmennaya St., ext. ter., municipal district of Lefortovo, Moscow, 111250, Russian Federation; Federal State Institution "Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, room 2, 44 Vavilov St., Moscow, 119333, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, ORCID: 0000-0003-0916-6552, e-mail: strat89@mail.ru

This paper investigates a novel method of phase aberration correction in ultrasound imaging. The aberrations are corrected using Legendre polynomials. Testing was performed using a 64-element sector transducer on a quality control phantom with virtual phase aberrators, the distortions introduced by them varied from 0.96 to 1.17 mm in terms of half-width of the autocorrelation function. The method showed a 32 % reduction in the RMS width of the angular intensity distribution and a 2.15-fold increase in peak intensity as a result of distortion correction. Thus, the investigated method successfully corrects phase aberrations in ultrasound imaging. However, it requires an aperture synthesis mode and access to the original RF signals, which limits its applicability in conventional scanners.

**Keywords:** aberration, phase correction, phantom, synthetic aperture, beam formation, focusing, medical imaging

**Financial support:** this research was prepared as a part of the research and development effort titled "Development of design and manufacturing technology, and production of phantoms to capture more mineable data from ultrasound imaging", (USIS No. 123031500001-4).

Graphical annotation (Графическая аннотация)

Коррекция (correction)	Аберратор (aberrator)			$A_{max}$	$\alpha$
	#1	#2	#3		
Before					
After					

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие искажений в диагностическом изображении, вызванных аберрациями, является серьезным препятствием для повышения качества визуализации [1–3]. Они возникают тогда, когда ультразвуковая волна проходит через слои ткани, скорость звука в которых различна, при этом эти слои действуют подобно расфокусирующей линзе. Негативное влияние аберраций зависит от частоты, наиболее явно они проявляются на высоких частотах [4–7]. В медицинской практике их влияние велико при исследовании молочных желез с большим разрешением, визуализации плода у беременных с ожирением, а также при транскраниальном ультразвуковом исследовании [8–11].

Проблема аберраций может быть частично решена с помощью методов коррекции [12–16]. Для их применения необходимо оценить профили аберраций [17]. Существуют методы оценки, основанные на компьютерном моделировании и данных компьютерной томографии пациентов [18], на использовании специально изготовленных акустических линз [19], а также методы с использованием дополнительного источника ультразвукового сигнала [20]. Однако большинство известных методов сталкивается с двумя основными проблемами [1]: 1) в них применяется обращение волнового фронта, требующее наличия яркого источника-маяка в области интереса; 2) зачастую эти методы могут корректировать только изопланатические аберрации, что означает, что искажающий слой должен быть тонким и располагаться близко к апертуре.

Перечисленные ограничения могут быть преодолены с помощью недавно предложенного метода коррекции аберраций, основанного на использовании полиномов Лежандра [21]. Синтетический сфокусированный луч, используемый в качестве маяка в данном методе, может быть легко сгенерирован без каких-либо механических манипуляций с объектом. Расширение луча, которое несложно измерить, служит аналогом расширения сигнала маяка в методе обращения волнового фронта [22]. Расстояние от апертуры до искажающего слоя, а также толщина слоя не оказывают существенного влияния на оценку и коррекцию аберраций в исследуемом методе.

Новый метод тестировался на фантомах и искусственно изготовленных искажающих слоях, моделирующих черепную кость. Однако искажающие слои, используемые в исследовании [21], вносили как фазовые, так и амплитудные искажения. В настоящем исследовании проводится анализ только фазовых аберраций, для чего создаются виртуальные фазовые искажения при фокусировке, моделирующие те, что наблюдаются при исследовании мозга через кости черепа. Таким образом, целью исследования является испытание нового метода коррекции фазовых искажений, основанного на полиномиальной аппроксимации задержек и применимого для ультразвуковой медицинской визуализации.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### *Исследуемый метод коррекции аберраций*

Для коррекции аберраций применяется набор фокусирующих задержек, чтобы минимизировать ширину самой яркой области. Итерационный метод [21] оценивает неизвестные задержки путем первоначального добавления поправок при формировании луча, запуска процедуры обнаружения аберраций и сравнения ширины виртуального точечного источника с теоретическим значением. Если теоретическое значение меньше, добавляется новый набор поправок, и процесс повторяется. Каждый набор поправок описывается полиномиальными функциями Лежандра. Оценка фазовых задержек вычисляется с помощью весовых коэффициентов полиномов. Процесс коррекции начинается с полиномиальной функции второго порядка для выбранной фокальной позиции. Задержки от полиномиальной функции добавляются к задержкам, сгенерированным в блоке задержек фокусировки. После оценки каждого значения веса набор поправок, дающих наименьшую ширину, сохраняется для коррекции аберрации в выбранной области пространства.

### Используемое оборудование

Использовался ультразвуковой сканер «Сономед-500» («Спектрмед», Москва, Россия) с фазированной решеткой 3.0S19 (Medelcom, Литва, Вильнюс), содержащей 64 пьезокерамических элемента с шагом 290 мкм, поперечным размером 13 мм и полосой 1,6–3,7 МГц при –3 дБ. Сигналы подвергались незначительной предварительной обработке во внутреннем контуре сканера (усиление, полосовая фильтрация и преобразование Гильберта). «Сырые» радиочастотные сигналы захватывались и сохранялись в памяти непосредственно перед поступлением на вход формирователя луча. Во всех экспериментах съемка проводилась на несущей частоте 2 МГц.

В исследовании использовался калибровочный фантом (модель 539, ATS Laboratories, США) размером 23,4 x 20,5 x 9,5 см. Он состоял из полиуретана, характеризующегося скоростью звука 1,45 мм/мкс и коэффициентом затухания 0,5 дБ/см/МГц. Во всех экспериментах датчик был закреплен на штативе, чтобы минимизировать случайные колебания. Исследовались три мишени: близкая, средняя, боковая. Близкая и средняя точечные мишени располагались перед датчиком на глубине 50 мм и 100 мм соответственно. Боковая точечная мишень также располагалась на глубине 50 мм, но была смещена на 20 мм влево от ближней мишени. Источниками фазовых aberrаций служили 3 виртуальных искажающих слоя. Они характеризуются полушириной автокорреляционной функции, равной 1,14 мм, 0,96 мм и 1,67 мм, а также среднеквадратичным отклонением, равным 39 нс, 97 нс и 44 нс для aberrатора 1, 2 и 3 соответственно.

### Метрики оценки качества коррекции

Для оценки качества коррекции aberrаций использовались следующие параметры: а) пиковое значение  $A_{max} = \max\{A(\varphi)\}$ , где  $\max\{x\}$  – функция, возвращающая максимальное значение; б) средне-

квадратичная ширина углового распределения интенсивности  $\alpha = \sqrt{\frac{\int_{a+\varphi_0}^{b+\varphi_0} A(\varphi)(\varphi - \varphi_0)^2 d\varphi}{\int_{a+\varphi_0}^{b+\varphi_0} A(\varphi) d\varphi}}$ ; в) полу-

ширина  $FWHM = \int_{\lim_1}^{\lim_2} (\varphi - \varphi_0) d\varphi$ , где  $\lim_1$  и  $\lim_2$  представляют собой угловые положения распределения эхо-сигнала, когда он достигает половины своего максимального значения как слева, так и справа от пикового значения.

### Ход эксперимента

В эксперименте ультразвуковой прибор выполнял сканирование фантома фазированной решеткой в режиме синтезированной апертуры и формировал массив данных в памяти. Затем между поверхностью датчика и фантомом помещался искажающий слой. Процедура сканирования повторялась для каждого искажающего слоя. Полученные данные передавались в персональный компьютер для дальнейшей обработки и формирования сонограммы. Чтобы отделить фазовые искажения от амплитудных, искажающие задержки считывались из сигнала при помощи метода оценки профиля искажений [20] и накладывались на неискаженный массив. Для сравнения снимки областей интереса, содержащие цели для проверки качества ультразвукового изображения, строились до и после процедуры коррекции. Размеры области интереса составляли 30 градусов в ширину и 7 мм в длину. Для каждой сонограммы считывалось угловое распределение интенсивности эхо-сигнала и рассчитывались параметры, описанные в подразделе «Метрики оценки качества коррекции». Каждое измерение проводилось не менее пяти раз.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования иллюстрируются рисунком 1, где показаны данные до и после коррекции aberrаций, сопоставленные по ультразвуковым изображениям и трем метрикам оценки их качества [1, 21]. По рисунку видно, что в результате коррекции изображение точечной цели становится более четким. Если из-за искажений точка превращалась в малоконтрастную область, то в результате коррекции ее всегда удавалось восстановить.

Из представленных диаграмм видно, что предложенный метод повышает качество фокусировки, а именно: ведёт к увеличению пикового значения интенсивности и сужению ее распределения. Наилучший результат достигнут при использовании aberrатора 2 для ближней цели, при этом пик интенсивности вырос в 2,15 раза, а наибольшего сужения удалось достигнуть при использовании aberrатора 3 и средней цели, пик стал уже на 32 %.

Цель	Коррекция	Аберратор			A <sub>max</sub> , отн.ед.	α, град.	FWHM, град.
		#1	#2	#3			
Ближняя	Нет				132 185	2 1,7	1,9 1,6
	Есть				46 99 63 117	2 1,6 2,1 1,6 2 1,7	4,5 2,6 2,1 1,8
Средняя	Нет				210 310	2 1,6	2,1 1,7
	Есть				60 120 67 103	2 1,6 2,7 1,9 2,5 1,7	2,1 1,6 2,1 1,6 2 1,8
Боковая	Нет				205 250	2,1 1,5	2 1,8
	Есть				62 125 83 137	2,8 1,9 2,5 1,8	2,7 2,5 2 1,7

Рисунок 1 – В левой части рисунка представлены ультразвуковые изображения целей до и после коррекции при использовании различных искажающих слоев, а в правой части показаны численные показатели качества ультразвукового изображения до и после коррекции: пик (A<sub>max</sub>), среднеквадратичная ширина (α) и полуширина углового распределения интенсивности эхо-сигнала для случая без коррекции (■), с коррекцией по исследуемому методу (▨). Слева направо пары столбиков соответствуют аберратору 1, 2 и 3 соответственно. Данные приведены как среднее ± среднеквадратичное отклонение

В сравнении с исследованием [21] можно отметить, что в ходе проведения экспериментов с виртуальными искажающими слоями удалось достичь существенно лучших результатов для аберратора 2 при исследовании средней и боковой цели. То, что не все изображения оказались существенно лучше, может быть обусловлено значительной зависимостью результатов от выбора параметров коррекции, таких как угол и глубина для оценки профиля искажений.

Ранее независимая группа исследователей уже предлагала использовать полиномы для коррекции аберраций [23], но в их методе для получения обратной связи использовался магнитно-резонансный томограф, тогда как в исследуемом нами методе он не требуется, что упрощает техническую реализацию.

Для обеспечения воспроизводимости результатов и сравнения с другими методами предоставлен общедоступный набор ультразвуковых данных и программное обеспечение с открытым исходным кодом, реализующее предложенный метод [21]. Исследователи могут получить доступ к данным и программному обеспечению, чтобы оценить характеристики метода и изучить его применение в медицинской визуализации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована эффективность использования полиномов Лежандра для коррекции фазовых аберраций в ультразвуковой визуализации с синтезированной апертурой. Эксперименты с использованием калибровочного фантома и виртуальных искажающих слоев показали уменьшение среднеквадратичной ширины углового распределения интенсивности на 32 % и рост пиковой интенсивности в 2,15 раза на частоте 2 МГц. Метод не требует дополнительных томографических исследований и является неинвазивным, что позволяет использовать его при диагностической визуализации. Сейчас система ограничена работой в серошкальном режиме, в дальнейшем планируем использовать наш опыт обработки доплеровских сигналов [24, 25] для коррекции аберраций при исследовании кровотока. Данная статья подготовлена при поддержке Департамента здравоохранения города Москвы (№ ЕГИСУ: 123031500001-4).

### Список литературы

1. Ali, R. Aberration correction in diagnostic ultrasound: A review of the prior field and current directions / R. Ali, T. Brevett, L. Zhuang, H. Bendjador, A. S. Podkowa, S. S. Hsieh, W. Simson, S. J. Sanabria, C. D. Herickhoff, J. J. Dahl // Z. Med. Phys. – 2023. – Vol. 33. – P. 267–291.
2. Ali, R. Distributed aberration correction techniques based on tomographic sound speed estimates / R. Ali, T. Brevett, D. Hyun, L. L. Brickson, J. J. Dahl // IEEE Trans UFFC. – 2022. – Vol. 69. – P. 1714–1726.

3. Kyriakou, A. A review of numerical and experimental compensation techniques for skull-induced phase aberrations in transcranial focused ultrasound / A. Kyriakou, E. Neufeld, B. Werner, M. M. Paulides, G. Szekely, N. Kuster // *Int. J. Hyp.* – 2014. – Vol. 30. – P. 36–46.
4. Bureau, F. Three-dimensional ultrasound matrix imaging / F. Bureau, J. Robin, A. Le Ber, W. Lambert, M. Fink, A. Aubry // *Nature Communications.* – 2023. – Vol. 14. – P. 6793.
5. Shen, F. An efficient method for transcranial ultrasound focus correction based on the coupling of boundary integrals and finite elements / F. Shen, F. Fan, F. Li, L. Wang, R. Wang, Y. Wang, T. Liu, C. Wei, H. Niu // *Ultrasonics.* – 2024. – Vol. 137. – P. 107181.
6. Hughes, A. Current and emerging systems for focused ultrasound-mediated blood-brain barrier opening / A. Hughes, D. S. Khan, R. Alkins // *Ultrasound in Medicine & Biology.* – 2023. – Vol. 49. – P. 1479–1490.
7. Ali, R. Sound speed estimation for distributed aberration correction in laterally varying media / R. Ali, T. M. Mitcham, M. Singh, M. M. Doyley, R. R. Bouchard, J. J. Dahl, N. Duric // *IEEE transactions on computational imaging.* – 2023. – Vol. 9. – P. 367–382.
8. Van Hal, V. H. An aberration correction approach for single and dual aperture ultrasound imaging of the abdomen / V. H. Van Hal, J. W. Muller, M. R. Van Sambeek, R. G. Lopata, H. M. Schwab // *Ultrasonics.* – 2023. – Vol. 131. – P. 106936.
9. Yeats, E. Aberration correction in abdominal histotripsy / E. Yeats, T. L. Hall // *International Journal of Hyperthermia.* – 2023. – Vol. 40. – P. 2266594.
10. Koike, T. Deep learning for hetero-homo conversion in channel-domain for phase aberration correction in ultrasound imaging / T. Koike, N. Tomii, Y. Watanabe, T. Azuma, S. Takagi // *Ultrasonics.* – 2023. – Vol. 129. – P. 106890.
11. Lan Z., Rong C., Han C., Qu X., Li J., Lin H. Coherence-based phase aberration correction and beamforming for ring-array ultrasound imaging / *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2024. Vol. 220. P. 111651.
12. Li, B. Ray theory-based compounded plane wave ultrasound imaging for aberration corrected transcranial imaging: Phantom experiments and simulations / B. Li, L. Xie, C. Liu, K. Xu, Y. Zhan, D. Ta // *Ultrasonics.* – 2023. – Vol. 135. – P. 107124.
13. Asif, M. S. Fast Marching based Tissue Adaptive Delay Estimation for Aberration Corrected Delay and Sum Beamforming in Ultrasound Imaging / M. S. Asif, G. Malamal, A. N. Madhavanunni, V. Melapudi, V. Rahul, A. Patil, R. Langoju, M. R. Panicker // *45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society.* – 2023. – P. 1–4.
14. Mozaffarzadeh, M. Comparison of phase-screen and geometry-based phase aberration correction techniques for real-time transcranial ultrasound imaging / M. Mozaffarzadeh, M. D. Verweij, N. de Jong, G. Renaud // *Applied Sciences.* – 2022. – Vol. 12. – P. 10183.
15. Robin, J. In vivo adaptive focusing for clinical contrast-enhanced transcranial ultrasound imaging in human / J. Robin, C. Demené, B. Heiles, V. Blanvillain, L. Puke, F. Perren, M. Tanter // *Physics in Medicine & Biology.* – 2023. – Vol. 68. – P. 025019.
16. Fiorentini, S. Analysis of Aberration Effects on Flow Imaging and Quantification in Echocardiography / S. Fiorentini, S. E. Måsøy, J. Avdal // *IEEE Open Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* – 2023. – Vol. 3. – P. 194–202.
17. Leonov, D. V. Approach to Detecting Aberrations in Transcranial Ultrasound Imaging / D. V. Leonov, N. S. Kulberg, T. V. Yakovleva, P. D. Solovyova // *Acoust. Phys.* – 2022. – Vol. 68. – P. 175–186.
18. Chupova, D. D. Compensation for Aberrations When Focusing Ultrasound Through the Skull Based on CT and MRI Data / D. D. Chupova, P. B. Rosnitskiy, O. V. Solontsov, L. R. Gavrilov, V. E. Sititsyn, E. A. Mershina, O. A. Sapozhnikov V. A. Khokhlova // *Acoust. Phys.* – 2024. – Vol. 70. – P. 288–298.
19. Daniel, M. Multifrequency transcranial ultrasound holography with acoustic lenses / M. Daniel, D. Attali, T. Tiennot, M. Tanter, J. F. Aubry // *Physical Review Applied.* – 2024. – Vol. 21. – P. 014011.
20. Osipov, L. V. Transcranial Beam Steering with Aberration Correction / L. V. Osipov, N. S. Kulberg, S. V. Skosyrev, D. V. Leonov, G. K. Grigorev, A. V. Vladzimirskiy, S. P. Morozov // *Biomedical Engineering.* – 2021. – Vol. 54. – P. 438–442.
21. Leonov, D. Aberration correction by polynomial approximation for synthetic aperture ultrasound imaging / D. Leonov, N. Kulberg, T. Yakovleva // *Med. Phys.* – 2024. – Vol. 51. – P. 3292–3308.
22. Kook, G. Multifocal skull-compensated transcranial focused ultrasound system for neuromodulation applications based on acoustic holography / G. Kook, Y. Jo, C. Oh, X. Liang, J. Kim, S. M. Lee, S. Kim, J. W. Choi, H. J. Lee // *Microsyst. Nanoeng.* – 2023. – Vol. 9. – P. 45.
23. Larrat, B. MR-guided adaptive focusing of ultrasound / B. Larrat, M. Pernot, G. Montaldo, M. Fink, M. Tanter // *IEEE Trans UFFC.* – 2010. – Vol. 57. – P. 734–1737.
24. Leonov, D. V. Comparison of Filtering Techniques in Ultrasound Color Flow Imaging / D. V. Leonov, N. S. Kulberg, V. A. Podmoskovnaya, L. S. Ivanova, A. S. Shipaeva, A. V. Vladzimirskiy, S. P. Morozov *Biomedical Engineering.* – 2019. – Vol. 53. – P. 97–101.
25. Leonov, D. V. Clutter Filtering for Diagnostic Ultrasound Color Flow Imaging / D. V. Leonov, N. S. Kulberg, V. A. Podmoskovnaya, L. S. Ivanova, A. S. Shipaeva, A. V. Vladzimirskiy, S. P. Morozov // *Biomedical Engineering.* – 2019. – Vol. 53. – P. 217–221.

#### References

1. Ali, R., Brevett, T., Zhuang, L., Bendjador, H., Podkowa, A. S., Hsieh, S. S., Simson, W., Sanabria, S. J., Herickhoff, C. D., Dahl, J. J. Aberration correction in diagnostic ultrasound: A review of the prior field and current directions. *Z. Med. Phys.*, 2023, vol. 33, pp. 267–291.

2. Ali, R., Brevett, T., Hyun, D., Brickson, L. L., Dahl, J. J. Distributed aberration correction techniques based on tomographic sound speed estimates. *IEEE Trans. UFFC*, 2022, vol. 69, pp. 1714–1726.
3. Kyriakou A., Neufeld E., Werner B., Paulides M.M., Szekely G., Kuster N. A review of numerical and experimental compensation techniques for skull-induced phase aberrations in transcranial focused ultrasound. *Int. J. Hyp.*, 2014, vol. 30, pp. 36–46.
4. Bureau, F., Robin, J., Le Ber, A., Lambert, W., Fink, M., Aubry, A. Three-dimensional ultrasound matrix imaging. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, p. 6793.
5. Shen, F., Fan, F., Li, F., Wang, L., Wang, R., Wang, Y., Liu, T., Wei, C., Niu, H. An efficient method for transcranial ultrasound focus correction based on the coupling of boundary integrals and finite elements. *Ultrasonics*, 2024, vol. 137, p. 107181.
6. Hughes, A., Khan, D. S., Alkins, R. Current and emerging systems for focused ultrasound-mediated blood-brain barrier opening. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2023, vol. 49, pp. 1479–1490.
7. Ali, R., Mitcham, T. M., Singh, M., Doyley, M. M., Bouchard R. R., Dahl J. J., Duric N. Sound speed estimation for distributed aberration correction in laterally varying media. *IEEE transactions on computational imaging*, 2023, vol. 9, pp. 367–382.
8. Van Hal, V. H., Muller, J. W., Van Sambeek, M. R., Lopata, R. G., Schwab, H.M. An aberration correction approach for single and dual aperture ultrasound imaging of the abdomen. *Ultrasonics*, 2023. vol. 131, p. 106936.
9. Yeats, E., Hall, T. L. Aberration correction in abdominal histotripsy. *International Journal of Hyperthermia*, 2023, vol. 40, p. 2266594.
10. Koike, T., Tomii, N., Watanabe, Y., Azuma, T., Takagi, S. Deep learning for hetero-homo conversion in channel-domain for phase aberration correction in ultrasound imaging. *Ultrasonics*, 2023, vol. 129, p. 106890.
11. Lan, Z., Rong, C., Han, C., Qu, X., Li, J., Lin, H. Coherence-based phase aberration correction and beamforming for ring-array ultrasound imaging. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, vol. 220, p. 111651.
12. Li, B., Xie, L., Liu, C., Xu, K., Zhan, Y., Ta, D. Ray theory-based compounded plane wave ultrasound imaging for aberration corrected transcranial imaging: Phantom experiments and simulations. *Ultrasonics*, 2023, vol. 135, p. 107124.
13. Asif, M. S., Malamal, G., Madhavanunni, A. N., Melapudi, V., Rahul, V., Patil, A., Langoju, R., Panicker, M. R. Fast Marching based Tissue Adaptive Delay Estimation for Aberration Corrected Delay and Sum Beamforming in Ultrasound Imaging. *45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2023, pp. 1–4.
14. Mozaffarzadeh, M., Verweij, M. D., de Jong, N., Renaud, G. Comparison of phase-screen and geometry-based phase aberration correction techniques for real-time transcranial ultrasound imaging. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, p. 10183.
15. Robin, J., Demené, C., Heiles, B., Blanvillain, V., Puke, L., Perren, F., Tanter, M. In vivo adaptive focusing for clinical contrast-enhanced transcranial ultrasound imaging in human. *Physics in Medicine & Biology*, 2023, vol. 68, p. 025019.
16. Fiorentini, S., Måsøy, S. E., Avdal, J. Analysis of Aberration Effects on Flow Imaging and Quantification in Echocardiography. *IEEE Open Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2023, vol. 3, pp. 194–202.
17. Leonov, D. V., Kulberg, N. S., Yakovleva, T. V., Solovyova, P. D. Approach to Detecting Aberrations in Transcranial Ultrasound Imaging. *Acoust. Phys.*, 2022, vol. 68, pp. 175–186.
18. Chupova, D. D., Rosnitskiy, P. B., Solontsov, O. V., Gavrilov, L. R., Sititsyn, V. E., Mershina, E. A., Sapozhnikov, O. A., Khokhlova, V. A. Compensation for Aberrations When Focusing Ultrasound Through the Skull Based on CT and MRI Data. *Acoust. Phys.*, 2024, vol. 70, pp. 288–298.
19. Daniel, M., Attali, D., Tiennot, T., Tanter, M., Aubry, J. F. Multifrequency transcranial ultrasound holography with acoustic lenses. *Physical Review Applied*, 2024, vol. 21, p. 014011.
20. Osipov, L. V., Kulberg, N. S., Skosyrev, S. V., Leonov, D. V., Grigorev, G. K., Vladzimirskiy, A. V., Morozov, S. P. Transcranial Beam Steering with Aberration Correction. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 54, pp. 438–442.
21. Leonov, D., Kulberg, N., Yakovleva, T. Aberration correction by polynomial approximation for synthetic aperture ultrasound imaging. *Med. Phys.* 2024. vol. 51. pp. 3292–3308.
22. Kook G., Jo Y., Oh C., Liang X., Kim J., Lee S.M., Kim S., Choi J.W., Lee H.J. Multifocal skull-compensated transcranial focused ultrasound system for neuromodulation applications based on acoustic holography. *Microsyst. Nanoeng.* 2023. vol. 9. pp. 45.
23. Larrat, B., Pernot, M., Montaldo, G., Fink, M., Tanter, M. MR-guided adaptive focusing of ultrasound. *IEEE Trans UFFC*, 2010, vol. 57, pp. 734–1737.
24. Leonov, D. V., Kulberg, N. S., Podmoskovnaya, V. A., Ivanova, L. S., Shipaeva, A. S., Vladzimirskiy, A. V., Morozov, S. P. Comparison of Filtering Techniques in Ultrasound Color Flow Imaging. *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 53, pp. 97–101.
25. Leonov, D. V., Kulberg, N. S., Podmoskovnaya, V. A., Ivanova, L. S., Shipaeva, A. S., Vladzimirskiy, A. V., Morozov, S. P. Clutter Filtering for Diagnostic Ultrasound Color Flow Imaging. *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 53, pp. 217–221.

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 25.04.2025.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 25.04.2025; accepted for publication 25.04.2025.

УДК 676.052.484, 534.2

### ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА НЕСФОКУСИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ИЗ ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИБОРА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ВИСОЧНЫЕ КОСТИ

**Власова Ольга Викторовна**, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», 127051, Российская Федерация, г. Москва, ул. Петровка, 24, стр. 1,

младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0003-3364-7364, e-mail: VlasovaOV10 @zdrav.mos.ru

**Леонов Денис Владимирович**, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», 127051, Российская Федерация, г. Москва, ул. Петровка, 24, стр. 1; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Российская Федерация, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1; Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук», 119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, 44, к. 2,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ORCID: 0000-0003-0916-6552, e-mail: strat89@mail.ru

**Петрайкин Алексей Владимирович**, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», 127051, Российская Федерация, г. Москва, ул. Петровка, 24, стр. 1,

доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, ORCID: 0000-0003-1694-4682, e-mail: PetrayajkinAV@zdrav.mos.ru

**Омелянская Ольга Васильевна**, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», 127051, Российская Федерация, г. Москва, ул. Петровка, 24, стр. 1,

руководитель по управлению подразделениями Дирекции наука, ORCID: 0000-0002-0245-4431, e-mail: OmelyanskayaOV@zdrav.mos.ru

**Васильев Юрий Александрович**, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», 127051, Российская Федерация, г. Москва, ул. Петровка, 24, стр. 1,

кандидат медицинских наук, директор, ORCID: 0000-0002-5283-5961, e-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru

При транскраниальной ультразвуковой диагностике остро стоит проблема аберрации сигналов, вызванных прохождением волн через кости черепа. Эти аберрации ухудшают качество изображений, что может привести к ошибкам в диагностике и лечении. Для разработки и тестирования алгоритмов коррекции таких искажений необходимы наборы данных, полученных в условиях, близких к клиническим. В исследовании использовались образцы *ex vivo* височных костей человека, состояние которых было оценено с помощью компьютерной томографии. Ультразвуковые сигналы регистрировались с помощью прибора «Сономед-500» с датчиком с фазированной решеткой. Данные из тракта предварительной обработки сканера сохранялись на внутреннем накопителе в бинарном формате. Итоговая база данных содержит 9 наборов несфокусированных ультразвуковых сигналов с искажениями, полученными прохождением волны через височные кости. Также файл содержит информацию о параметрах сканирования. Средняя плотность костной ткани, измеренная с помощью КТ, составила  $1830 \pm 661$  HU при 120 кВ и  $1720 \pm 532$  HU при 80 кВ, что соответствует здоровым височным костям. Созданная база данных предоставляет исследователям уникальную возможность тестировать и разрабатывать алгоритмы коррекции аберраций в ультразвуковой диагностике, что может значительно улучшить качество визуализации и точность диагностики в клинических условиях.

**Ключевые слова:** транскраниальная ультразвуковая диагностика, аберрации, несфокусированный ультразвуковой сигнал, *ex vivo* височные кости человека, искажения

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках НИОКР «Разработка конструкции, технологии изготовления и производство фантомов для повышения информативности ультразвуковых диагностических исследований» (№ ЕГИСУ: 123031500001-4).

GENERATION OF A SET OF UNFOCUSED SIGNALS FROM THE ULTRASOUND DEVICE PATH OBTAINED WHEN THE WAVE PASSES THROUGH THE TEMPORAL BONES

**Vlasova Olga V.**, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24, bldg. 1, Petrovka St., Moscow, 127051, Russian Federation, Junior Researcher, ORCID: 0000-0003-3364-7364, e-mail: VlasovaOV10@zdrav.mos.ru

**Leonov Denis V.**, State Budgetary Healthcare Institution of the city of Moscow "Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Department of Healthcare of the City of Moscow", bld. 1, 24, Petrovka St., Moscow, 127051, Russian Federation; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", bld. 1, 14, Krasnokazarmennaya St., ext. ter. Lefortovo municipal district, Moscow, 111250, Russian Federation; Federal State Institution "Federal Research Center for Informatics and Management of the Russian Academy of Sciences", room 2, 44, Vavilov St., Moscow, 119333, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, ORCID: 0000-0003-0916-6552, e-mail: strat89@mail.ru,

**Petraikin Alexey V.**, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka st, bldg. 1, Moscow, 127051, Russian Federation,

Doct. Sci. (Medicine), Head Researcher, ORCID: 0000-0003-1694-4682, e-mail: PetryajkinAV@zdrav.mos.ru,

**Omelyanskaya Olga V.**, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka st, bldg. 1, Moscow, Russia, 127051,

Head of the Directorate of Science for Management Units, ORCID: 0000-0002-0245-4431, e-mail: OmelyanskayaOV@zdrav.mos.ru,

**Vasilev Yuriy A.**, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, bldg. 1, 24, Petrovka St., Moscow, 127051, Russian Federation,

Cand. Sci. (Medicine), CEO, ORCID: 0000-0002-5283-5961, e-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru

Ultrasound diagnosis, especially transcranial diagnostics, encounters challenges due to signal distortions from the transmission of ultrasound waves through bone structures, particularly the temporal bones. These aberrations reduce image quality, which can lead to errors in diagnostics and treatment. To develop and test algorithms for correcting such distortions, reliable data obtained under near clinical conditions are needed. The study used *ex vivo* human temporal bones, the condition of which was assessed using computed tomography. Ultrasound signals were recorded using a Sonomed-500 device with a phased array transducer. Data from the scanner preprocessing path were stored on the internal storage device in binary format. The final database contains 9 sets of unfocused ultrasound signals with distortions obtained by the wave passing through the temporal bones. The file also contains information about the scan parameters. Mean bone density measured by CT was  $1830 \pm 661$  HU at 120 kV and  $1720 \pm 532$  HU at 80 kV, consistent with healthy temporal bones. The created database provides researchers with a unique opportunity to test and develop algorithms for aberration correction in ultrasound diagnostics, which can significantly improve imaging quality and diagnostic accuracy in complex clinical settings.

**Keywords:** transcranial ultrasound diagnostics; aberrations; unfocused ultrasound signal; *ex vivo* human temporal bone; distortions

**Financial support:** this research was prepared as a part of the research and development effort titled "Development of design and manufacturing technology, and production of phantoms to capture more mineable data from ultrasound imaging", (USIS No. 123031500001-4).

Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы особое внимание уделяется транскраниальным исследованиям, которые помогают в оценке состояния сосудов головного мозга и выявлении различных неврологических заболеваний [1–3]. Транскраниальная ультразвуковая диагностика позволяет визуализировать мозговые структуры и оценивать кровоток, что делает ее важным методом для выявления инсультов, аневризм и других сосудистых патологий [4]. Однако транскраниальная визуализация подвержена искажениям, возникающим из-за особенностей прохождения ультразвуковых волн через черепные кости [5–7]. Эти искажения, называемые абберациями, могут привести к значительному ухудшению в получаемых изображениях, что затрудняет интерпретацию результатов и может негативно сказываться на точности диагностических выводов [8].

Для решения этих проблем необходимы эффективные методы тестирования и настройки алгоритмов обнаружения и коррекции аббераций [9–12]. Важным шагом на этом пути является создание базы данных «сырых» ультразвуковых сигналов, полученных в условиях, максимально приближенных к клиническим. Известны базы данных ультразвуковых сигналов, пригодных для исследований в области цветового доплеровского картирования [13] и анализа изображений В-режима [14], однако данных, полученных при исследовании через кости черепа, в литературе не представлено.

Целью настоящего исследования является подготовка набора несфокусированных ультразвуковых сигналов с абберациями *ex vivo* височных костей человека. В нем представлены данные, снятые с ультразвукового фантома, на который наложены аббераторы в виде височных костей. Такой подход позволяет имитировать реальные условия транскраниальной диагностики и создавать достоверные тестовые данные.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Оборудование для ультразвукового исследования

Основным компонентом экспериментальной установки был прибор «Сономед-500» («Спектротмед», Москва, Россия) с датчиком с фазированной решеткой 3.0S19 (Medelcom, Литва, Вильнюс), который включает в себя 64 пьезокерамических элемента с шагом 290 мкм, поперечным размером 13 мм и частотным диапазоном 1,6–3,7 МГц при –3 дБ. Данный УЗИ-аппарат способен передавать «сырые» сигналы с синтезированной апертурой в В-режиме на персональный компьютер. Параметры излучения соответствовали рекомендациям FDA-протоколов для диагностического ультразвука, т. е.  $< 720 \text{ мВт/см}^2 \text{ Ispta.3}$  и  $< 1,9 \text{ MI}$ .

### Принцип получения данных

Схема забора данных состоит из датчика, аналогового приемного модуля и вычислительной системы (рис. 1). Внутри модуля сигналы подвергаются незначительной предварительной обработке. На входе модуля присутствует малошумящий усилитель (МШУ) и блок частотно-временной автоматической регулировки усиления (АРУ), предназначенный для уменьшения динамического диапазона данных [15]. В контуре приемного модуля также присутствует программируемый усилитель (ПУ), который позволяет управлять коэффициентом усиления с помощью регуляторов на панели устройства. После этой обработки сигналы проходят через аналого-цифровой преобразователь (АЦП). На его выходе цифровые сигналы подвергаются преобразованию Гильберта (ПГ), в ходе которого формируется квадратурная составляющая для каждого сигнала. Квадратурная составляющая необходима для преобразования сигнала к комплексной форме и оценки фазы и амплитуды сигнала в ходе последующей обработки. После всех преобразований сигналы сохраняются в памяти блока вычислительной системы.

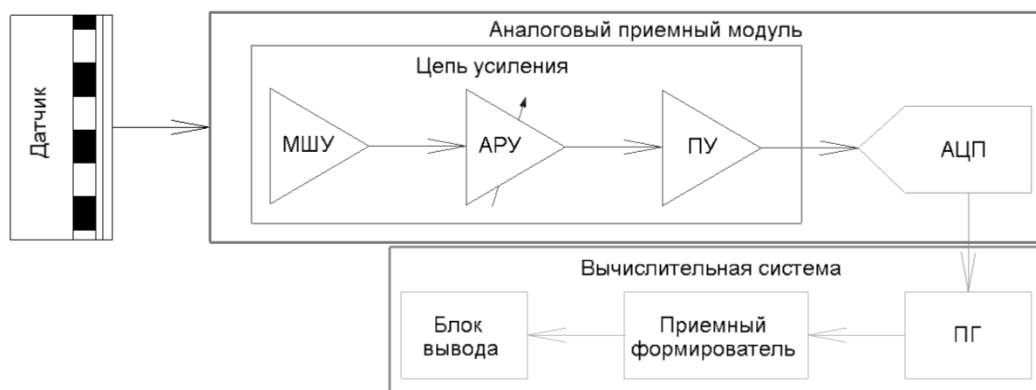


Рисунок 1 – Схема захвата данных

Во всех экспериментах сканирование проводилось на несущей частоте 2 МГц. Дискретная частота при получении данных составляла 40 МГц, а после децимации «сырые» данные, используемые в эксперименте, имели частоту 10 МГц.

В эксперименте ультразвуковой прибор выполнял сканирование датчиком с фазированной решеткой в режиме синтезированной апертуры. Изначально были записаны данные без искажающих слоев, после чего между датчиком и фантомом размещалась височная кость и сканирование повторялось. Данная процедура была проведена для каждого аббератора. Полученные данные передавались на персональный компьютер, где и сохранялись для формирования базы данных.

*Исследуемые объекты и условия наблюдения*

В исследовании применялся многоцелевой фантом (модель 539, ATS Laboratories, США) (рис. 2). Во всех экспериментах датчик был закреплен на штативе для минимизации случайных колебаний. Исследовались два типа целей в фантоме: анэхогенные области диаметром 2, 3, 4, 6, 8 мм, расположенные на глубине 10–170 мм (позиция 1 датчика), и точечные цели диаметром 0,12 мм, расположенные на глубине 10–180 мм (позиция 2 датчика).

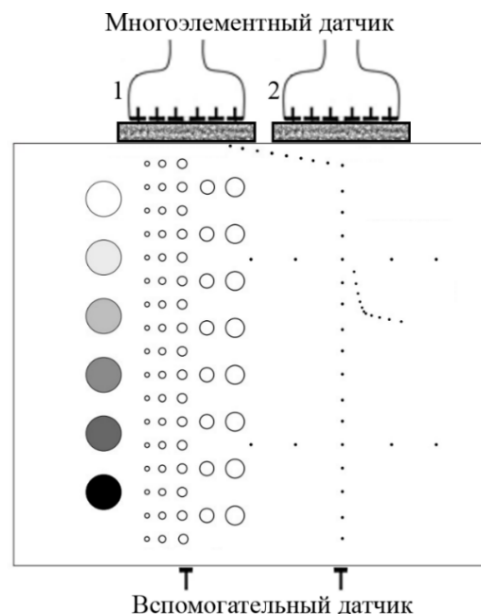


Рисунок 2 – Расположение датчиков и источников относительно многоцелевого фантома для экспериментального тестирования. Цифрами 1 и 2 обозначены позиции датчика

Образцы костной ткани в виде *ex vivo* височных костей человека, используемые в исследовании, соответствовали нормальным анатомическим и физиологическим характеристикам данной области. Это обеспечило достоверность полученных данных и их применимость для дальнейших исследований. Состояние костной ткани было оценено с помощью компьютерной томографии. Это условие гарантировало, что исследуемые образцы будут представлять собой нормальную, здоровую костную ткань, что является критически важным для получения результатов.

Перед сканированием каждая кость была очищена и подготовлена, чтобы минимизировать влияние окружающих тканей на результаты. Сканирование выполнялось на компьютерном томографе GE Revolution EVO при силе тока 150 мА, напряжении 120 кВ, а также при силе тока 200 мА, напряжении 80 кВ. Толщина среза во всех исследованиях была равна 0,625 мм. Полученные данные обрабатывались с использованием программы для визуализации и анализа томограмм Radiant Dicom Viewer v. 2022.1.1, что позволило извлечь информацию о плотности и морфометрических характеристиках костной ткани. Рентгеновская плотность костей, измеренная в единицах шкалы Хаунсфилда (HU), способствовала оценке параметров распространения ультразвуковой волны, что было критически важно для интерпретации результатов исследования.

Каждый образец *ex vivo* височной кости человека демонстрировал искажения на ультразвуковых изображениях, что позволило исследовать влияние аббераций на радиочастотные сигналы. Исследование проводилось в период с 03-го по 21-е февраля 2025 г. Абберации вносились с помощью 3-ех *ex vivo* височных костей человека, полученных на кафедре нормальной физиологии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» и ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства

здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) (рис. 3). Также в ходе исследования использовался фантом собственной разработки [16]. В данном фантоме в качестве источников используются стальные булавки диаметром 0,5 мм и длиной 25 мм (рис. 4).



Рисунок 3 – Изображение *ex vivo* височной кости, используемой в качестве аббератора



Рисунок 4 – Расположение датчика с фазированной решеткой относительно фантома головы

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенной компьютерной томографии *ex vivo* височных костей человека были получены трехмерные изображения костной ткани, что позволило оценить ее анатомические и структурные характеристики. Также был выполнен анализ плотности костной ткани.

Средние значения рентгеновской плотности костной ткани, полученные в результате компьютерной томографии, составили  $1830 \pm 661$  HU при режиме 120 кВ и 150 мА и  $1720 \pm 532$  HU при режиме 80 кВ и 200 мА, что сопоставимо с литературными данными по плотности для здоровых височных костей, которые находятся в диапазоне  $2245 \pm 854$  HU [17, 18]. Все исследуемые образцы показали нормальную плотность костной ткани, что соответствует здоровому состоянию, необходимому для надежного дальнейшего анализа радиочастотных сигналов и подтвердили репрезентативность исследуемых образцов, соответствующих критериям включения.

Созданы и размещены в открытом доступе записи нефокусированных ультразвуковых сигналов, содержащих искажения, полученные с помощью аббераторов в виде *ex vivo* височных костей человека [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Структура базы данных иллюстрируется рисунком **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, она включает в себя 9 наборов, различающихся по объекту исследования.

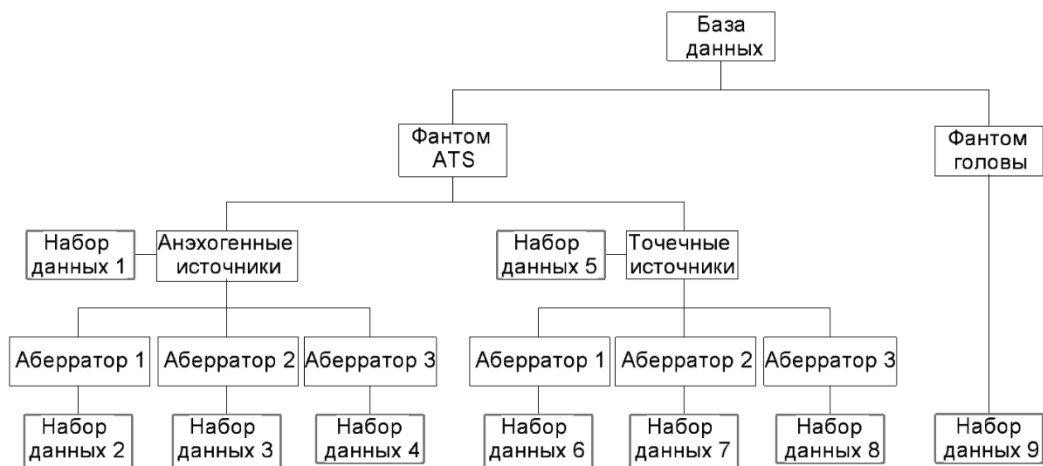


Рисунок 5 – Содержимое базы данных

Радиочастотные сигналы хранятся в бинарной форме в файле формата \*.raw. В нем записаны комплексные данные для создания кадра в В-режиме: по горизонтальной оси S откладывается глубина сканирования, по вертикальной оси A отображается величина сигнала, измеряемая в условных единицах, полученных со входа формирователя луча после прохождения предварительной обработки, заключающейся в усилении, оцифровке и преобразовании Гильберта (рис. 6а). Действительная и мнимая часть каждого отсчета принятого сигнала записана в формате «32 bit littleendian (LE) complex integer». Запись проводится таким образом, что в первую строку файла записываются отсчеты сигналов, принятых в результате излучения первым элементом антенной решетки и приема этим же элементом отраженного сигнала. Во вторую строку файла записываются сигналы, излученные первым элементом и принятые вторым элементом и т. д. В N-ую строку записываются отсчеты сигналов, принятых в результате излучения вторым элементом антенной решетки и приема отраженного сигнала первым элементом. В N+1-ую строку файла записываются сигналы, принятые вторым элементом и т. д. Количество элементов в каждой строке равно числу отсчетов по глубине, заданному параметром SamplesPerLine в таблице **Ошибка! Источник ссылки не найден.**. Если такую строку считать и отобразить ее модуль, то получится график, пример которого показан на рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден.** б. В ультразвуковой визуализации подобные графики принято называть A-линиями. Из множества A-линий, если амплитуду закодировать яркостью в палитре из оттенков серого, формируется двумерное серосхальное изображение.

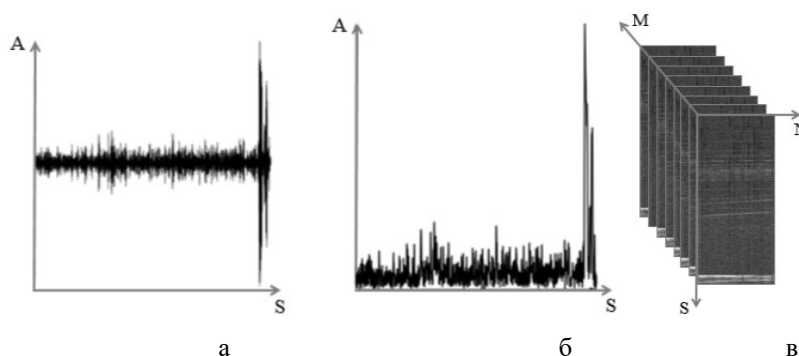


Рисунок 6 – Визуализация данных, записанных в файле \*.raw: отображение действительной (сплошная линия) и мнимой (штриховая линия) частей сигнала (а), отображение модуля комплексного сигнала (б), представление в виде трехмерного массива

На рисунке 6в представлено визуальное отображение нефокусированных данных в трехмерном пространстве, по которым в результате фокусировки строится ультразвуковое изображение в В-режиме: по оси N откладывается номер излучающего элемента, по оси M – номер принимающего элемента, по оси S – глубина сканирования. Каждому файлу \*.raw соответствует одноименный текстовый файл с расширением \*.inf, содержащий информацию о параметрах сканирования (табл.). Также в базе содержится файл от калибровочного датчика в формате \*.raw. Этот датчик может быть использован для коррекции aberrаций по методу, описанному в [7]. В файле калибровочного датчика хранятся комплексные данные в аналогичном виде, что и в основном бинарном файле, но они соответствуют сигналу, принятому каждым из элементов апертуры датчика с фазированной решеткой при излучении калибровочным датчиком.

Таблица – Параметры сканирования, отображаемые в файле \*.inf

Параметр	Описание
Version	Версия прошивки сканера
SampleRate	Частота дискретизации
ProbeName	Модель датчика
NumOfElements	Число элементов ультразвукового датчика, используемое при получении изображения
ProbeType	Тип датчика
Width	Ширина датчика
Angle	Угол поля зрения
IsPencil	Наличие калибровочного датчика
SamplesPerLine	Число отсчетов по глубине

На основе собранной базы данных было получено ультразвуковое изображение фантома ATS в таком положении датчика с фазированной решеткой, при котором в область интереса попадают точечные источники (рис. 7а). Аналогичное изображение было получено после наложения на фантом абберратора в виде *ex vivo* височной кости человека (рис. 7б). При качественной оценке ультразвукового изображения, полученного после коррекции абберраций (рис. 7в), было замечено улучшение качества фокусировки гиперэхогенных точечных источников, которые до применения метода коррекции имели сниженное значение пространственного разрешения.

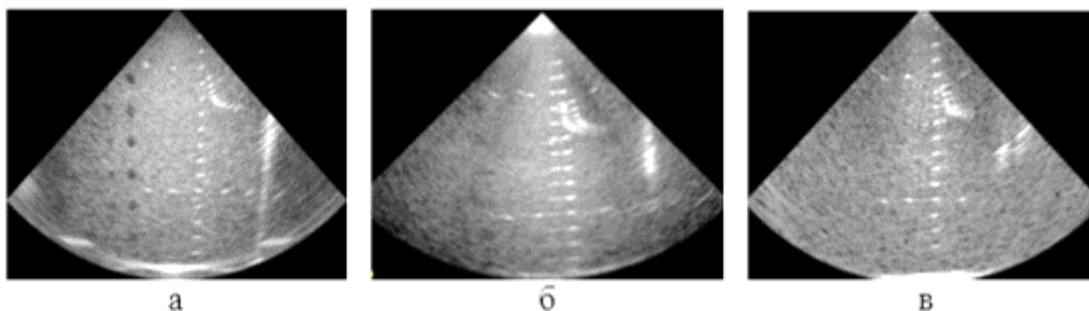


Рисунок 7 – Фрагмент ультразвукового изображения фантома ATS с точечными источниками без абберратора (а), с абберратором в виде *ex vivo* височной кости человека (б), после коррекции абберраций (в)

На данном примере проиллюстрирован способ применения полученных нефокусированных сигналов для тестирования алгоритма коррекции абберраций. Аналогичным образом база данных может применяться для исследования иных алгоритмов [20–22].

Для просмотра базы данных доступна программа, которая может считывать радиочастотные данные, строить ультразвуковые изображения и при наличии абберраций их исправлять [23, 24]. База данных предоставляется на условиях лицензии Creative Commons Attribution – Noncommercial – Share Alike (CC BY-NC-SA). При публикации результатов, основанных на использовании этой базы данных, обязательна ссылка на данное исследование. При создании производных продуктов они должны распространяться под аналогичной лицензией. Коммерческое использование базы данных или извлечение финансовой прибыли запрещено.

Эти сигналы могут быть полезны для разработки и тестирования алгоритмов коррекции и обнаружения абберраций, а также для создания новых методов улучшения ультразвуковой визуализации [25]. База данных предоставляет исследователям возможность объективно оценивать эффективность разрабатываемых алгоритмов и повышать точность диагностики в сложных клинических условиях. Настоящая работа направлена на содействие прогрессу в данной области, предоставляя исследовательскому сообществу доступ к уникальным данным для совершенствования технологий ультразвуковой диагностики.

#### ВЫВОДЫ

1. Проведенное исследование подтвердило возможность использования *ex vivo* височных костей в качестве реалистичной модели для изучения искажений, появляющихся при транскраниальной диагностике.
2. База данных содержит 9 наборов исследований общим объемом 911 Мбайт, полученных с калибровочного фантома ATS в присутствии искажающих слоев, а также с фантома головы.
3. Приведенные ультразвуковые изображения демонстрируют влияние искажающих слоев на качество визуализации и служат основой для тестирования алгоритмов обработки сигналов.
4. Разработанная база данных обладает высокой практической ценностью, что позволяет оптимизировать алгоритмы ультразвуковой визуализации для медицинских диагностических устройств, способствует использованию для разработки новых методов коррекции искажений, открывает возможности для исследований в области неинвазивной диагностики патологий височных костей и смежных структур.

#### Список источников

1. Tanter, M. Ultrafast imaging in biomedical ultrasound / M. Tanter, M. Fink // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2014. – Vol. 61, № 1. – P. 102–119. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.6689779>.
2. Robin, J. In vivo adaptive focusing for clinical contrast-enhanced transcranial ultrasound imaging in human / J. Robin, C. Demené, B. Heiles, V. Blanvillain, L. Puke, F. Perren, M. Tanter // Physics in Medicine & Biology. – 2023. – Vol. 68, № 2. – P. 025019.

3. Ren J. Unveiling the potential of ultrasound in brain imaging: Innovations, challenges, and prospects / J. Ren, J. Li, S. Chen, Y. Liu, D. Ta // *Ultrasonics*. – 2024. – P. 107465.
4. Marsac, L. *Ex vivo* optimisation of a heterogeneous speed of sound model of the human skull for non-invasive transcranial focused ultrasound at 1 MHz / L. Marsac et al. // *International Journal of Hyperthermia*. – 2017. – Vol. 33, № 6. – P. 635–645. <https://doi.org/10.1080/02656736.2017.1295322>.
5. Jaeger, M. Full correction for spatially distributed speed-of-sound in echo ultrasound based on measuring aberration delays via transmit beam steering / M. Jaeger, E. Robinson, H. Akarçay, M. Frenz // *Physics in Medicine & Biology*. – 2015. – Vol. 60. – P. 4497–4515. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/11/4497>.
6. Mozaffarzadeh, M. Comparison of phase-screen and geometry-based phase aberration correction techniques for real-time transcranial ultrasound imaging / M. Mozaffarzadeh, M. D. Verweij, N. de Jong, G. Renaud // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, № 19. – P. 10183.
7. Osipov, L. V. Transcranial Beam Steering with Aberration Correction / L. V. Osipov et al. // *Biomedical Engineering*. – 2021. – Vol. 54, № 6. – P. 438–442. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10057-3>.
8. Wang, M. Systematic review of phase aberration correction algorithms for transcranial focused ultrasound / M. Wang, Z. Xu, B. Cheng // *iRADIOLOGY*. – 2024. <https://doi.org/10.1002/ird3.112>.
9. Leonov, D. et al. Innovative aberration correction in ultrasound diagnostics with direct phase estimation for enhanced image quality / D. Leonov et al. // *Physical and Engineering Sciences in Medicine*. – 2–23. – Vol. 46, № 4. – P. 1765–1778. – <https://doi.org/10.1007/s13246-023-01338-0>.
10. Naftchi-Ardebili, K. A deep-learning model for one-shot transcranial ultrasound simulation and phase aberration correction / K. Naftchi-Ardebili, K. Singh, G. R. Popelka, K. B. Pauly // *arXiv preprint*. – 2024. – arXiv:2410.19995.
11. Патент РФ 2744313. Способ исправления фазовых искажений в сигналах при транскраниальной ультразвуковой визуализации / Н. С. Кульберг, Д. В. Леонов. – Заявл. 06.08.2020 ; опубл. 05.03.2021.
12. Патент РФ 2750965. Способ получения ультразвуковых изображений головного мозга / Н. С. Кульберг, Д. В. Леонов. – Заявл. 06.08.2020 ; опубл. 07.07.2021.
13. Леонов, Д. В. Наблюдения доплеровского мерцающего артефакта: база данных радиочастотных ультразвуковых сигналов / Д. В. Леонов и др. // *Digital Diagnostics*. – 2021. – Т. 2, № 3. – С. 261–276.
14. Piotrkowska-Wróblewska H. Open access database of raw ultrasonic signals acquired from malignant and benign breast lesions / H. Piotrkowska-Wróblewska, K. Dobruch-Sobczak, M. Byra, A. Nowicki // *Medical Physics*. – 2017. – Vol. 44, № 11. – P. 6105–6109.
15. Kremkau, F. W. *Diagnostic Ultrasound: Principles and Instruments* / F. W. Kremkau. – 7th ed. – 2005. – 544 p.
16. Leonov, D. Design and validation of a phantom for transcranial ultrasonography / D. Leonov, M. Kodenko, D. Leichenko, A. Nasibullina, N. Kulberg // *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. – 2022. – Vol. 17, № 9. – P. 1579–1588. <https://doi.org/10.1007/s11548-022-02614-2>.
17. Quesnel, A. M. Computed tomography density as a bio-marker for histologic grade of otosclerosis: a human temporal bone pathology study / A. M. Quesnel, R. Ishai, T. Meehan, J. O'Malley, R. Mitchell, J. Shin, H. Curtin, J. Jr. Nadol, M. McKenna, A. Juliano // *Otology & Neurotology*. – 2022. – Vol. 43, № 6. – P. e605–e612. <https://doi.org/10.1097/mao.00000000000003535>.
18. Grayeli, A. B. Temporal bone density measurements using CT in otosclerosis / A. B. Grayeli, C. S. Yrieix, Y. Imauchi, F. Cyna-Gorse, E. Ferrary, O. Sterkers // *Acta oto-laryngologica*. – 2004. – Vol. 124, № 10. – P. 1136–1140. <https://doi.org/10.1080/00016480410018188>.
19. Leonov, D. V. SAUR data ATS / D. V. Leonov, O. V. Vlasova. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/389098114\\_SAUR\\_data\\_ATS](https://www.researchgate.net/publication/389098114_SAUR_data_ATS) (дата обращения: 20.02.2025).
20. Monkam, P. US-Net: a lightweight network for simultaneous speckle suppression and texture enhancement in ultrasound images / P. Monkam et al. // *Computers in Biology and Medicine*. – 2023. – Vol. 152. – P. 106385.
21. Khan, M. N. Experimental evaluation of filters used for removing speckle noise and enhancing ultrasound image quality / M. N. Khan, A. Altalbe // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2022. – Vol. 73. – P. 103399.
22. Moinuddin, M. Medical ultrasound image speckle reduction and resolution enhancement using texture compensated multi-resolution convolution neural network / M. Moinuddin, S. Khan, A. U. Alsaggaf, M. J. Abdulaal, U. M. Al-Saggaf, J. C. Ye // *Frontiers in Physiology*. – 2022. – Vol. 13. – P. 961571.
23. Leonov, D. Aberration correction by polynomial approximation for synthetic aperture ultrasound imaging / D. Leonov, N. Kulberg, T. Yakovleva // *Medical Physics*. – 2024. – Vol. 51, № 5. – P. 3292–3308. <https://doi.org/10.1002/mp.17078>.
24. Leonov, D. V. Approach to detecting aberrations in transcranial ultrasound imaging / D. V. Leonov, N. S. Kulberg, T. V. Yakovleva, P. D. Solovyova // *Acoustical Physics*. – 2022. – Vol. 68, № 2. – P. 175–186. <https://doi.org/10.1134/S106377102202004X>.
25. Использование фантомов в процессе обучения ультразвуковой диагностике / Юрий Александрович Васильев [и др.]. – [б. м.] : Издательские решения. – 2025. – 84 с. – ISBN 978-5-0065-3467-4.

#### References

1. Tanter, M., Fink, M. Ultrafast imaging in biomedical ultrasound. *IEEE Trans. Ultrason Ferroelectr. Freq. Control*, 2014, vol. 61, no. 1, pp. 102–119. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.6689779>.
2. Robin, J., Demené, C., Heiles, B., Blanvillain, V., Puke, L., Perren, F., Tanter, M. In vivo adaptive focusing for clinical contrast-enhanced transcranial ultrasound imaging in human. *Phys. Med. Biol.*, 2023, vol. 68, no. 2, p. 025019.
3. Ren, J., Li, J., Chen, S., Liu, Y., Ta, D. Unveiling the potential of ultrasound in brain imaging: Innovations, challenges, and prospects. *Ultrasonics*, 2024, p. 107465.

4. Marsac, L., Chauvet, D., La Greca, R., Boch, A. L., Chaumoitre, K., Tanter M, Aubry, J. F. Ex vivo optimisation of a heterogeneous speed of sound model of the human skull for non-invasive transcranial focused ultrasound at 1 MHz. *Int. J. Hyperthermia*, 2017, vol. 33, no. 6, pp. 635–645. <https://doi.org/10.1080/02656736.2017.1295322>.
5. Jaeger, M., Robinson, E., Akarçay, H., Frenz, M. Full correction for spatially distributed speed-of-sound in echo ultrasound based on measuring aberration delays via transmit beam steering. *Phys. Med. Biol.*, 2015, vol. 60, pp. 4497–4515. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/11/4497>.
6. Mozaffarzadeh, M., Verweij, M. D., de Jong, N., Renaud, G. Comparison of phase-screen and geometry-based phase aberration correction techniques for real-time transcranial ultrasound imaging. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, no. 19, p. 10183.
7. Osipov, L. V., Kulberg, N. S., Skosyrev, S. V., Leonov, D. V., Grigorev, G. K., Vladzimirskiy, A. V., Morozov S. P. Transcranial beam steering with aberration correction. *Biomed Eng.*, 2021, vol. 54, no. 6, pp. 438–442. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10057-3>.
8. Wang, M., Xu, Z., Cheng, B. Systematic review of phase aberration correction algorithms for transcranial focused ultrasound. *iRADIOLOGY*, 2024. <https://doi.org/10.1002/ird3.112>.
9. Leonov, D., Kulberg, N., Yakovleva, T., Solovyova, P., Costa-Júnior, J. F. S., Saikia, M. J. Innovative aberration correction in ultrasound diagnostics with direct phase estimation for enhanced image quality. *Phys. Eng. Sci. Med.*, 2023, vol. 46, no. 4, pp. 1765–1778. <https://doi.org/10.1007/s13246-023-01338-0>.
10. Naftchi-Ardebili, K., Singh, K., Popelka, G. R., Pauly, K. B. A deep-learning model for one-shot transcranial ultrasound simulation and phase aberration correction. *arXiv preprint*, 2024, [arXiv:2410.19995](https://arxiv.org/abs/2410.19995).
11. Kulberg, N. S., Leonov, D. V. *Method of correcting phase distortions in signals during transcranial ultrasonic imaging. RU 2744313 C1*, 2021.
12. Kulberg, N. S., Leonov, D. V. *Method for obtaining ultrasonic brain images. RU 2750965 C1*, 2021.
13. Leonov, D. V., Reshetnikov, R. V., Kulberg, N. S., Nasibullina, A. A., Gromov, A. I. Doppler twinkling artifact observations: an open-access database of raw ultrasonic signals. *Digital Diagnostics*, 2021, vol. 2, no. 3, pp. 261–276.
14. Piotrkowska-Wróblewska, H., Dobruch-Sobczak, K., Byra, M., Nowicki, A. Open access database of raw ultrasonic signals acquired from malignant and benign breast lesions. *Med. Phys.*, 2017, vol. 44, no. 11, pp. 6105–6109.
15. Kremkau, F. W. *Diagnostic Ultrasound: Principles and Instruments*. 7th ed. 2005. 544 p.
16. Leonov, D., Kodenko, M., Leichenko, D., Nasibullina, A., Kulberg, N. Design and validation of a phantom for transcranial ultrasonography. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, 2022, vol. 17, no. 9, pp. 1579–1588. <https://doi.org/10.1007/s11548-022-02614-2>.
17. Quesnel, A. M., Ishai, R., Meehan, T., O'Malley, J, Mitchell, R, Shin, J., Curtin, H., Nadol, J. Jr., McKenna, M., Juliano, A. Computed tomography density as a bio-marker for histologic grade of otosclerosis: a human temporal bone pathology study. *Otol. Neurotol.*, 2022, vol. 43, no. 6, p. e605-e612. <https://doi.org/10.1097/mao.0000000000003535>.
18. Grayeli, A. B., Yrieix, C. S., Imauchi, Y., Cyna-Gorse, F., Ferrary, E., Sterkers, O. Temporal bone density measurements using CT in otosclerosis. *Acta Otolaryngol.*, 2004, vol. 124, no. 10, pp. 1136–1140. <https://doi.org/10.1080/00016480410018188>.
19. SAUR data ATS [Internet]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/389098114\\_SAUR\\_data\\_ATS](https://www.researchgate.net/publication/389098114_SAUR_data_ATS).
20. Monkam, P. et al. US-Net: a lightweight network for simultaneous speckle suppression and texture enhancement in ultrasound images. *Comput. Biol. Med.*, 2023, vol. 152, p. 106385.
21. Khan, M. N., Altalbe, A. Experimental evaluation of filters used for removing speckle noise and enhancing ultrasound image quality. *Biomed. Signal Process Control*, 2022, vol. 73, p. 103399.
22. Moinuddin, M., Khan, S., Alsaggaf, A. U., Abdulaal, M. J., Al-Saggaf, U. M., Ye, J. C. Medical ultrasound image speckle reduction and resolution enhancement using texture compensated multi-resolution convolution neural network. *Front Physiol.*, 2022, vol. 13, p. 961571.
23. Leonov, D., Kulberg, N., Yakovleva, T. Aberration correction by polynomial approximation for synthetic aperture ultrasound imaging. *Med. Phys.*, 2024, vol. 51, no. 5, pp. 3292–3308. <https://doi.org/10.1002/mp.17078>.
24. Leonov, D. V., Kulberg, N. S., Yakovleva, T. V., Solovyova, P. D. Approach to detecting aberrations in transcranial ultrasound imaging. *Acoust. Phys.*, 2022, vol. 68, no. 2, pp. 175–186. <https://doi.org/10.1134/S106377102202004X>.
25. Vasilev, Yu. A., Omelianskaya, O. V., Nasibullina, A. A., Sayfutdinova, M. S., Bulgakova, Yu. V., Leichenko, D. V., Leonov, D. V., Shestakova, D. Yu., Vetsheva, N. N., Likhin, V. N., Grebennikova, V. V., Vlasova, O. V. *Guidelines for training with phantoms in ultrasound diagnostics*, 2025. 84 p. ISBN 978-5-0065-3467-4.

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 31.03.2025.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 31.03.2025.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале публикуются материалы на английском и русском языках по тематике, соответствующей утвержденным для журнала отраслям наук, группам специальностей.

2. В список соавторов работ включаются только те лица, которые внесли творческий вклад в подготовку представленных материалов. Лицам, оказавшим только техническую помощь, можно выразить благодарность в конце статьи. Один человек может быть автором (соавтором) не более чем двух статей в одном номере журнала, причем единственным автором он может быть только в одной статье.

3. Объем публикации для научных статей должен быть не менее 8 страниц, а количество источников в библиографическом списке (списке литературы) – не менее 10 позиций.

4. Содержание каждой статьи должно включать следующие элементы: УДК; название статьи; сведения об авторах, включая их место работы, должность, адрес электронной почты; аннотацию объемом от 100 до 250 слов, ключевые слова (от 9 до 13); графическую аннотацию, отражающую содержание статьи; название статьи, сведения об авторах, аннотацию и ключевые слова на английском языке (для англоязычных статей – на русском языке); введение – оно должно заканчиваться формулировкой цели работы в явной форме; собственно текст статьи – очень желательна его сегментация на разделы, имеющие содержательные заголовки; выводы или заключение (должны соответствовать формулировке цели статьи).

5. Для русскоязычных статей приводится два библиографических списка: на языке оригинала статьи; список с транслитерацией русскоязычных источников на латиницу и (дополнительно) приведением в квадратных скобках переводов названий статей и названий источников на английский язык.

В «русскоязычном» библиографическом списке (списке литературы) порядок следования источников – по алфавиту фамилий авторов (сначала русскоязычные источники, потом иноязычные). На все источники, включенные в библиографический список, должны быть даны ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. При необходимости авторы могут указывать номера страниц в источниках, на которые даются ссылки. Приветствуются ссылки на иноязычные источники, а также на материалы, опубликованные ранее в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии». Однако в последнем случае количество таких ссылок не должно превышать 20 % от общего количества источников, включенных в библиографический список. Для источников, имеющих DOI, целесообразно его указывать. При ссылках на статьи, опубликованные в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии», целесообразно в конце библиографического описания источника в круглых скобках указывать гиперссылку, указывающую на место размещения статьи на странице сайта Астраханского государственного университета.

Ссылки в библиографическом списке на материалы, размещенные в интернете, допускаются при соблюдении следующих условий: если у материала, на который дается ссылка, имеется автор и/или название, то они должны быть указаны для этого источника; должен быть приведен полный маршрут доступа к источнику в интернете; должна быть указана дата обращения (доступа) к источнику.

Ограничения по списку литературы: доля самоцитирований для любого из авторов статьи, а также по совокупности всех авторов статьи, не должна превышать 25 %; доля ссылок на статьи с участием одного автора, не являющегося автором (соавтором) статьи, не должна превышать 25 %.

6. Суммарная доля таблиц и иллюстраций в общем объеме представляемой статьи не должна превышать 40 %. Под иллюстрациями понимаются следующие объекты: диаграммы; графики; рисунки; эскизы; фотографии; карты и т. п.

7. Доля оригинального текста в статьях (оцениваемого через систему «Антиплагиат» на сайте [www.antiplagiat.ru](http://www.antiplagiat.ru)) должна быть не менее 80 %.

8. Указание на то, что работа финансируется по какому-либо гранту, в рамках Федеральной целевой программы, государственного заказа и пр. дается в виде постраничной сноски после заголовка (названия) работы.

9. В сведения об авторах работ помимо места работы и должности целесообразно включать ORCID автора и гиперссылку на страничку с его личными наукометрическими показателями на сайте [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru). По желанию можно привести также ссылки на странички с наукометрическими показателями на Scopus, в ResearchGate; на личную страничку, размещенную на сайте организации.

10. Основные технические требования к оформлению статей (материалов):

10.1. Текст должен быть расположен по ширине страницы формата А4 с учетом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 12, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисовочных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 10 кегля. Альбомная ориентация страниц допускается только в порядке исключения для следующих случаев: широкоформатные таблицы с большим количеством колонок; иллюстрации большого размера, которые не умещаются на странице с книжной ориентацией.

Абзацные отступы одинаковы по всему тексту – 0,75 см. Кавычки («»), скобки ([ ], ( )), маркеры и другие знаки должны быть аналогичными на протяжении всего предоставляемого для публикации материала

**ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:  
управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2025  
№ 2 (70)**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
Федеральной службы по надзору в сфере массовых коммуникаций,  
связи и охраны культурного наследия  
ПИ № ФС77-31932 от 16 мая 2008 г.

Учредитель

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева  
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Адрес редакции:

Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20

Адрес издателя:

Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

**Главный редактор И. М. Ажмухамедов**

Редактирование,

компьютерная правка, верстка *Н. Н. Сахно*

Дата выхода в свет 24.09.2025 г.

Цена свободная

Уч.-изд. 12,0. Усл. печ. л. 16,8.

Заказ № 4692. Тираж 500 экз. (первый завод – 23 экз.)

---

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
тел. (8512) 24-66-60 (доб. 3; издательско-полиграфический отдел)  
Отпечатано в Астраханской цифровой типографии  
414040, г. Астрахань, пл. К. Маркса, 33  
тел./факс (8512) 54-00-11, 73-40-40,  
E-mail: a-d-t@mail.ru