

# ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ



УПРАВЛЕНИЕ И ВЫСОКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ

2023  
№1 (61)



ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. Н. ТАТИЩЕВА

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2023**

**№ 1 (61)**

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

2023

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

**ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:  
управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2023  
№ 1 (61)**

**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, доцент, 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

*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. Рыбиков*, кандидат физико-математических наук, директор «Физико-математического института» Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики 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 Казань, 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. Филит*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия» Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

*Л.Р. Фионова*, 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.mbd-fr.org](http://www.mbd-fr.org))

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

© Астраханский государственный университет  
имени В. Н. Татищева, 2023  
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2023

ASTRAKHAN TATISHCHEV STATE UNIVERSITY

**PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:  
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii**

**CASPIAN JOURNAL:  
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2023**

**No. 1 (61)**

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  
2023



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

**CASPIAN JOURNAL:  
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2023  
No. 1 (61)**

**Editorial Board**

*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 (**Editor-in-Chief**)

*I.V. Anikin*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security System Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «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 "(Kazan)

*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. Likhner*, 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. Osipyan*, 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), Director of the Institute of Physics and Mathematics, 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, 2023  
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

**Е. А. Буракова**

Концепция управления сложными технологическими системами  
производства углеродных наноматериалов ..... 9–18

**В. Н. Трубицин, Аль-Гунаид Мохаммед Амин Мохаммед,  
К. Ю. Дерезгузов, М. В. Щербаков, Аль-Гунаид Мария Александровна**

Метод прогнозирования затрат на выполнение работ  
по технологической карте возделывания растениеводческих культур ..... 18–26

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

**С. А. Козина, Д. М. Коробкин,  
С. А. Фоменков, С. Г. Колесников**

Архитектура системы формирования единой базы знаний  
по физической тематике ..... 27–37

**М. В. Коломина, О. А. Щербаков**

Информационная система управления процессом  
онлайн-записи клиентов компании в сфере услуг ..... 38–47

### МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**А. Р. Касимова, В. В. Золотарев,  
Л. Х. Сафиуллина, А. С. Балыбердин**

Использование цифрового двойника  
в задачах управления информационной безопасностью ..... 48–58

**В. А. Корякова, А. Н. Марьенков**

Аутентификация пользователя смартфона  
на основе данных, полученных с акселерометра ..... 59–72

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

**Мсаллам Майди, В. И. Сырямкин**

Методика регистрации 3D облаков точек с использованием  
коррекции плоскостей и корреляции гистограмм ..... 73–89

**Д. И. Парфёнов, И. П. Болодурина, Л. В. Легашев,  
А. Ю. Жигалов, Л. С. Гришина**

Исследование атак на модели машинного обучения в сетях 5G  
на основе генеративно-состязательных сетей ..... 89–96

**И. М. Ажмухамедов, А. В. Федотова, В. А. Корякова**

Методика комплексной оценки уровня безопасности  
Прикаспийского региона ..... 97–111

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

**П. Ф. Чернавин, Н. П. Чернавин, Ф. П. Чернавин**

Управление качеством решающего правила  
и минимизация числа признаков в задачах классификации  
на основе моделей математического программирования ..... 112–119

**Ю. Е. Обжерин, С. М. Сидоров,  
М. М. Никитин, С. Н. Федоренко**

Укрупненная полумарковская и скрытая марковская модели  
технической системы на основе сигналов от подсистем ..... 120–126

**Е. М. Волотов, Т. А. Волотова,  
И. В. Митрофанов, Е. И. Митрофанов**

Метод определения поправок наведения при обработке материалов  
системы регистрации на базе видеокамер общего назначения ..... 127–139

**А. Е. Чусова**

Онтология методов моделирования  
в области архитектурной акустики ..... 140–149

**Т. В. Шуршев, Т. И. Гайрабекова**

Моделирование узла распознавания символов  
на жидкокристаллическом дисплее  
с помощью модели искусственного нейрона ..... 149–156

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ** ..... 157

# CONTENTS

## INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

### MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

**E. A. Burakova**

The concept of control of complex technological systems  
for the production of carbon nanomaterials ..... 9–18

**V. N. Trubitsin, Al-Gunaid Mohammed Amin Mohammed, K. Yu. Dereguzov,  
M. V. Shcherbakov, Al-Gunaid Maria Alexandrovna**

Cost forecasting method for performing work  
according to the technological map for sowing crops ..... 18–26

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

**S. A. Kozina, D. M. Korobkin,  
S. A. Fomenkov, S. G. Kolesnikov**

Architecture of the system for the formation  
of a unified knowledge base on physical topics ..... 27–37

**M. V. Kolomina, O. A. Shcherbakov**

Information system for managing the record of customers  
of the company in the service sector ..... 38–47

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

**A. R. Kasimova, V. V. Zolotarev,  
L. Kh. Safiullina, A. S. Balyberdin**

Using the digital twin in information security management ..... 48–58

**V. A. Koryakova, A. N. Marenkov**

Smartphone user authentication  
based on data received from the accelerometer ..... 59–72

### SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

**Msallam Majdi, V. I. Syryamkin**

A method for 3D point cloud registration  
using plane correction and histogram correlation ..... 73–89

**D. I. Parfenov, I. P. Bolodurina, L. V. Legashev,  
A. Yu. Zhigalov, L. S. Grishina**

Investigation of attacks on machine learning models in 5G networks  
based on generative-adversarial networks ..... 89–96

**I. M. Azhmukhamedov, A. V. Fedotova, V. A. Koryakova**

Methodology for comprehensive assessment  
of the level of security of the Caspian region ..... 97–111



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

**P. F. Chernavin, N. P. Chernavin, F. P. Chernavin**

Quality control of the decision rules and minimization  
of the number of features in classification problems  
based on mathematical programming models ..... 112–119

**Yu. E. Obzherin, S. M. Sidorov,**

**M. M. Nikitin, S. N. Fedorenko**

Merged semi-Markov and hidden Markov models  
of a technical system based on signals from subsystems ..... 120–126

**E. M. Volotov, T. A. Volotova,**

**I. V. Mitrofanov, E. I. Mitrofanov**

The method of determining the correction of the guidance  
in the processing of materials system of registration  
on the basis of video cameras of general purpose ..... 127–139

**A. E. Chusova**

Ontology of modeling methods  
in the field of architectural acoustics ..... 140–149

**T. V. Shurshev, T. I. Gairabekova**

Simulation of character recognition assembly  
on liquid crystal display using artificial neuron model ..... 149–156

**RULES FOR THE AUTHORS** ..... 157

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

DOI 10.54398/20741707\_2023\_1\_9  
УДК 517.977.5

### КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ<sup>1</sup>

*Статья поступила в редакцию 04.11.2022, в окончательном варианте – 17.11.2022.*

**Буракова Елена Анатольевна**, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,  
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8927-7433, e-mail: elenburakova@yandex.ru

Исследуется сложная технологическая система производства углеродных наноматериалов CVD-методом с целью организации управления, обеспечивающего ее эффективное функционирование (снижение себестоимости нанопродукта, увеличение производительности за счет повышения активности используемого катализатора, реализация синтеза наноструктур с заданными параметрами и др.). В работе предложена концепция управления исследуемыми технологическими системами с использованием информационной системы, обеспечивающей поддержку принятия решений на стадии получения катализатора – вещества, определяющего параметры синтезируемого нанопродукта. Реализация концепции, в основе которой лежит новый подход к управлению параметрами углеродных наноматериалов, заключающийся в пред- и посттермической обработке катализатора / его предшественника физическим воздействием, способствовала созданию информационной системы, устанавливающей без проведения дополнительных экспериментов состав и условия получения катализатора, обеспечивающего синтез углеродных нанотрубок с заданными параметрами.

**Ключевые слова:** управление, углеродные наноматериалы, катализатор, метод термического разложения, физическое воздействие, система поддержки принятия решений, оптимизация, синтез с заданными параметрами

### THE CONCEPT OF CONTROL OF COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR THE PRODUCTION OF CARBON NANOMATERIALS

*The article was received by the editorial board on 04.11.2022, in the final version – 17.11.2022.*

**Burakova Elena A.**, Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,  
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8927-7433, e-mail: elenburakova@yandex.ru

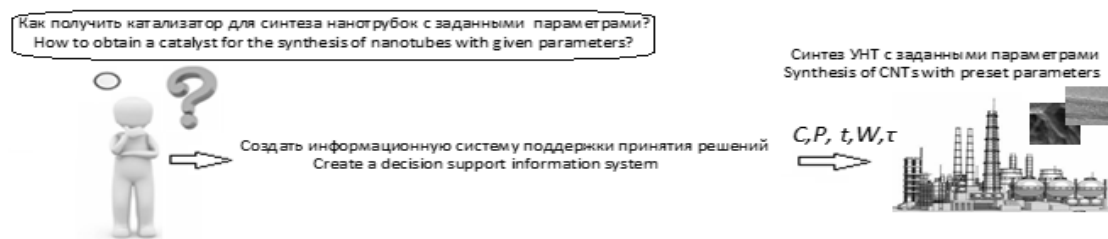
This work has deal with a complex technological system for the production of carbon nanomaterials (NM) with the help of the CVD method in order to organize management that ensures its effective functioning (reducing the cost of nanoproduсt, increasing productivity by raising the activity of the used catalyst, synthesis of nanostructures with specified parameters, etc.). The paper proposes a concept of the technological systems (TS) control with the use of an information system that provides decision-making support during the stage of getting a catalyst – a substance that determines the parameters of the synthesized nanoproduсt. The implementation of the concept, which is based on a new approach to controlling the parameters of carbon nanomaterials (CNM), consisting of pre- and post-thermal treatment of the catalyst / its predecessor by physical action, contributed to the creation of the information system that establishes the composition and the conditions of obtaining a catalyst without additional experiments, that ensures the synthesis of carbon nanotubes with specified parameters.

**Keywords:** control, carbon nanomaterials, catalyst, thermal decomposition method, physical impact, decision support system, optimization, synthesis with given parameters.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-23-01072).

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Современное производство углеродных наноструктур представляет собой сложную технологическую систему (ТС), нуждающуюся в управлении, которое будет препятствовать снижению эффективности ее функционирования. Эффективность функционирования ТС производства углеродных наноматериалов (УНМ) заключается в повышении ее технико-экономических показателей, а также сокращении времени, необходимого на переход системы к производству нового типа наноструктур с заданными параметрами, так как для каждой области применения необходимы материалы с определенными параметрами (структура, длина, диаметр, степень дефектности и др.).

Анализ процесса получения наноматериалов CVD-методом показал, что повышения эффективности функционирования ТС производства УНМ можно добиться путем организации гибкого управления с использованием информационных технологий [1], которые обеспечат не только систематизацию имеющихся данных, но и информационную поддержку принятия решений на основных производственных стадиях.

Из работ, посвященных реализации синтеза УНМ, в частности углеродных нанотрубок методом CVD, было установлено, что в настоящее время параметрами наноструктур управляет варьирование условий их синтеза (времени, температуры, расхода и природы углеродсодержащего сырья) [2, 3] и состава катализатора [4, 5]. При этом на большинстве предприятий, реализующих промышленное производство углеродных нанотрубок, управление параметрами синтезируемых наноструктур преимущественно осуществляют вторым способом, что способствовало формированию общей для таких производственных систем тенденции «один состав катализатора – один тип нанотрубок», препятствующей расширению номенклатуры выпускаемых УНМ.

Учитывая работы [6, 7] и информацию о существовании корреляции между диаметрами частиц катализатора и синтезируемых на них наноструктур [8, 9], было предложено повышение эффективности функционирования ТС производства УНМ достичь путем организации управления с использованием системы информационной поддержки принятия решений (СППР) на стадии получения катализатора – вещества, на частицах которого происходит формирование нанотрубок.

Управление параметрами синтезируемых УНМ через регулирование свойств катализатора на стадии его получения с использованием СППР может обеспечить формирование наноструктур с заданными параметрами, что будет способствовать расширению номенклатуры выпускаемых материалов без изменения условий их синтеза. Разработка информационной системы (ИС), позволяющей без проведения экспериментов определять состав катализатора и условия его получения, обеспечивающие синтез УНМ с заданными параметрами, должна способствовать сокращению времени, необходимого для перехода ТС на выпуск нового типа наноструктур. Учитывая данный факт, целью работы явилась разработка концепции управления сложными ТС производства УНМ с использованием СППР на стадии получения катализатора, обеспечивающего их эффективное функционирование.

Для достижения цели необходимо подобрать подход к управлению параметрами синтезируемого нанопродукта, проанализировать функционирование промышленного производства УНМ методом ГФХО, выявить стадии, создающие предпосылки для организации эффективного управления ТС, а также разработать ИС, обеспечивающую синтез наноструктур с заданными параметрами.

**Концепция управления ТС производства УНМ.** Исходя из того, что управление планируется осуществлять на стадии получения катализатора, то для достижения поставленной цели были изучены катализаторы, применяемые для синтеза УНМ, представляющие собой сложные системы из активного компонента, носителя, а иногда и промотора [10], а также методы их получения [11–14]. Установлено, что среди известных методов получения катализатора наиболее быстрым и простым по реализации является метод термического разложения неустойчивых соединений. Его экспериментальное исследование показало, что, несмотря на наличие нескольких основных стадий, это многофакторный и достаточно сложно контролируемый процесс. Установленные в ходе экспериментов факторы, оказывающие влияние на свойства формируемого катализатора, отражены на рисунке 1.

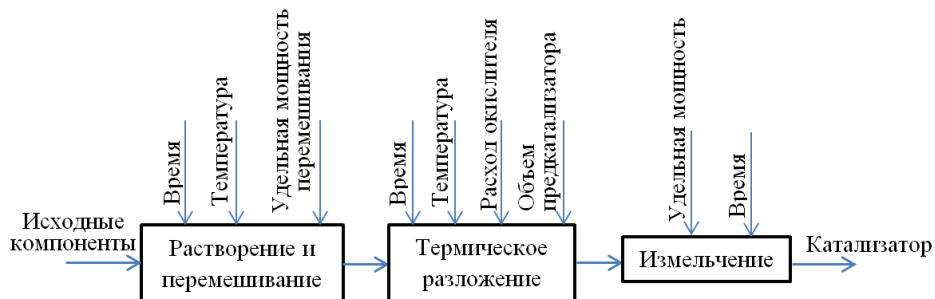


Рисунок 1 – Эскизная схема получения катализатора методом термического разложения неустойчивых соединений

Анализ существующих методов повышения эффективности металлоксидных катализаторов показал, что в настоящее время наиболее востребованным методом повышения эффективности катализатора для синтеза УНМ является промотирование, однако он основан на изменении состава катализатора, что не всегда допустимо на производстве. Альтернативным методом изменения свойств катализатора является применение физических воздействий на одной из стадий его получения. Эффективность его применения при получении металлоксидных катализаторов была представлена в работах Б. Шелимова и М. Сульмана, при этом отсутствуют работы, посвященные каталитическим системам для синтеза УНМ.

Данный факт послужил причиной проведения экспериментального исследования, которое позволило изучить влияние обработки раствора исходных компонентов катализатора физическим воздействием на стадии формирования металлоксидной каталитической системы на ее активность в процессе синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) [15]. Анализ полученных результатов подтвердил возможность управления параметрами синтезируемых УНТ на стадии формирования катализатора путем обработки его физическим воздействием. Исходя из информации, представленной на рисунке 1, предлагается концепция организации управления сложными ТС производства наноструктур по-строить на новом подходе к управлению параметрами синтезируемых УНТ, заключающемся в пред- и посттермической обработке катализатора / его предшественника физическим воздействием [16].

Детальное изучение ТС производства углеродных наноструктур CVD-методом с учетом предлагаемого подхода к управлению, основанного на использовании СППР при производстве катализатора для их синтеза, позволило разработать ее модернизированную структуру (рис. 2). Помимо основных активных элементов – производственных процессов получения катализатора и синтеза наноструктур в исследуемую ТС предлагается ввести дополнительные активные элементы – ИС и стадии пред- и посттермической обработки катализатора / его предшественника), которые могут способствовать расширению функционала исходной производственной системы без изменения ее основных исходных активных элементов.

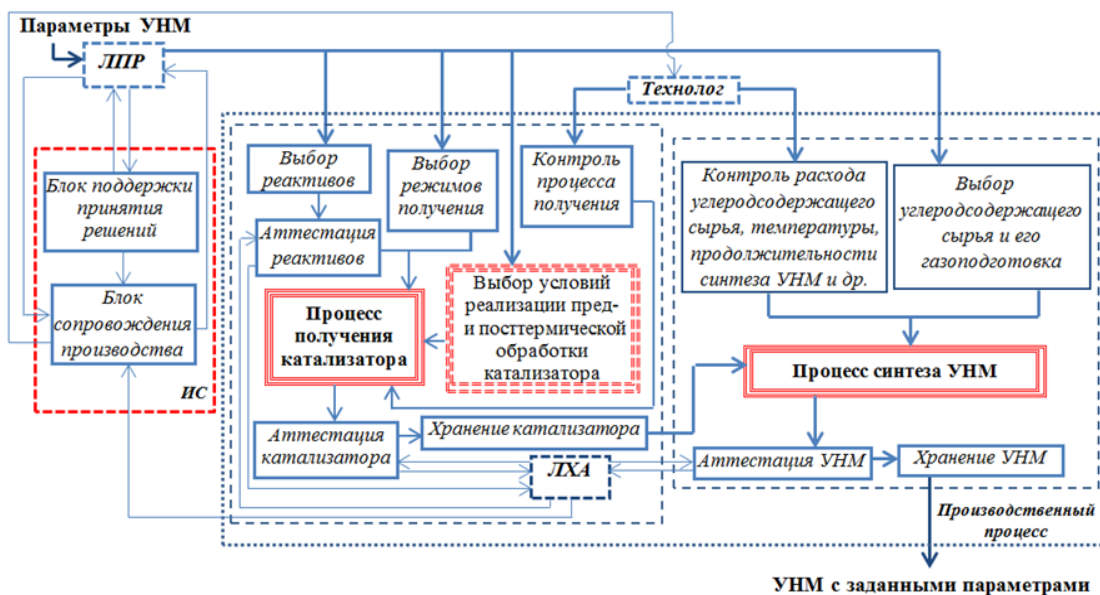


Рисунок 2 – Структура ТС промышленного производства УНМ



В соответствии с рисунком 2 ориентирование ТС на производство УНМ с заданными параметрами производит лицо, принимающее решение (ЛПР), которое обладает информацией со всех основных элементов производственной системы. Для упрощения принятия решений ЛПР относительно выбора условий реализации производственного процесса, обеспечивающих синтез УНМ с заданными параметрами, необходимо разработать ИС, обеспечивающую управление параметрами наноструктур на стадии пред- и посттермической обработки катализатора /его предшественника.

Для создания ИС была разработана методология организации информационной поддержки управления параметрами наноструктур на стадии получения катализатора, обеспечивающая синтез УНТ с заданными параметрами, структура, которой представлена на рисунке 3.

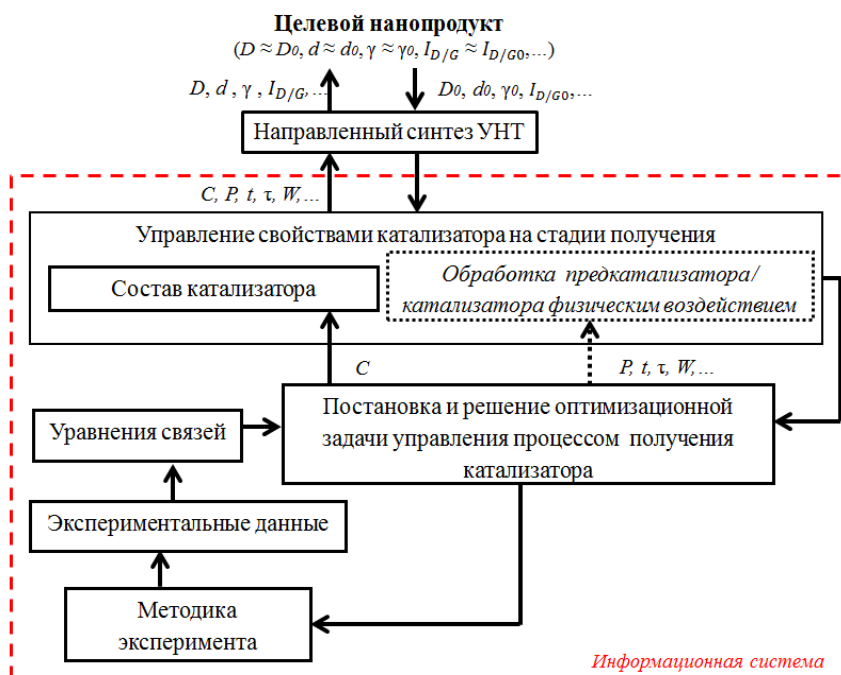


Рисунок 3 – Структура методологии организации информационной поддержки управления параметрами наноструктур на стадии получения катализатора

В соответствии с разработанной методологией, управление свойствами катализатора на стадии получения можно осуществлять за счет изменения его состава (общепринятый подход) и обработки предкатализатора/катализатора физическим воздействием (новый подход в данной области). Таким образом, эффективное функционирование ТС производства УНМ может быть достигнуто благодаря постановке и решению оптимизационной задачи, позволяющей определять состав катализатора ( $C$ ) и условия обработки его физическим воздействием ( $P, t, \tau, W$ ), где  $P$  – тип физического воздействия;  $t$  – температура, °C;  $\tau$  – время, с;  $W$  – удельная мощность обработки, Вт/м<sup>3</sup>.

Информация, полученная в результате решения оптимизационной задачи без проведения дополнительных экспериментов, будет способствовать получению в сжатые сроки катализатора, обеспечивающего синтез наноструктур с параметрами ( $D, d, \gamma, I_{D/G}$ ), значения которых будут наиболее близки к заданным ( $D_0, d_0, \gamma_0, I_{D/G_0}$ ).

Наиболее востребованными параметрами, в частности УНТ, являются внешний ( $D$ ) и внутренний ( $d$ ) диаметры, нм;  $\gamma$  – удельный выход наноструктур, г<sub>C</sub>/г<sub>cat</sub> и степень их дефектности ( $I_{D/G}$ ). Степень дефектности УНТ определяли методом рамановской спектроскопии по отношению интенсивностей мод, вызванных дефектом симметрии графенового слоя ( $I_D$ ) и колебаниями атомов углерода в плоскости графенового слоя ( $I_G$ ). Такой подход приведет к повышению эффективности управления ТС производства УНМ и может обеспечить расширение номенклатуры выпускаемых наноструктур.

Для оценки эффективности предлагаемого подхода к управлению были исследованы системные связи и закономерности функционирования основных активных элементов ТС производства УНМ, установлены составы информационных потоков и на их основе сформулирован комплексный критерий оптимальности процесса получения катализатора, характеризующий степень отклонения значений параметров синтезируемых наноструктур от заданных значений [17]. Схема информационных потоков в ТС производства УНТ, предусматривающая реализацию предлагаемого в работе метода управления, представлена на рисунке 4.

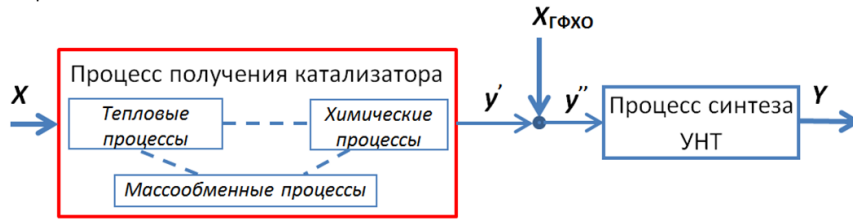


Рисунок 4 – Схема информационных потоков в ТС производства УНТ

Информационный поток процесса получения катализатора  $X$  представляет собой совокупность параметров, характеризующих входные, управляющие и возмущающие факторы:

$$X = \langle C, \omega_{Air}, t_0, \vec{\psi}, P, t_{o.c.}, t_{п}, t_{к}, c_{п}, c_{к}, P_{атм}, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}, \Delta t_{o.c.}, \Delta P_{атм} \rangle,$$

где  $C$  – состав катализатора;  $\omega_{Air}$  – расход газовой среды, м<sup>3</sup>/с;  $t_0$  – температура раствора исходных компонентов катализатора, °С;  $\vec{\psi}$  – геометрические размеры емкости для пред- и посттермической обработки катализатора / его предшественника, мм;  $P$  – тип обработки;  $t_{o.c.}$  – температура окружающей среды, °С;  $t_{п}, t_{к}$  – температуры среды в рабочей зоне и в слое катализатора, °С;  $c_{п}, c_{к}$  – концентрации веществ в рабочей зоне и в слое катализатора, моль/м<sup>3</sup> соответственно;  $P_{атм}$  – атмосферное давление, Па;  $W_{об.}$  – удельная мощность обработки, Вт/м<sup>3</sup>;  $\tau_{об}$  – продолжительность обработки, с;  $t_{об}$  – температура обработки, °С;  $\Delta t_{o.c.}$  – нестабильность температуры окружающей среды;  $\Delta P_{атм}$  – нестабильность атмосферного давления.

Промежуточный информационный поток  $y'$  характеризует полупродукт – катализатор, который при реализации CVD-процесса преобразуется под влиянием факторов, характеризующих информационный поток  $X_{CVD}$ .

$$X_{CVD} = \langle P_{C_{xHy}}, G_{C_{xHy}}, T_{CVD}, \tau_{CVD} \rangle,$$

где  $P_{C_{xHy}}$  – тип и  $G_{C_{xHy}}$  – расход углеродсодержащего сырья, м<sup>3</sup>/ч;  $T_{CVD}$  – температура реализации CVD-процесса, °С;  $\tau_{CVD}$  – продолжительность синтеза УНТ, ч.

Их совокупность определяет состав входного информационного потока  $y''$ , характеризующий процесс синтеза УНТ

$$y'' = \langle y', X_{CVD} \rangle.$$

Оценку эффективности предлагаемого в работе метода управления исследуемой ТС производили по наиболее значимым параметрам синтезируемых УНТ, поэтому выходной информационный поток процесса синтеза наноструктур ( $Y$ ) принимает вид

$$Y = \langle D, d, \gamma, I_{DG} \rangle.$$

С учетом состава информационных потоков, представленных на рисунке 4, критерий оптимальности  $M$  в общем виде представим как

$$M = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left| \frac{z_i - z_{i0}}{z_{i0}} \right|, \tag{1}$$

где  $z_i$  – полученное, а  $z_{i0}$  – заданное значение параметра, характеризующего УНМ;  $n$  – количество параметров, характеризующих наноструктуры;  $\alpha_i$  – весовой коэффициент, определяемый на основе экспертной оценки области применения УНМ.

Так как управление параметрами УНМ осуществляется с использованием нового подхода, заключающегося в пред- и посттермической обработке катализатора / его предшественника физическим воздействием, то использовать аналитические и экспериментально-аналитические математические модели описания этого сложного процесса в постановке задачи оптимизации условий формирования катализатора нецелесообразно.

В связи с недостатком знаний о процессах обработки катализатора / его предшественника физическим воздействием и природе наблюдаемых эффектов в качестве уравнений связей при постановке оптимизационной задачи предлагается использовать регрессионные зависимости, которые могут быть получены в результате обработки экспериментальных данных. Установленные функциональные зависимости должны быть представлены в следующем виде:

$$Y(C, P, t_{об}, \tau_{об}, W_{об}) = \begin{cases} C = 1 & D = f_1(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); d = f_2(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ P = 1 & \gamma = f_3(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); I_{D/G} = f_4(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ \\ C = 1 & D = f_5(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \gamma = f_6(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ P = 2 & \gamma = f_7(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); I_{D/G} = f_8(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ & \dots; \\ & \dots \end{cases} \quad (2)$$

где  $C$  и  $P$  – дискретные величины, а параметры синтезированных наноструктур, характеризующие выходной информационный поток ТС производства  $Y_i$  определяемые условиями физического воздействия, являются непрерывными.

В соответствии с методологией организации информационной поддержки управления параметрами наноструктур на стадии получения катализатора (рис. 3), оптимизационная задача сводится к определению условий реализации процесса получения катализатора, способствующего формированию его формы, обеспечивающей синтез УНМ с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным.

В связи с чем общая постановка задачи оптимизации условий получения катализатора принимает следующий вид:

Дано:

$$D_0, d_0, \gamma_0, I_{D/G_0}.$$

Найти:

$$C, P, t_{об}, \tau_{об}, W_{об},$$

при которых критерий оптимальности (1) с учетом ограничений:

$$C = \overline{1, N_C}; P = \overline{0, N_P};$$

$$\tau_{об} \in [\tau_{об\ min}; \tau_{об\ max}]; t_{об} \in [t_{об\ min}; t_{об\ max}]; W_{об} \in [W_{об\ min}; W_{об\ max}],$$

где  $N_C, N_P$  – количество составов катализатора и типов физического воздействия и экспериментально установленных связей, представленных в виде (2), принимает минимальное значение.

Экспериментальное исследование влияния условий получения катализатора на параметры синтезируемых УНМ, детально представленное в работе [15], позволило установить характер функциональных зависимостей и вид математической модели. Такой подход к выявлению математических зависимостей параметров, характеризующих  $Y$ , от управляющих факторов реализует принцип открытости, позволяющий вносить в модель информацию о новых способах воздействия на новые составы катализаторов. С учетом установленных уравнений связей, ограниченной формализованная постановка оптимизационной задачи принимает следующий вид.

Для синтеза УНТ с заданными значениями параметров

$$D_0, d_0, \gamma_0, I_{D/G_0}$$

найти значения

$$C, P, t_{об}, \tau_{об}, W_{об}$$

с учетом ограничений

$$C = \overline{1...8}; P = \overline{0...4}; W_{об} [0; 2,86 \cdot 10^4]; [5; 7200]; [350; 750]$$

и уравнений связей (4), при которых критерий оптимальности (1), записанный с учетом установленных составов информационных потоков ТС производства УНТ, в виде (3) примет минимальное значение.

$$M = \alpha_D \left| \frac{D(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - D_0}{D_0} \right| + \alpha_d \left| \frac{d(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - d_0}{d_0} \right| + \\ + \alpha_\gamma \left| \frac{\gamma(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - \gamma_0}{\gamma_0} \right| + \alpha_{I_{D/G}} \left| \frac{I_{D/G}(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - I_{D/G_0}}{I_{D/G_0}} \right| \rightarrow \min \quad (3)$$

Решение оптимизационной задачи методом сканирования как наиболее надежным методом обеспечило нахождение глобального минимума целевой функции, что позволило разработать ИС, необходимую для организации эффективного управления ТС производства УНМ.

Уравнения связей, установленные в результате обработки экспериментальных данных, представлены в виде фрагмента аппроксимирующих зависимостей для четырех составов катализатора и типов обработки его предшественника (4).





сопровождения производства, а именно в технологической карте, технолог реализует технологический процесс. Анализ физико-химических свойств полученных катализаторов и аттестацию синтезируемых УНМ производит лаборант химического анализа (ЛХА), после чего результаты вносит в технологический журнал. В разработанной ИС база данных не требует сложных систем обслуживания, является открытой, что предусматривает ее расширение за счет введения новых результатов исследования (составов катализатора, способах и режимах его обработки и др.).

ИС, разработанная в результате реализации методологии управления параметрами УНМ на стадии получения катализатора (рис. 3), была апробирована при производстве УНТ на АО «ЗАВКОМ» (г. Тамбов). Использование информационной системы поддержки принятия решений при производстве катализаторов для синтеза УНМ позволило разработать эскизную схему и базовую химико-технологическую систему процесса получения каталитической системы, обеспечивающей синтез УНТ диаметром 8–15 нм и  $I_{D/G}$  не более 1,05. На основе полученной информации был спроектирован и запущен опытно-промышленный участок производства катализатора для синтеза многослойных УНТ производительностью до 245 кг/год.

**Заключение.** На основе современных методов системного анализа и теории принятия решений получены новые научные результаты в области управления ТС производства УНМ, в частности углеродных нанотрубок CVD методом. Разработана концепция управления ТС, заключающаяся в ведении в нее дополнительных активных элементов, а именно – ИС, обеспечивающей поддержку принятия решений на стадии получения катализатора, и стадий пред- и/или посттермической обработки катализатора / его предшественника, позволяющих управлять свойствами формируемой каталитической системы. В результате реализации концепции были исследованы системные связи и закономерности функционирования активных элементов ТС, сформулирован критерий оценки эффективности предлагаемого в работе подхода к управлению, выполнена постановка задачи оптимизации условий получения катализатора, решение которой позволяет устанавливать состав и условия получения катализатора, обеспечивающие синтез УНТ с заданными параметрами. Все это способствовало организации информационной поддержки управления параметрами наноструктур на стадии получения катализатора. Создание и внедрение информационной системы, обеспечивающей поддержку принятия решений на стадии получения катализатора для синтеза УНМ, способствует повышению эффективности функционирования ТС производства УНТ. Использование ИС позволило без дополнительного проведения большого количества экспериментов создать производственный участок катализатора в АО «ЗАВКОМ», обеспечивающий синтез многослойных углеродных нанотрубок заданной морфологии.

#### Библиографический список

1. Прокудин, С. В. Разработка информационной системы выбора и расчета катализаторов на основе ВПЯМ / С. В. Прокудин, А. В. Беспалов, В. Н. Грунский, А. И. Козлов // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2007. – Т. 21, № 2 (70). – С. 79–84.
2. Рухов, А. В. Основные процессы синтеза углеродных нанотрубок методом газофазного химического осаждения / А. В. Рухов // *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 117–121.
3. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – Москва : Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. Чесноков, В. В. Образование углеродных нитей при каталитическом разложении углеводородов на металлах подгруппы железа и их сплавах / В. В. Чесноков, Р. А. Буянов // *Успехи химии*. – 2000. – Т. 69, № 7. – С. 675–692.
5. Бесперстова, Г. С. Влияние состава катализатора на характеристики синтезируемых углеродных нанотрубок / Г. С. Бесперстова, М. А. Неверова, А. М. Степанов, Е. А. Буракова, А. Г. Ткачев // *Фундаментальные исследования*. – 2018. – № 12. – С. 9–14.
6. Буянов, Р. А. О процессах, происходящих в металлических частицах при каталитическом разложении на них углеводородов по механизму карбидного цикла / Р. А. Буянов, В. В. Чесноков // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2005. – Т. 13. – С. 37–40.
7. Bernardo, G. P. O. Ab initio Molecular Dynamics thermal decomposition of methane on Ni-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for CNT production: Effect of Cu promoter / G. P. O. Bernardo, L. Abella, J. Auresenia, H. Hinode // *Computational Condensed Matter*. – 2017. – Vol. 11. – P. 20–26.
8. Ding, F. Molecular dynamics study of the catalyst particle size dependence on carbon nanotube growth / F. Ding, A. Rosen, K. Bolton // *J. Chem. Phys.* – 2004. – Vol. 121. – P. 2775–2779.
9. Царева, С. Ю. Исследование влияния природы и размера частиц катализатора на образование нанотрубок в методе каталитического пиролиза углеводородов / С. Ю. Царева, Е. В. Жариков, А. Н. Коваленко // *Наукоемкие технологии*. – 2004. – № 6. – С. 38–42.
10. Gu, B. Size and promoter effects on iron nanoparticles confined in carbon nanotubes and their catalytic performance in light olefin synthesis from syngas / B. Gu, Ch. Zhou, Sh. He, S. Moldovan, P. A. Chernavskii, V. V. Ordonsky, A. Y. Khodakov et al. // *Catalysis Today*. – 2019. – Vol. 357. – P. 203–213.
11. Esposito, S. “Traditional” Sol-Gel Chemistry as a Powerful Tool for the Preparation of Supported Metal and Metal Oxide Catalysts / S. Esposito // *Materials*. – 2019. – Vol. 12 (4). – P. 668. – DOI: 10.3390/ma12040668.

12. Dubey, P. Synthesis of thin-multiwalled carbon nanotubes by Fe-Mo/MgO catalyst using sol-gel method / P. Dubey, S. K. Choi, B. Kim, C. J. Lee // *Carbon letters*. – Vol. 2012, № 13 (2). – P. 99–108.
13. Allaedini, G. The effect of Co/Pd MgO supported catalyst calcination temperature on the yield and morphology of CNTs via methane decomposition / G. Allaedini, S. M. Tasirin, J. Sahri, M. Talib, M. Zainal // *Adv. Mater. Res.* – 2014. – Vol. 983. – P. 148–151.
14. Guo, Y. Effect of different catalyst preparation methods on the synthesis of carbon nanotubes with the flame pyrolysis method / Y. Guo, G. Zhai, Y. Ru et al. // *AIP Advances*. – 2018. – Vol. 8. – P. 035111. – DOI: 10.1063/1.5020936.
15. Буракова, Е. А. Управление процессом формирования катализатора для синтеза углеродных наноструктурных материалов / Е. А. Буракова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 127–138.
16. Буракова, Е. А. Подход к управлению процессом получения катализатора синтеза углеродных наноматериалов / Е. А. Буракова, Е. Н. Туголуков, А. В. Рухов, Т. П. Дьячкова, Ю. В. Литовка // *Математические методы в технологиях и технике*. – 2022. – № 4. – С. 16–19.
17. Буракова, Е. А. Концепция управления технологической системой производства углеродных нанотрубок / Е. А. Буракова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 444–454.
18. Буракова, Е. А. Информационная поддержка принятия решений при производстве катализатора синтеза углеродных нанотрубок / Е. А. Буракова // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2021. – № 3 (55). – С. 9–15.

#### References

1. Prokudin, S. V., Bepalov, A. V., Grunskiy, V. N., Kozlov, A. I. Razrabotka informatsionnoy sistemy vybora i rascheta katalizatorov na osnove VPYaM [Development of an information system for the selection and calculation of catalysts based on highly porous cellular materials]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2007, vol. 21, no. 2 (70), pp. 79–84.
2. Rukhov, A. V. Osnovnye protsessy sinteza uglerodnykh nanotrubok metodom gazofaznogo khimicheskogo osazhdeniya [Main Processes for the Synthesis of Carbon Nanotubes by Gas-Phase Chemical Deposition]. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of Universities. Chemistry and Chemical Technology], 2013, vol. 56, no. 9, p. 117–121.
3. Mishchenko, S. V., Tkachev, A. G. *Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p.
4. Chesnokov, V. V., Buyanov, R. A. Obrazovanie uglerodnykh nitey pri kataliticheskom razlozhenii uglevodorodov na metallakh podgruppy zheleza i ikh splavakh [Formation of carbon threads during the catalytic decomposition of hydrocarbons on metals of the iron subgroup and their alloys]. *Uspekhi khimii* [Advances in Chemistry], 2000, vol. 69, no. 7, pp. 675–692.
5. Besperstova, G. S., Neverova, M. A., Stepanov, A. M., Burakova E. A., Tkachev A. G. Vliyaniye sostava katalizatora na kharakteristiki sinteziruemykh uglerodnykh nanotrubok [Influence of the Catalyst Composition on the Characteristics of Synthesized Carbon Nanotubes]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2018, no. 12, pp. 9–14.
6. Buyanov, R. A., Chesnokov, V. V. O protsessakh, proiskhodyashchikh v metallicheskiykh chastitsakh pri kataliticheskom razlozhenii na nikh uglevodorodov po mekhanizmu karbidnogo tsikla [On the processes occurring in metal particles during the catalytic decomposition of hydrocarbons on them by the carbide cycle mechanism]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 2005, vol. 13, pp. 37–40.
7. Bernardo, G. P. O., Abella, L., Auresenia, J., Hinode, H. Ab initio Molecular Dynamics thermal decomposition of methane on Ni-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for CNT production: Effect of Cu promoter. *Computational Condensed Matter*, 2017, vol. 11, pp. 20–26.
8. Ding, F., Rosen, A., Bolton, K. Molecular dynamics study of the catalyst particle size dependence on carbon nanotube growth. *Journal of Chemical Physics*, 2004, vol. 121, pp. 2775–2779.
9. Tsareva, S. Ju., Zharikov, E. V., Kovalenko, A. N. Issledovanie vliyaniya prirody i razmera chastits katalizatora na obrazovanie nanotrubok v metode kataliticheskogo piroliza uglevodorodov [Investigation of the influence of the nature and size of catalyst particles on the formation of nanotubes in the method of catalytic pyrolysis of hydrocarbons]. *Naukoemkie tekhnologii* [High Technologies], 2004, no. 6, pp. 38–42.
10. Gu, B., Zhou, Ch., He, Sh., Moldovan, S., Chernavskii, P. A., Ordonsky, V. V., Khodakov, A. Y. et al. Size and promoter effects on iron nanoparticles confined in carbon nanotubes and their catalytic performance in light olefin synthesis from syngas. *Catalysis Today*, 2019, vol. 357, pp. 203–213.
11. Esposito, S. “Traditional” Sol-Gel Chemistry as a Powerful Tool for the Preparation of Supported Metal and Metal Oxide Catalysts. *Materials*, 2019, vol. 12 (4), no. 668. DOI: 10.3390/ma12040668.
12. Dubey, P., Choi, S. K., Kim, B., Lee, C. J. Synthesis of thin-multiwalled carbon nanotubes by Fe-Mo/MgO catalyst using sol-gel method. *Carbon letters*, 2012, vol. 13 (2), pp. 99–108.
13. Allaedini, G., Tasirin, S. M., Sahri, J., Talib, M., Zainal, M. The effect of Co/Pd MgO supported catalyst calcination temperature on the yield and morphology of CNTs via methane decomposition. *Adv. Mater. Res.*, 2014, vol. 983, pp. 148–151.
14. Guo, Y., Zhai, G., Ru, Y. et al. Effect of different catalyst preparation methods on the synthesis of carbon nanotubes with the flame pyrolysis method. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, p. 035111. DOI: 10.1063/1.5020936.
15. Burakova, E. A. Upravleniye protsessom formirovaniya katalizatora dlya sinteza uglerodnykh nanostrukturnykh materialov [Controlling the Formation of a Catalyst for the Synthesis of Carbon Nanostructured

Materials]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University], 2022, vol. 28, no. 1, pp. 127–138.

16. Burakova, E. A., Tugolukov, E. N., Rukhov, A. V., Dyachkova, T. P., Litovka, Yu. V. Podkhod k upravleniyu protsessom polucheniya katalizatora sinteza uglerodnykh nanomaterialov [An approach to controlling the process of obtaining a catalyst for the synthesis of carbon nanomaterials]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering], 2022, no. 4, pp. 16–19.

17. Burakova, E. A. Kontsepsiya upravleniya tekhnologicheskoy sistemoy proizvodstva uglerodnykh nanotrubok [The concept of managing the technological system for the production of carbon nanotubes]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University], 2022, vol. 28, no. 3, pp. 444–454.

18. Burakova, E. A. Informatsionnaya podderzhka prinyatiya resheniy pri proizvodstve katalizatora sinteza uglerodnykh nanotrubok [Information support for decision-making in the production of a catalyst for the synthesis of carbon nanotubes]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 3 (55), pp. 9–15.

УДК 004.021

## МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАТРАТ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЕ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ РАСТЕНИЕВОДЧЕСКИХ КУЛЬТУР

*Статья поступила в редакцию 18.11.2022, в окончательном варианте – 25.11.2022.*

**Трубицин Владислав Николаевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, аспирант, ORCID: 0000-0001-9570-3937, e-mail: trubitsins@gmail.com

**Аль-Гунаид Мохаммед Амин Мохаммед**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-6977-3971, e-mail: mohammadalgunaid@gmail.com

**Дерегузов Кирилл Юрьевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, аспирант, ORCID: 0000-0002-5508-5799, e-mail: k.dereguzov@bilaboratory.com

**Щербаков Максим Владимирович**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-7173-4499, e-mail: maxim.shcherbakov@vstu.ru

**Аль-Гунаид Мария Александровна**, ООО «Лаборатория бизнес-аналитики «Билаб»», 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, системный аналитик, ORCID: 0000-0001-6764-7827, e-mail: ansama@yandex.ru

В статье рассматривается проблема эффективного управления процессами прогнозирования затрат сельскохозяйственного предприятия. Целью данной работы является разработка метода прогнозирования расхода материалов, топлива, использования техники и трудовых затрат на выполнение работ, предусмотренных технологической картой на выращивание посевных культур. В ходе выполнения работы был сформирован набор данных, который содержит фактические данные о выращивании пшеницы на полях различных площадей и состоит из информации об условиях выращивания и объеме задействованных в работе ресурсов. Данная выборка была использована для обучения математических моделей с целью прогнозирования значений затрат на выполнение полевых работ. В ходе проведенных экспериментов был разработан метод генерации технологической карты и прогнозирования расходов на выполнение работ по возделыванию сельскохозяйственных культур. Разработанный метод позволяет в короткие сроки сформировать первоначальный план работ с расчетом финансовых затрат с разницей не более 12 % от фактически затраченных ресурсов. Разработанный метод можно применять в процессе планирования, а также уже в протекающих процессах выращивания, что позволит пересчитать распределение ресурсов. Метод позволит обнаруживать и сигнализировать изменения в плане или перерасходе ресурсов в факте. Описанная разработка позволяет осуществлять поддержку принятия решений при оценке затрат на выращивание различных культур, повышая эффективность процесса планирования технологических карт на сельскохозяйственном предприятии.

**Ключевые слова:** сельское хозяйство, принятие решений, машинное обучение, прогнозирование

**COST FORECASTING METHOD FOR PERFORMING WORK  
ACCORDING TO THE TECHNOLOGICAL MAP FOR SOWING CROPS**

The article was received by the editorial board on 18.11.2022, in the final version – 25.11.2022.

**Trubitsin Vladislav N.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0001-9570-3937, e-mail: trubitsins@gmail.com

**Al-Gunaid Mohammed Amin Mohammed**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-6977-3971, e-mail: mohammadalgunaid@gmail.com

**Dereguzov Kirill Yu.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0002-5508-5799, e-mail: k.dereguzov@bilaboratory.com

**Shcherbakov Maxim V.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-7173-4499, e-mail: maxim.shcherbakov@vstu.ru

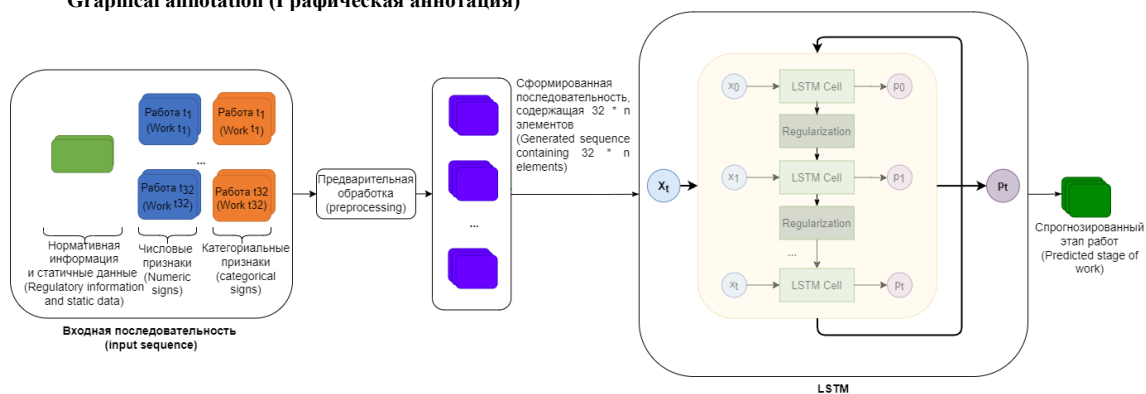
**Al-Gunaid Maria Alexandrovna**, Bilab Business Intelligence Laboratory LLC, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

system analyst, ORCID: 0000-0001-6764-7827, e-mail: ansama@yandex.ru

The paper consider effective management of costs forecasting processes for agricultural enterprises. The purpose of this work is to develop a methodology for predicting the consumption of materials, fuel, the use of equipment and labor costs for the performance of work provided for by the technological map for growing crops. The paper describes a data array containing actual data on the cultivation of wheat in fields of various areas and consisting of information about growing conditions and the amount of resources involved in the work. This sample was used to train mathematical models in order to predict the costs of field work. The result of the experiments is a developed method for generating a technological map and predicting the costs of performing work on growing crops. The developed method allows in a short time to form an initial work plan with the calculation of financial costs with a difference of no more than 12 % of the actually spent resources. The developed method can be applied in the planning process, as well as in ongoing growing processes, which will allow recalculating the distribution of resources. The method will allow to detect and signal changes in the plan or resource overrun in fact. The described development allows for decision support in assessing the costs of growing various crops, increasing the efficiency of the planning process for technological maps in an agricultural enterprise.

**Keywords:** agriculture, decision making, machine learning, forecasting

**Graphical annotation (Графическая аннотация)**



**Введение.** В настоящее время специалисты в области сельского хозяйства стараются максимально использовать технологии точного земледелия (от англ. precision agriculture). Развитие цифровых технологий и средств связи позволяет аграриям снижать затраты, повышая продуктивность полей и прибыльность бизнеса [1].

Сельскохозяйственное производство сильно зависит от погоды и природных явлений, поэтому является наиболее уязвимым бизнесом. В сельском хозяйстве, в отличие от традиционного производства, невозможно заранее структурировать все бизнес-процессы.

На протяжении сезона фермер принимает десятки различных решений: от выбора семян и места посадки до методов лечения и обработки растений для борьбы с вредителями и угрозами. Недостаток информации при принятии решений приводит к тому, что в процессе производства теряется



до 40 % урожая. При этом более половины факторов, влияющих на потери, можно контролировать при помощи автоматизированных систем управления.

Эффективность сельского хозяйства будет выше в том случае, если в кратчайший срок при минимальных затратах труда удастся получить наибольшее количество продукции лучшего качества.

Процесс планирования выращивания сельскохозяйственной культуры выражается в виде технологической карты возделывания. Технологическая карта в растениеводстве представляет собой план агротехнических и организационно-экономических мероприятий по возделыванию одной или группы однородных по технологии сельскохозяйственных культур с расчетом себестоимости конечной продукции растениеводства [2].

Технологическая карта содержит весь процесс производства продукции, в ней приведены операции и их составные части, сырье, материалы, производственные техника, машины, оборудование и технологические режимы, необходимые для изготовления изделия время, квалификация работников. Для планирования технологической карты необходимо обладать полным набором информации об активах предприятия и ожидаемых показателях производительности от сезона выращивания.

Планирование технологической карты производится с помощью различных инструментов или в бумажном виде и может занимать до нескольких рабочих недель в зависимости от земельного банка предприятия и глубины планирования.

В статье предложен метод прогнозирования расхода материалов, топлива, использования техники и трудовых затрат на выполнение работ, предусмотренных технологической картой на выращивание посевных культур, позволяющий сократить на планирование технологических карт и распределение использования ресурсов.

**Литературный обзор.** Для сбора и хранения данных об активах предприятия используются корпоративные системы управления ресурсами. Данные системы позволяют эффективно управлять предприятием, отслеживая выполнение работ и использование различных ресурсов. В этом направлении используется множество современных технологий, таких как IoT [3] и различные веб-технологии, позволяющие внедрять и использовать элементы искусственного интеллекта в сельское хозяйство.

В существующих исследованиях интеллектуальные алгоритмы используются для прогнозирования урожайности посевных культур, продаж продукции, идентификации вредных объектов и много другого.

В своей работе [4] авторы проводят сравнение методов машинного обучения, описанные в различных исследованиях, применительно к прогнозированию погодных условий для различных целей. В результате проведенных обзоров среди наиболее точных методов авторами указываются нейронная сеть, деревья решений, случайный лес и методы нечеткого моделирования.

Подобные методы используются в работе [5] для прогнозирования продаж и цен готовой продукции растениеводства, позволяя эффективнее планировать процесс сбора и хранения зерновых культур.

Для прогнозирования урожайности помимо регрессионных методов используются методы нечеткого моделирования, такие как нечеткие когнитивные карты [6, 12]. Данная технология используется в работе [7] для повышения эффективности принятия решений, связанных с выращиванием посевных культур в условиях неопределенности, и позволяет отследить закономерности влияния управляющих воздействий на итоговый уровень урожайности культуры.

В работе [8] методы анализа данных используются для прогнозирования климата по сезонам, а результаты прогноза агрегируются с данными о выращиваемой культуре и применяемых технологиях выращивания. Это позволяет оказывать поддержку принятия решений по проведению полевых работ, рассчитывая длительность различных фаз развития культуры.

Для прогнозирования Нормализованного вегетационного индекса (англ. Normalized difference vegetation index, NDVI) используются методы линейной и квадратичной регрессии, а также нейронная сеть [9]. Получаемые в результате прогнозирования значения позволяют отслеживать временные изменения ландшафта и растительности, что позволяет более эффективно планировать площади засеивания.

В статье [10] приведен вариант использования нейронных сетей для идентификации вредных объектов в области сельского хозяйства. Данная работа описывает способ идентификации дефектов на листьях растений и определения наличия вредителей различного рода путем анализа изображений. Использование описанной системы позволяет снизить трудоемкость и уменьшить время обследования посевов, а также улучшить качество работы агрономических служб.

На основании анализа современного состояния исследований в данной области можно сделать вывод о перспективности использования машинного обучения для осуществления поддержки принятия решений при планировании технологических карт, в том числе с точки зрения эффективного распределения ресурсов, имеющихся на предприятии.

**Подготовка данных.** Выращивание сельскохозяйственных культур заключается в выполнении определенной последовательности различных технологических операций. При этом комплекс операций содержит взаимосвязанные работы, каждая из которых подготавливает условия для выполнения последующей. Порядок, приемы и средства выполнения сельскохозяйственных работ и производственный процесс в целом называются технологией и представляются в виде технологической карты.

Технологическая карта на возделывание культуры отражает:

- перечень и последовательность производственных операций, расположенных в хронологическом порядке;
- их продолжительность (допустимую) в календарных и рабочих днях;
- тип и состав агрегата;
- обслуживающий персонал;
- выработку за смену и сутки;
- расход топлива на единицу работы и каждую операцию;
- требуемое число агрегатов и механизаторов для выполнения работ в данные сроки, затраты труда и эксплуатационные затраты средств на единицу работы, на весь объем работ (по всем операциям).

Перечень операций технологической карты должен предусматривать все агротехнические приемы, которые могут способствовать повышению урожайности [2].

Объем валовой продукции, ее себестоимость, заработная плата, а также рентабельность подразделений и предприятия в целом напрямую зависят от урожайности сельскохозяйственной культуры. В ходе планирования состава и объема работ по выращиванию требуется определить потребность в семенах, удобрениях и химикатах. Величина потребности в семенах определяется в зависимости от нормы высева и площади посева, норма внесения удобрений определяется исходя из планируемого уровня урожайности, а потребность в химикатах – в соответствии с потребностью в химических обработках.

Норма выработки определяет объем работы, который должен быть выполнен одним или группой квалифицированных рабочих в единицу времени. В технологической карте нормы выработки определяются для трактористов, машинистов и исполнителей подсобных работ [2].

Имея исторические данные о результатах работ, а также понимание принципа составления технологических карт, можно сформировать обучающую выборку для прогнозирования количества ресурсов, затрачиваемых на выращивание различных видов сельскохозяйственных культур с помощью алгоритмов машинного обучения. Фрагмент такой обучающей выборки, сформированный на основе данных, полученных от агропромышленного предприятия, расположенного в Волгоградской области, представлен на рисунке 1. Данная выборка содержит фактические данные о выращивании эспарцета, пшеницы, гороха, овса, кукурузы, рапса на полях различных площадей и состоит из информации об условиях выращивания и объеме задействованных в работе ресурсов. По причине того, что исходная выборка содержит малое количество записей (около 100), набор данных был смоделирован для повышения эффективности обучения математических моделей.

Наименование работ	Объем работ		Сроки проведения		Состав агрегата		Количество человек для выполнения		Сменная норма выработки	Количество нормосмен	Затраты труда, ч-д		Тарифный разряд		Ставка за норму, руб		ФОТ, руб	
	ед. изм	кол-во	начало	раб. дней	марка	кол-во	машинисты	рабочие			машинисты	рабочие	машинисты	рабочие	машинисты	рабочие	машинисты	рабочие
Основная обработка	га	100	20,09	5	К-744Р2	1	1		14,1	7,1	7,1		V		522,95		3708,86	
Равнеспонное боронование	га	100	10,05	5	МТЗ-1221	1	1		72	1,4	1,39		V		522,95		726,32	
Летняя культивация на 8-10 см	га	100	5,06	5	МТЗ-1221	1	1		50	2	2		V		522,95		1045,9	

Рисунок 1 – Пример технологической карты в обучающей выборке

Для выявления наличия взаимозависимостей между атрибутами, присутствующими в выборке, был проведен корреляционный анализ по отношению значений атрибутов к стоимости материалов. В таблице 1 приведен результат выполнения корреляционного анализа на обучающей выборке. Для типа работ «Сев» видно, что модуль коэффициента корреляции больше 0,3, следовательно, все факторы (площадь посевной территории, фонд оплаты труда, затраты на семена, затраты на топливо, количество норм) оказывают влияние на стоимость материалов.

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа на обучающей выборке

Атрибут	Работы типа «Сев»	Работы, отличные от сева	Культивация
Площадь	0,765	0,272	0,489
ФОТ	0,580	0,073	0,807
Стоимость семян	0,995	–	–
Топливо	0,301	0,089	1
Нормы	0,649	0,072	0,807

Наиболее сильную линейную зависимость формируют затраты на семена – 0,995. Этот факт возникает, потому что в работах типа «Сев» затраты на семена могут быть до 95 % стоимости всего этапа работ. Для работ, отличных от сева, наименьшая зависимость проявляется с фактором затраты на фонд оплаты труда, всего 0,301. Рассмотренная зависимость связана с тем, что в большинстве работ на поле задействуется различная техника, которая имеет свойство ломаться и изнашивать оборудование, а также потреблять большое количество топлива, на которое уходит большинство финансовых ресурсов.

По таблице также видно, что, если обучающая выборка сформировать среди всех работ, коэффициент корреляции окажется низким. Поэтому логичным действием будет выделение из обучающей выборки данных для отдельного вида работ. Однако данное утверждение может работать только для работ, для которых количество записей велико. Таким примером может выступать «Культивация».

В этом случае топливо дает максимальный коэффициент корреляции. Это связано с тем фактом, что в работах типа «Культивация» в основном не используются другие типы материалов. В работах типа «Внесение удобрений» высокая зависимость от минеральных и органических удобрений, так как их стоимость может достигать до 96 % от общей стоимости выполнения работ этого типа. В работах, выполняемых ручным трудом, преобладает зависимость фонда оплаты труда.

Исходя из наличия такого рода корреляций в исходных данных, был произведен эксперимент по прогнозированию значений затрат на выполнение работ, входящих в технологическую карту в зависимости от площади и состояния поля, желаемой культуры и имеющихся на предприятии ресурсов.

**Описание метода.** Для проведения эксперимента по проверке гипотезы о возможности прогнозирования значений затрат на выполнение полевых работ, входящих в состав технологической карты, для каждой культуры был разработан метод последовательного формирования плана работ в технологической карте, который учитывает исторические данные проведенных работ, природно-климатические и метеорологические факторы.

На первом шаге определяется входная последовательность, содержащая нормативную информацию, статические данные, числовые признаки и категориальную информацию. Входная последовательность проходит предварительную обработку, состоящую в следующем:

- заполнение недостающих значений;
- выявление выбросов;
- сглаживание;
- трансформация Бокса – Кокса;
- объединение и масштабирование.

На втором шаге формируется первоначальная версия технологической карты. Входная последовательность, содержащая 32 элемента, подается на вход рекуррентной нейронной сети для прогнозирования этапа работ. Такое количество записей было выбрано по результатам экспериментов, в которых алгоритм показал наилучший результат именно на этой размерности входных данных. Увеличение размерности входных данных в большую сторону начинает переобучать алгоритм и снижает его точность. Метрика точности обучения алгоритма в зависимости от размера входных параметров представлена на рисунке 2. Под метрикой для последовательности понимается корректное (точное) совпадение прогнозируемого этапа работ с этапом работы согласно обучающей выборке.

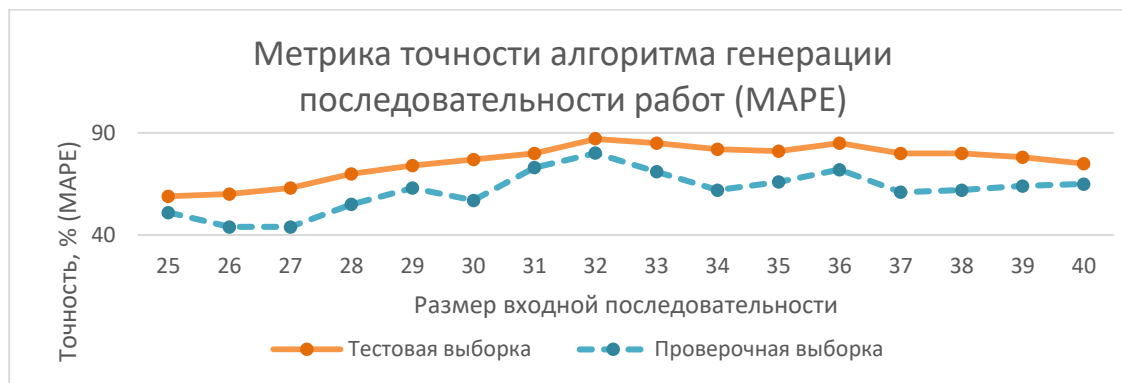


Рисунок 2 – Метрика точности алгоритма формирования последовательности этапов работ

На этапе формирования первоначальной версии технологической карты важно учитывать имеющиеся ресурсы агропромышленной компании для минимизации финансовых расходов. Алгоритм, опираясь на исторические данные, выявляет наиболее предпочтительный вариант для каждой агропромышленной компании в отдельности на основе предыдущего опыта. Количество техники и человеко-ресурсов зависит от сроков и объемов проведения работ. Важно, чтобы работа была выполнена согласно плану и с минимальными денежными затратами.

На третьем, завершающем, шаге формируется окончательная версия технологической карты. После определения всех норм и назначения техники на выполнение работ производятся расчеты стоимости ГСМ и ФОТ. Проблемой данных расчетов являются непредвиденные издержки, вызванные природно-климатическими явлениями, поломками техники и многими другими внешними факторами. Для приближения к реальной стоимости возделывания сельскохозяйственных культур использовались методы машинного обучения.

**Результаты экспериментов.** В ходе работы с непредвиденными издержками был изучен набор методов машинного обучения. Для оценки точности применяемых методов используются значения среднеквадратичной ошибки (mean squared error, MSE), корня из среднеквадратичной ошибки (root mean squared error, RMSE) и средней абсолютной ошибки (mean absolute percentage error, MAPE). Результаты обучения методов представлены в таблице 2.

Для повышения точности прогнозов было принято решение использовать ансамблевый метод – бэггинг, обобщив результаты каждого метода, и на основе их общей оценки дать окончательный прогноз. По результатам эксперимента с ансамблем моделей удалось снизить среднюю ошибку точности прогноза дополнительных расходов на 5 %, до 15,28 % (или 9 400 руб).

Таблица 2 – Оценка точности методов прогнозирования дополнительных расходов

Метод	MAE	RMSE	MAPE, %
Случайный лес	10 262,09	17 394	20,80318
Линейная регрессия	12 014,75	19 858,16	22,12624
Метод опорных векторов	10 486,52	17 623,48	20,49627
Градиентный бустинг	9 874,834	16 954,18	20,41392
Ансамбль моделей	9 400,3	16 286,16	15,28

Разработанный метод позволяет построить технологическую карту на возделывание сельскохозяйственных культур. На рисунке 3 приведены результаты план-факторного анализа спрогнозированной технологической карты. На рисунке 3 указано отклонение от прогнозируемой стоимости работы («План») и фактической стоимости работы на поле («Факт»). Согласно результатам план-факторного анализа, метод чаще ошибается в меньшую сторону, закладывая в план финансовых ресурсов меньше, чем выходит по факту выполнения работ. Такая ошибка в большинстве случаев связана с внешними факторами.

№	Название	План	Факт	Отклонение
1	Основная обработка	434010,49	402249,6	↑ 31760,89
2	Ранневесен. боронование в 2 следа	44388,4	50018,62	↓ -5630,22
3	Летняя культивация на 8-10 см	58763,6	52465,32	↑ 6298,28
4	Летняя культивация на 10-12 см	58763,6	68263,32	↓ -9499,72
5	Летняя культивация на 12-14 см	58763,6	73217,1	↓ -14453,5
6	Летняя культивация на 12-14 см	58763,6	61209,34	↓ -2445,74
7	Ранневесеннее боронование	44388,4	46188,79	↓ -1800,39
8	Протравливание семян (0,4 л/га)	2915,3	4345,9	↓ -1430,6
9	Погрузка минеральных удобрений	4515,068	8467,38	↓ -3952,312
10	Выгрузка и растаривание удобрений	2259,554	3208,34	↓ -948,786
11	Внесение удобрений	22138,04	23303,39	↓ -1165,35
12	Предпосевная культивация	58763,6	100262,45	↓ -41498,85
13	Погрузка семян	11638,198	16966,4	↓ -5328,202
14	Посев с прикатыванием	94147,27	140202,23	↓ -46054,96
15	Подвоз воды (10 км)	113741,1	157069,63	↓ -43328,53
16	Приготовление раствора (%)	2797,78	3750,98	↓ -953,2
17	Внесение гербицидов	26189,54	37282,91	↓ -11093,37
18	Подвоз воды (10 км)	11374,516	17009,45	↓ -5634,934
19	Приготовление раствора (0,04)	282,39	342,67	↓ -60,28
20	Внесение фунгицидов и инсектицидов	24761,89	39334,76	↓ -14572,87
21	Обкашивание поля	14923,59	20804,08	↓ -5880,49
22	Прямое комбайнирование	298503,17	296730,06	↑ 1773,11
23	Первичная очистка зерна	1267,5	2009,42	↓ -741,92
24	Очистка и сушка зерна	2294,18	2409,49	↓ -115,31
25	Погрузка зерна	344,76	475,3	↓ -130,54

Рисунок 3 – План-факторный анализ технологической карты

Результаты оценки точности разработанного метода генерации технологической карты представлены в таблице 3. Помимо использованных ранее оценок, в таблице приводятся значения симметричного среднего процента отклонения (symmetric mean absolute percentage error, SMAPE). Визуализация результата прогноза затрат на выполнение этапов работ в рамках технологической карты представлена на рисунке 4.

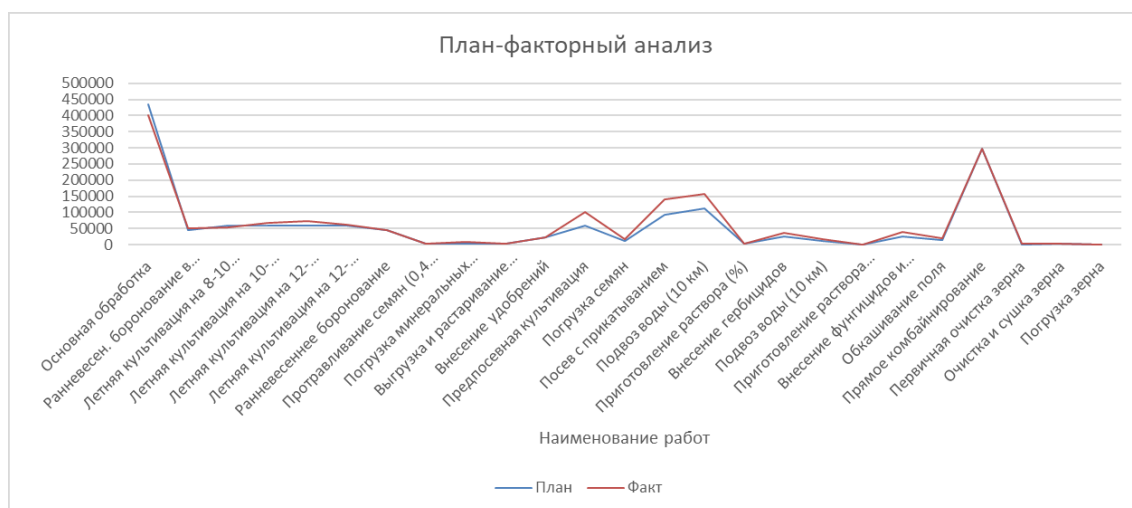


Рисунок 4 – Результаты прогнозирования разработанного метода генерации технологической карты

В ходе план-факторного анализа было выявлено, что алгоритм ошибается в среднем на 15,28 % (9400 руб.) в стоимости отдельно взятых работ, но общий размер финансовых ресурсов, заложенных в процесс возделывания сельскохозяйственных культур, в среднем отклоняется на 11,06 % (204 245 руб.), в очень редких случаях отклоняется выше, чем на 16,5 % (304 707 руб.).

Таблица 3 – Оценка точности моделей прогнозирования стоимости работ

MAE	RMSE	MAPE	SMAPE
Относительно расчета стоимости отдельно взятых работ			
9400,3	16286,16	15,28	16,61
Относительно расчета стоимости всей технологической карты			
204245,49	236585,06	11,06	12,15

**Заключение.** В данной работе описаны основные проблемы процесса планирования технологической карты на выращивание сельскохозяйственных культур, одной из которых являются высокие временные затраты.

Исследование существующих решений и методик по применению методов машинного обучения показало, что присутствует необходимость разработки метода, позволяющего спланировать технологическую карту, в том числе с точки зрения эффективного распределения ресурсов, имеющихся на предприятии.

В ходе проведенных экспериментов был разработан метод генерации технологической карты и прогнозирования расходов на выполнение работ возделывания сельскохозяйственных культур. Разработанный метод позволяет в короткие сроки сформировать первоначальный план работ с расчетом финансовых затрат. Метод показал довольно оптимистичные результаты, прогнозируя объем и стоимость работы с разницей в 12 % от фактически затраченных ресурсов.

Разработанный метод можно применять в процессе планирования, а также уже в протекающих процессах выращивания, что позволит пересчитать распределение ресурсов. Метод позволит обнаруживать и сигнализировать изменения в плане или перерасходе ресурсов в факте.

Описанная разработка позволяет осуществлять поддержку принятия решений при оценке затрат на выращивание различных культур, повышая эффективность процесса планирования технологических карт на сельскохозяйственном предприятии.

Перспективой развития данной работы является доработка описанного метода путем добавления других факторов, оказывающих влияние на использование ресурсов, с целью обеспечения возможности более глубокого планирования технологической карты.

#### Библиографический список

1. Башаров, Э. Р. Инновационные системы в агропромышленном комплексе: опыт внедрения в России и Башкирии / Э. Р. Башаров, Н. Р. Гусманов, Д. Р. Латыпова // Мавлютовские чтения : материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции : в 7 т., Уфа, 26–28 октября 2021 года. – Уфа : Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 847–852. – EDN OEGRMB.
2. Методические рекомендации по разработке организационно-технологических карт в растениеводстве : методические рекомендации / А. В. Марченко, А. Ф. Меньщикова, Т. В. Светлакова, М. К. Юшкова. – Пермь : Изд-во ФГБОУ ВО «Пермская ГСХА», 2016. – 75 с.
3. Chen, K. Intelligent Agriculture – Agricultural Monitoring and Control Management System / K. Chen, Z. Li, L. Ma, Y. Tang // Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 1146. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-43306-2\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43306-2_45).
4. Senthil Kumar, R. A study on prediction of rainfall using datamining technique / R. Sentinel Kumar, Dr. C. Ramesh // Satyabama University Chennai.
5. Mohammed, A. Al-Gunaid. Time series analysis sales of sowing crops based on machine learning methods / Mohammed A. Al-Gunaid, Maxim V. Shcherbakov, Vladislav V. Trubitsin, Alexandr M. Shumkin. – Volgograd State Technical University, 2018.
6. Kosko, B. Fuzzy cognitive maps / B. Kosko // International Journal of Man-Machine Studies. – Vol. 24 (1). – P. 65–75.
7. Аль-Гунаид, М. А. Forecasting potential yields under uncertainty using fuzzy cognitive maps / М. А. Аль-Гунаид, И. И. Салыгина, М. В. Щербаков, В. Н. Трубицин, Р. Р. Groumpos // Agriculture and Food Security. – 2021. – Vol. 10. – Article 32. – 10 p. – Режим доступа: <https://agricultureandfoodsecurity.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s40066-021-00314-9.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
8. Han, E. Climate-Agriculture-Modeling and Decision Tool: A software framework for climate risk management in agriculture / Eunjin Han, Amor V. M. Ines, Walter E. Baethgen.
9. Xingwang, F. A comparison of NDVI intercalibration methods / Fan Xingwang, Liu Yuanbo.
10. Аль-Гунаид, М. А. The System of Intelligent Identification of Harmful Objects in the Field of Agriculture / М. А. Аль-Гунаид, М. В. Щербаков, V. V. Tishchenko, В. Н. Трубицин // Creativity in Intelligent Technologies and



Data Science : 4th International Conference CIT&DS 2021 (Volgograd, Russia, September 20–23, 2021) : Proceedings / eds.: A. G. Kravets, M. Shcherbakov, D. Parygin, P. P. Groumpos ; Volgograd State Technical University [et al.]. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, 2021. – P. 177–189. – Режим доступа: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-87034-8>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. – (Book ser.: Communications in Computer and Information Science (CCIS) ; vol. 1448).

11. Al-Gunaid, M. A. Analysis a short-term time series of crop sales based on machine learning methods / M. A. Al-Gunaid, M. V. Shcherbakov, V. N. Trubitsin [et al.] // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 1083. – P. 189–200. – DOI 10.1007/978-3-030-29743-5\_15. – EDN QFVTWQ.

12. Al-Gunaid, M. A. Decision Trees based Fuzzy Rules / M. A. Al-Gunaid, M. V. Shcherbakov, V. A. Kamaev [et al.] // Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016), Tomsk, 23–26 мая 2016 года. – Tomsk : Atlantis Press, 2016. – P. 502–508. – EDN FWOJW.

### References

1. Basharov, E. R., Gusmanov, N. R., Latypova, D. R. Innovatsionnye sistemy v agropromyshlennom komplekse: opyt vnedreniya v Rossii i Bashkirii [Innovative systems in the agro-industrial complex: implementation experience in Russia and Bashkiria]. *Mavlyutovskie chteniya : materialy XV Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii : v 7 tomakh, Ufa, 26–28 oktyabrya 2021 goda.* [Mavlyutov Readings : proceedings of the XV All-Russian Youth Scientific Conference : in 7 vol., Ufa, October 26–28, 2021]. Ufa, Ufa State Aviation Technical University Publ., 2021, pp. 847–852. EDN OEGRMB.

2. Marchenko, A. V., Menshchikova, A. F., Svetlakova, T. V., Yushkova, M. K. *Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke organizatsionno-tekhnologicheskikh kart v rastenievodstve : metodicheskie rekomendatsii* [Guidelines for the development of organizational and technological maps in crop production: guidelines]. Perm, Perm State Agricultural Academy Publ., 2016. 75 p.

3. Chen, K., Li, Z., Ma, L., Tang, Y. Intelligent Agriculture – Agricultural Monitoring and Control Management System. *Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham., 2020, vol. 1146. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-43306-2\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43306-2_45).

4. Senthil Kumar, R., Ramesh, Dr. C. *A study on prediction of rainfall using datamining technique.* Satyabama University Chennai.

5. Mohammed, A. Al-Gunaid, Shcherbakov, Maxim V., Trubitsin, Vladislav V., Shumkin, Alexandr M. *Time series analysis sales of sowing crops based on machine learning methods.* Volgograd State Technical University, 2018.

6. Kosko, B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 24 (1), pp. 65–75.

7. Al-Gunaid, M. A., Salygina, I. I., Shcherbakov, M. V., Trubitsin, V. N., Groumpos, P. P. Forecasting potential yields under uncertainty using fuzzy cognitive maps. *Agriculture and Food Security*, 2021, vol. 10, article 32. 10 p. Available at: <https://agricultureandfoodsecurity.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s40066-021-00314-9.pdf>.

8. Han, E., Ines, Amor V. M., Baethgen, Walter E. *Climate-Agriculture-Modeling and Decision Tool: A software framework for climate risk management in agriculture.*

9. Xingwang, F. Yuanbo L. *A comparison of NDVI intercalibration methods.*

10. Al-Gunaid, M. A., Shcherbakov, M. V., Tishchenko, V. V., Trubitsin, V. N. The System of Intelligent Identification of Harmful Objects in the Field of Agriculture. *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science : 4th International Conference CIT&DS 2021 (Volgograd, Russia, September 20–23, 2021) : proceedings.* Cham (Switzerland), Springer Nature Switzerland AG, 2021, pp. 177–189. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-87034-8>. (Book ser.: Communications in Computer and Information Science (CCIS) ; vol. 1448).

11. Al-Gunaid, M. A., Shcherbakov, M. V., Trubitsin, V. N. [et al.] Analysis a short-term time series of crop sales based on machine learning methods. *Communications in Computer and Information Science*, 2019, vol. 1083, pp. 189–200. DOI 10.1007/978-3-030-29743-5\_15. EDN QFVTWQ.

12. Al-Gunaid, M. A., Shcherbakov, M. V., Kamaev, V. A. [et al.] Decision Trees based Fuzzy Rules. *Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016), Tomsk, May 23–26, 2021.* Tomsk, Atlantis Press, 2016, pp. 502–508. EDN FWOJW.

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

DOI 10.54398/20741707\_2023\_1\_27  
УДК 004.82

## АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕМАТИКЕ<sup>1</sup>

*Статья поступила в редакцию 08.11.2022, в окончательном варианте – 09.11.2022.*

**Козина Светлана Александровна**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, магистрант, ORCID: 0000-0003-4049-620X, e-mail: ksvetlan54@gmail.com

**Коробкин Дмитрий Михайлович**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-4684-1011, e-mail: dkorobkin80@mail.ru

**Фоменков Сергей Алексеевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9907-4488, e-mail: saf@vstu.ru

**Колесников Сергей Григорьевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, старший научный сотрудник, ORCID: 0000-0002-6910-7151, e-mail: sk375@bk.ru

Опыт использования CAI-систем показывает наличие основной проблемы – поддержанию в актуальном состоянии информационной составляющей процесса синтеза новых технических систем уделяется мало внимания, и этот процесс не автоматизирован. Накопленный к настоящему времени объем знаний в области физики настолько рассредоточен в различных патентах, научных статьях, грантах, монографиях, справочниках и энциклопедиях, что является практически необозримым для специалистов конкретных предметных областей. Требуется создать общую базу электронных источников «первичной» информации. Целью данной работы является разработка алгоритмов парсинга источников, а также описание архитектуры системы формирования единой базы знаний по физической тематике.

**Ключевые слова:** парсинг, база знаний, патент, журнальная статья, диссертация, физика, извлечение данных, поиск источника

## ARCHITECTURE OF THE SYSTEM FOR THE FORMATION OF A UNIFIED KNOWLEDGE BASE ON PHYSICAL TOPICS

*The article was received by the editorial board on 08.11.2022, in the final version – 09.11.2022.*

**Kozina Svetlana A.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, undergraduate student, ORCID: 0000-0003-4049-620X, e-mail: ksvetlan54@gmail.com

**Korobkin Dmitry M.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-4684-1011, e-mail: dkorobkin80@mail.ru

**Fomenkov Sergey A.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-9907-4488, e-mail: saf@vstu.ru

**Kolesnikov Sergey G.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, Senior Researcher, ORCID: 0000-0002-6910-7151, e-mail: saf@vstu.ru

The experience of using CAI systems shows the presence of the main problem - little attention is paid to keeping the information component of the synthesis of new technical systems up to date, and this process is not automated. The amount of knowledge accumulated to date in the field of physics is so dispersed in various patents, scientific articles, grants, monographs, reference books and encyclopedias that it is practically boundless for specialists in specific subject

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20125, <https://rscf.ru/project/22-21-20125/>, и Администрации Волгоградской области.

areas. It is required to create a common database of electronic sources of "primary" information. The purpose of this work is to develop algorithms for parsing sources, as well as a description of the architecture of the system for forming a unified knowledge base on physical topics.

**Keywords:** parsing, knowledge base, patent, journal article, dissertation, physics, data extraction, source search

#### Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** На сегодняшний день существует много апробированных, хорошо зарекомендовавших себя методов генерации новых технических решений. Это методы морфологического синтеза; теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) и ее развитие (метод FAST, функциональный анализ, СЕСА, MPV); метод функционально-стоимостного анализа; метод синтеза физического принципа действия технических систем, который существует в различных вариациях, описанных в работах А. И. Половинкина и его школы [1], М. Ф. Зарипова и его школы [2], В. Н. Глазунова и др.

Также можно сказать, что сейчас существует много автоматизированных систем, которые помогают изобретать. Это так называемые системы генерации инновационных решений (CAI-системы), такие как Goldfire Innovator, Tech Optimizer, Innovation Workbench, Idea Generator, Pro/Innovator, Knowledgegist, Idea Finder+, Новатор, Интеллект, Сапфит, созданные на основе перечисленных выше подходов. Однако их использование показывает наличие основной проблемы – поддержанию в актуальном состоянии информационной составляющей процесса синтеза новых технических систем уделяется мало внимания, и этот процесс не автоматизирован.

Таким образом, на первый план выходит не выбор конкретного метода синтеза новых технических решений, не вопрос, как именно помочь человеку изобретать, а реализация того, о чем умалчивается в вышеприведенных методах, что не реализовано в указанных системах. Например, как аккумулировать новейшие знания в технике, физике, химии и как их извлекать с помощью методов искусственного интеллекта.

Накопленный к настоящему времени объем знаний в области физики настолько рассредоточен в различных патентах, научных статьях, грантах, монографиях, справочниках и энциклопедиях, что является практически необозримым для специалистов конкретных предметных областей. Требуется создать общую базу электронных источников «первичной» информации.

Целью данной работы является разработка алгоритмов парсинга источников, а также описание архитектуры системы формирования единой базы знаний по физической тематике.

Практическая значимость данной разработки заключается в создании единого источника данных, сформированных по одной предметной области, а также в сокращении времени поиска того или иного документа в области физики.

Формирование единой базы знаний производится на основе патентов Федерального института промышленной собственности (далее ФИПС), Роспатента и United States Patent and Trademark Office (далее USPTO), научных публикаций из журналов физического профиля, реферативных журналов, а также диссертаций и авторефератов по физической тематике.

**Формат представления патентных документов.** Патентный документ – это официально публикуемый документ, подтверждающий право автора на изобретение или полезную модель. Патентные документы разделяют на первичные и вторичные. Первичные содержат в себе полное описание изобретений, а вторичные – сокращенную информацию, включающую библиографическое, реферативное и обзорное описание.

Часто патентный документ имеет следующую структуру:

- библиографическое описание;
- реферат;
- наименование;
- описание изобретения;
- чертеж.

Спецификация патента начинается с описания к изобретению. Она содержит библиографическую часть, в которой указываются сведения об объекте и области использования изобретения. Для идентификации документа используются специальные коды.

Для русскоязычных патентов указывается номер патента (код – 11), регистрационный номер заявки (21), дата подачи заявки (22), дата публикации (43), индексы международной патентной классификации (51), наименование изобретения (54), имя автора (72), патентообладателя (73).

Для USPTO – номер патента (код – 10), регистрационный номер заявки (21), дата подачи заявки (23), дата публикации (45), индексы международной патентной классификации (51), наименование изобретения (54), имя автора (76) [3].

В формуле указываются наиболее важные аспекты изобретения. Она может содержать в себе один или несколько пунктов, каждый из которых подразделяется на две части: ограничительную и отличительную. В ограничительную часть входит название изобретения и уже известные признаки развития. Отличительная часть включает в себя новые признаки, составляющие сущность изобретения.

Необязательной частью патента является реферат и чертеж [4].

**Структура журнальных статей.** Журнальная (научная) статья – это логически законченная работа, содержащая результаты деятельности автора.

Структура журнальной статьи представляет собой реферативную и основную части.

Реферативный раздел содержит основные элементы, используемые для идентификации документа, как правило, включая следующие поля:

- индекс УДК;
- заголовок статьи;
- ФИО автора;
- место работы каждого автора (ссылки);
- аннотация;
- ключевые слова, отражающие содержание текста (4–8 слов).

Индекс УДК является обязательным для оформления статьи и содержит название области науки.

Аннотация представляет краткую характеристику содержания статьи. С ее помощью можно определить основное назначение статьи.

Ключевые слова выражают смысл содержания статьи и используются для ориентации читателя в документе, а также для поиска статей в базах данных.

Основной раздел статьи содержит непосредственно саму работу:

- введение, включающее предмет и задачи, результаты предшествующих работ;
- материалы и методы;
- список литературы;
- результаты и заключение [5].

**Структура диссертаций и авторефератов.** Структура диссертации, как правило, включает в себя следующие разделы и элементы:

- введение;
- основная часть;
- заключение;
- библиографический список;
- приложения.

Во введении в общем случае описывается актуальность работы, цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, практическая значимость работы, апробация и внедрение полученных результатов, список публикаций по теме диссертации.

Основная часть представляет собой описание анализа рассматриваемой проблемы, решений, а также проектирование и разработку.

Заключение содержит в себе выводы и результаты, полученные в ходе выполнения работы.

В зависимости от содержания работы в диссертацию могут быть добавлены приложения [6].

**Алгоритм парсинга патентов.** Для извлечения элементов описания патентов используется архив с патентными массивами, скачиваемый с сайта USPTO [7, 8]. В архиве содержатся xml-документы, имеющие структуру, представленную на рисунке 1.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!DOCTYPE PATDOC SYSTEM "ST32-US-Grant-025xml.dtd" [
<!ENTITY US06834394-20041228-D00000.TIF SYSTEM "US06834394-20041228-D00000.TIF" NDATA TIF>
<!ENTITY US06834394-20041228-D00001.TIF SYSTEM "US06834394-20041228-D00001.TIF" NDATA TIF>
<!ENTITY US06834394-20041228-D00002.TIF SYSTEM "US06834394-20041228-D00002.TIF" NDATA TIF>
<!ENTITY US06834394-20041228-D00003.TIF SYSTEM "US06834394-20041228-D00003.TIF" NDATA TIF>
<!ENTITY US06834394-20041228-D00004.TIF SYSTEM "US06834394-20041228-D00004.TIF" NDATA TIF>
<!ENTITY US06834394-20041228-D00005.TIF SYSTEM "US06834394-20041228-D00005.TIF" NDATA TIF>
]>
<PATDOC DTD="2.5" STATUS="Build 20031001">
<SDOBI>
<B100>
<B110><DNUM><PDAT>06834394</PDAT></DNUM></B110>
<B130><PDAT>B2</PDAT></B130>
<B140><DATE><PDAT>20041228</PDAT></DATE></B140>
<B190><PDAT>US</PDAT></B190>
</B100>
<B200>
<B210><DNUM><PDAT>10189115</PDAT></DNUM></B210>
<B211US><PDAT>10</PDAT></B211US>
<B220><DATE><PDAT>20020703</PDAT></DATE></B220>
</B200>
<B400>

```

Рисунок 1 – Структура xml-файла

Необходимая для извлечения информация заключена в теги. Данные, используемые в работе, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Извлекаемая информация из патентов USPTO

Теги	Элемент описания патента
<B110>...</B110>	Номер патента
<B540>...</B540>	Название патента для обработки USPTO
<B140>...</B140>	Дата публикации
<B190>...</B190>	Страна, выдавшая патент
<FNM>...</FNM>	Имя автора для обработки USPTO
<B130>...</B130>	Класс МПК
<PTEXT>...</PTEXT>	Реферат для обработки USPTO
<BRFSUM>...</BRFSUM>	Заявка для обработки USPTO
<DETDESC>...</DETDESC>	Описание для обработки USPTO

Необходимые источники с описанием русскоязычных патентов [9] также представляют собой xml-документ, структура которого представлена на рисунке 2. При этом одинаковые элементы описания USPTO и русскоязычных патентов могут содержаться в различных тегах.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?><!DOCTYPE ru-patent-document SYSTEM "ru-patent-document-v1-3.dtd">
<ru-patent-document lang="ru" dtd-version="ru-patent-document-v1-3" doc-number="02438282" country="RU" k
<SDOBI lang="ru">
<B100>
<B110>02438282</B110>
<B130>C1</B130>

<B140><date>20120110</date></B140>
<B190>RU</B190>
</B100>

```

Рисунок 2 – Структура файла русскоязычного патента

Таким образом, необходимая для извлечения информация русскоязычных патентов содержится в тегах, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Извлекаемая информация из русскоязычных патентов

Теги	Элемент описания патента
<B110>...</B110>	Номер патента
<ru-b542>...</ru-b542>	Название патента для обработки русскоязычных патентов
<B140>...</B140>	Дата публикации
<B190>...</B190>	Страна, выдавшая патент
<B721>...</ B721 >	Имя автора для обработки русскоязычных патентов
<130>...</130>	Класс МПК
<abstract>...</abstract>	Реферат для обработки русскоязычных патентов
<claim-text >...</ claim-text>	Заявка для обработки русскоязычных патентов
<description >...</ description>	Описание для обработки русскоязычных патентов

Разработанный алгоритм парсинга патентов представлен на рисунках 3–4.

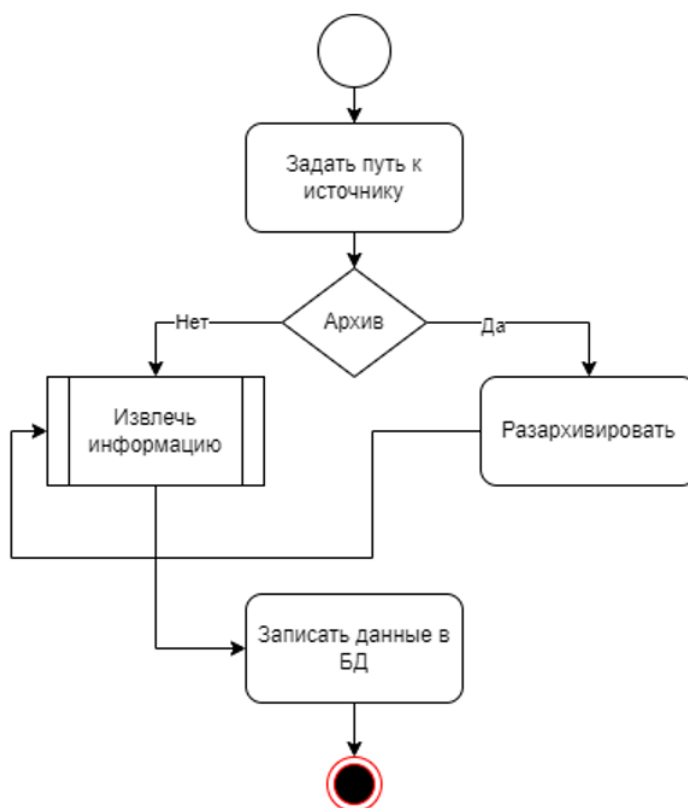


Рисунок 3 – Алгоритм парсинга патентов

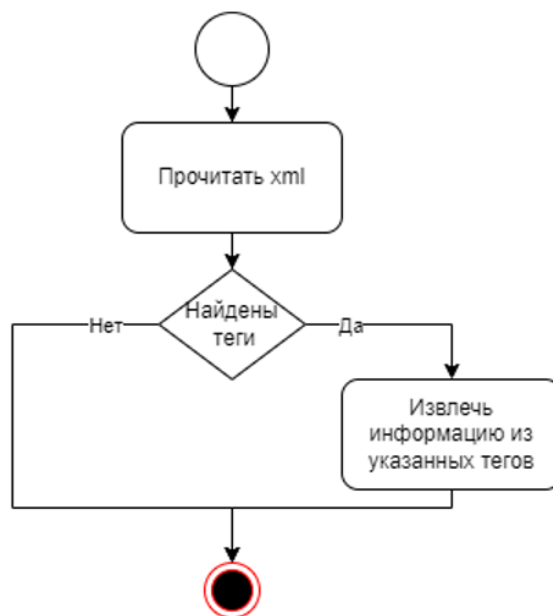


Рисунок 4 – Алгоритм извлечения информации из тегов

**Алгоритм парсинга журнальных статей.** Обработка журнальных статей существенно отличается от обработки патентов ввиду использования разных структур представления документов. Исходные данные для парсинга журнальных статей собираются с сайтов [10, 11]. Для начала извлечения информации из тегов с атрибутами (рис. 5) необходимо отправить запрос на сайт.

```

▶<nav class="cmp_breadcrumbs" role="navigation" aria-label="You are here:">...</nav>
<h1> Vol. 20 (2022) </h1>
▼<div class="obj_issue_toc">
  ▶<div class="heading">...</div>
  ▼<div class="sections">
    ▼<div class="section">
      <h2> Articles </h2>
      ▼<ul class="cmp_article_list articles">
        ▶<li>...</li>
        ▶<li>...</li>
        ▼<li>
          ::before
          ▼<div class="obj_article_summary">
            ::before
            ▼<h3 class="title">
              ▼<a id="article-9280" href="https://rajpub.com/index.php/jap/article/view/9280">
                " A Theory for Galaxy Formation: Innovative Model for Evolution of Galaxies as a Function in the Initial Cloud 2π and 4π Geometry and Acceleration "
              </a>
            </h3>
            ▶<div class="meta">...</div>
          ...
          ▶<ul class="galleys_links">...</ul> == $0
  
```

Рисунок 5 – Фрагмент кода html-страницы

Для данной работы извлекается информация, представленная в таблице 3.



Таблица 3 – Извлекаемая информация из журнальных статей

Теги и атрибуты	Элемент описания патента
'div.art_title'	Название русскоязычных статей
'h1.page_title'	Название англоязычных статей
'div.authors'	Имя автора для русскоязычных статей
'ul.authors'	Имя автора для англоязычных статей
'div.organizations'	Организация для русскоязычных статей
'span.affiliation'	Организация для англоязычных статей
'div._date_online'	Дата публикации для русскоязычных статей
'div.item published'	Дата публикации для англоязычных статей
'div.yw4_tab_0'	Абстракт для русскоязычных статей
'section.item abstract'	Абстракт для англоязычных статей
'div.art_pdf'	Ссылка на PDF

Алгоритм парсинга журнальных статей представлен на рисунках 6–8.



Рисунок 6 – Алгоритм парсинга html-файлов



Рисунок 7 – Поиск по атрибутам

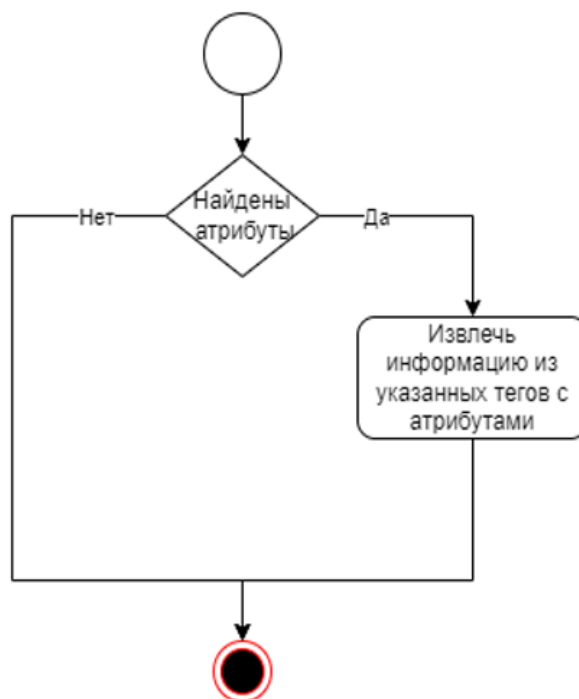


Рисунок 8 – Извлечение информации по атрибутам

**Алгоритм парсинга диссертаций.** Процесс обработки диссертаций аналогичен обработке журнальных статей. Исходные данные для парсинга диссертаций собираются с сайта [12]. Для начала проведения парсинга необходимо отправить запрос на сайт с диссертациями. Для определения, из каких тегов необходимо извлечь информацию, открывается структура страницы и выбирается нужное поле. Пример html представлен на рисунке 9.

```

    <div class= logo >
      <a href="/">...</a> flex
    </div>
    <ul class="cart-links">...</ul> flex
  </div>
  <div class="header-bottom">...</div> flex
</div>
</header>
<main id="main">
  <div class="container d-flex"> flex
    <div class="content" itemscope="itemscope" itemtype="http://schema.org/Thesis">
      <ul class="breadcrumbs" itemprop="keywords">...</ul>
      <div class="doc-preview">...</div>
    <div class="doc-contents doc-part"> == $0
      <h2>...</h2>
      <p></p>
      <p></p>
      <p>3.2 Обобщенные уравнения Гинзбурга-Ландау для неоднородной пленки</p>
      <p>3.1.2 Результаты численных расчетов.</p>
      <p>3.1.3 Заключение</p>
      <p>3.2.1 Вывод уравнений Гинзбурга-Ландау для неоднородной пленки</p>
      <p>59</p>
      <p>3.2.2 Результаты численных расчетов</p>
    </div>
  </div>
</main>

```

Рисунок 9 – Фрагмент html-страницы с диссертациями

Для данной работы извлекается информация из тегов с атрибутами, представленными в таблице 4.

Таблица 4 – Извлекаемая информация из диссертаций

Теги и атрибуты	Элемент описания патента
'b.name'	Наименование диссертации
'span.author'	Автор
'span.inSupportOf'	Академическая/ученая степень
'div.content'	Автореферат
'div.datePublished'	Год

Алгоритм парсинга диссертаций представлен на рисунках 6–8.

**Архитектура модуля.** Система формирования единой базы знаний должна состоять из следующих компонентов:

- модуля парсинга патентов;
- модуля парсинга журнальных статей;
- модуля парсинга диссертаций;
- модуля формализации данных;
- модуля визуализации.

Архитектура системы представлена на рисунке 10.

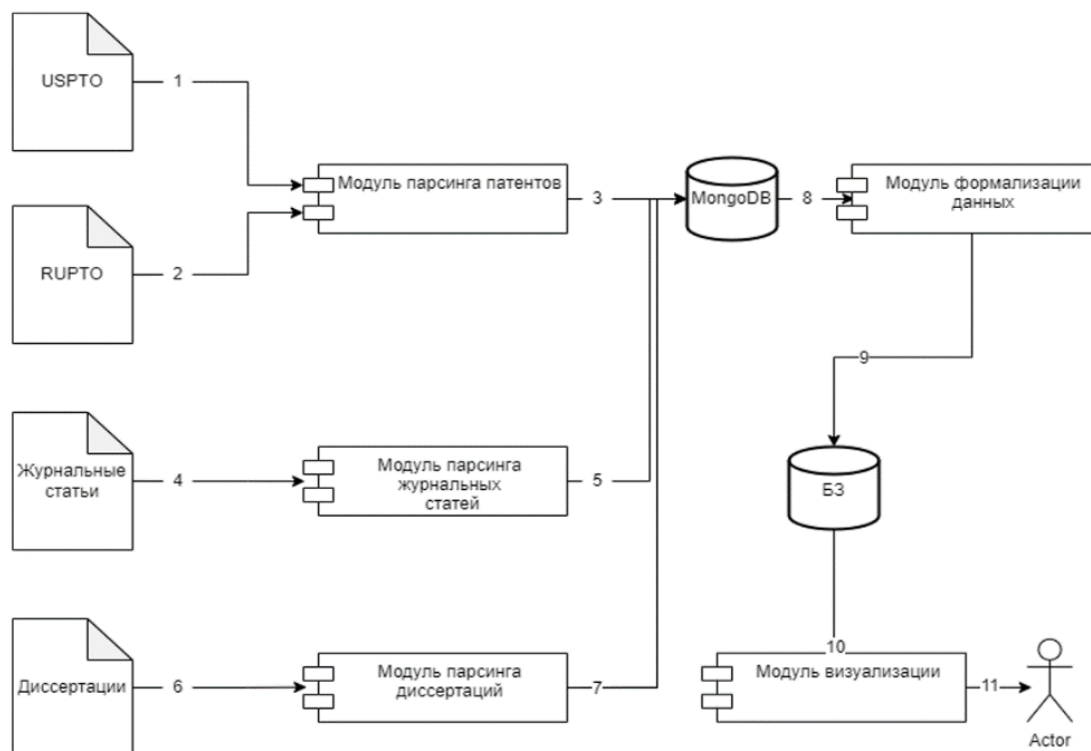


Рисунок 10 – Архитектура системы: 1, 2 – xml-файлы патентов; 3 – уникальный идентификатор и извлеченные элементы описания патентов; 4 – html-разметка страницы с журнальными статьями; 5 – уникальный идентификатор и извлеченные элементы описания журнальных статей; 6 – html-разметка страницы с диссертациями; 7 – уникальный идентификатор и извлеченные элементы описания диссертаций; 8 – уникальный идентификатор, извлеченные элементы описания документов и связи; 9 – структура с описанием документов; 10 – совокупность знаний; 11 – структурированная информация

**Заключение.** В век информационных технологий постоянно увеличивается поток данных в интернете. Рассредоточение необходимых источников влияет на время поиска того или иного документа.

В данной статье был описан первый этап создания системы формирования единой базы знаний по физической тематике: представлены алгоритмы парсинга патентов, журнальных статей и диссертаций, а также разработана архитектура системы формирования единой базы знаний по физической тематике.

#### Библиографический список

1. Зарипова, В. М. Модель развития средств автоматизации инновационных процессов (Computer Aided Innovation – CAI) / В. М. Зарипова, И. Ю. Петрова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 3. – С. 111–130.
2. Vayngolts, I. The Software and Information Complex Which Uses Structured Physical Knowledge for Technical Systems Design / I. Vayngolts, D. Korobkin, S. Fomenkov, S. Kolesnikov // CIT&DS 2019. – 2019. – Vol. 1084. – P. 42–51.
3. Нечепуренко, Ю. В. Управление интеллектуальной собственностью в Белорусском государственном университете / Ю. В. Нечепуренко // Интеллектуальная собственность в Беларуси. – 2018. – № 2. – С. 13–18.
4. Структура патента на изобретение // Научно-техническая библиотека Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. – Режим доступа: [https://library.kuzstu.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=207&Itemid=256](https://library.kuzstu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=207&Itemid=256), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 09.10.2022).
5. Структура научной статьи. – Режим доступа: <https://gum.narfu.ru/author/struktura-stati-gum.php>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.10.2022).
6. Структура диссертации. – Режим доступа: <http://firstedu.ru/struktura-dissertacii/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 13.10.2022).
7. Bulk Data Storage System (BDSS) Version 1.1.0 // USPTO. – Режим доступа: <https://bulkdata.uspto.gov/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 15.10.2022).
8. USPTO. – Режим доступа: <https://www.uspto.gov/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 15.10.2022).

9. Реестр полезных моделей Российской Федерации // Федеральный институт промышленной собственности. – Режим доступа: <https://fips.ru/registers-web/action?acName=clickRegister&regName=RUPM>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 16.10.2022).
10. Физика твердого тела. – Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/issues/2096>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 18.10.2022).
11. Journal of Advances in Physics. – Режим доступа: <https://rajpub.com/index.php/jap/issue/view/760>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 19.10.2022).
12. Электронная библиотека диссертаций. – Режим доступа: <https://www.dissercat.com/catalog/fiziko-matematicheskie-nauki/fizika>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 24.10.2022).

#### References

1. Zaripova, V. M., Petrova, I. Yu. Model razvitiya sredstv avtomatizatsii innovatsionnykh protsessov [Model of development of automation of innovative processes] (Computer Aided Innovation – CAI). *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2012, no. 3, pp. 111–130.
2. Vayngolts, I., Korobkin, D., Fomenkov, S., Kolesnikov, S. The Software and Information Complex Which Uses Structured Physical Knowledge for Technical Systems Design. *CIT&DS 2019*, 2019, vol. 1084, p. 42–51.
3. Nechepurenko, Yu. V. Upravlenie intellektualnoy sobstvennostyu v Belorusskom gosudarstvennom universitete [Intellectual Property Management at the Belarusian State University]. *Intellektualnaya sobstvennost v Belarusi* [Intellectual property in Belarus], 2018, no. 2, pp. 13–18.
4. Struktura patenta na izobrenenie [Structure of the patent for the invention]. *Nauchno-tekhnicheskaya biblioteka Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni T.F. Gorbacheva* [Scientific and Technical Library of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University]. Available at: [https://library.kuzstu.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=207&Itemid=256](https://library.kuzstu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=207&Itemid=256) (accessed 09.10.2022).
5. *Struktura nauchnoy stati* [Structure of the scientific article]. Available at: <https://gum.narfu.ru/author/struktura-stati-gum.php> (accessed 12.10.2022).
6. *Struktura dissertatsii* [The structure of the dissertation]. Available at: <http://firstedu.ru/struktura-dissertacii/> (accessed 13.10.2022).
7. Bulk Data Storage System (BDSS) Version 1.1.0. *USPTO*. Available at: <https://bulkdata.uspto.gov/> (accessed 10.10.2022).
8. USPTO. Available at: <https://www.uspto.gov/> (accessed 15.10.2022).
9. Reestr poleznykh modeley Rossiyskoy Federatsii [Register of Utility Models of the Russian Federation]. *Federalnyy institut promyshlennoy sobstvennosti* [Federal Institute of Industrial Property]. Available at: <https://fips.ru/registers-web/action?acName=clickRegister&regName=RUPM> (accessed 16.10.2022).
10. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. Available at: <https://journals.ioffe.ru/issues/2096> (accessed 18.10.2022).
11. *Journal of Advances in Physics*. Available at: <https://rajpub.com/index.php/jap/issue/view/760> (accessed 19.10.2022).
12. *Elektronnaya biblioteka dissertatsiy* [Electronic library of dissertations]. Available at: <https://www.dissercat.com/catalog/fiziko-matematicheskie-nauki/fizika> (accessed 24.10.2022).

УДК 004.001

**ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ  
ОНЛАЙН-ЗАПИСИ КЛИЕНТОВ КОМПАНИИ В СФЕРЕ УСЛУГ**

*Статья поступила в редакцию 22.10.2022, в окончательном варианте – 18.12.2022.*

**Коломина Марина Владимировна**, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и информатики, ORCID: 0000-0001-7997-7807 0, e-mail: mkolomina2014@gmail.com

**Щербakov Олег Александрович**, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, магистрант, ORCID: 0000-0002-3775-0468, e-mail: oshcherbakov2018@mail.ru

В статье представлена информационная система для компании, деятельность которой связана со сферой услуг. Система позволяет управлять процессом онлайн-записи клиента на оказание услуги. Во многих аналогичных системах для внесения изменений в свою запись клиенту необходимо связываться с администратором, например по телефону. В данной системе осуществить запись, изменить ее или отменить совсем может как сам клиент, так и администратор компании. Действия каждой из сторон сразу отображаются в системе, что экономит время всем пользователям и упрощает работу администратора. Клиент и администратор имеют различный набор возможностей управления. Информационная система является веб-приложением, рассмотрены особенности его разработки: проектирование базы данных, создание RestAPI. Для реализации веб-приложения на серверной части был использован фреймворк NestJS, на клиентской части библиотеки – React и Redux.

**Ключевые слова:** веб-приложение, информационная система, автоматизация записи, сфера услуг, клиент, администратор, NestJS, React, MongoDB, Node.js

**INFORMATION SYSTEM FOR MANAGING THE RECORD OF CUSTOMERS  
OF THE COMPANY IN THE SERVICE SECTOR**

*The article was received by the editorial board on 22.10.2022, in the final version – 18.12.2022.*

**Kolomina Marina V.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Informatics, ORCID: 0000-0001-7997-7807 0, e-mail: mkolomina2014@gmail.com

**Shcherbakov Oleg A.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, undergraduate student, ORCID: 0000-0002-3775-0468, e-mail: oshcherbakov2018@mail.ru

The article presents an information system for a company whose activities are related to the service sector. The system allows you to manage the process of online registration of a client for the provision of a service. In many similar systems, in order to make changes to their record, the client must contact the administrator, for example by phone. In this system, both the client and the administrator of the company can make a record, change it, or completely cancel it. The actions of each of the parties are immediately displayed in the system, which saves time for all users and simplifies the work of the administrator. The client and administrator have a different set of control options. The information system is a web application, the features of its development are considered: database design, creation of RestAPI. To implement the web application on the server side, the NestJS framework was used, on the client side of the React and Redux libraries.

**Keywords:** web application, information system, record automation, service industry, client, administrator, NestJS, React, MongoDB, Node.js

**Введение.** В настоящее время существует множество различных компаний, деятельность которых связана со сферой услуг. Данная сфера довольно широка и включает в себя различные виды услуг: спортивные, оздоровительные, медицинские, парикмахерские, маникюрные, репетиторские, услуги фотографа, юриста, транспортные услуги, различные виды ремонта, уборка квартир, туризм и т.д. Во всех компаниях требуется вести учет и запись клиентов, формировать базу клиентов, оказанных услуг, составлять отчеты. Автоматизировать процесс взаимодействия фирмы и клиентов, анализировать эффективность работы позволяет информационная система (ИС). Ее наличие – это требование рынка. Некоторые системы управления взаимоотношениями с клиентами представлены

в материалах Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы и возможности использования цифровых технологий в науке, образовании и управлении» [1]. Так, авторы Г. С. Гашимова, В. А. Черкасова [2] описывают информационную систему для туроператора.

Существуют готовые сервисы, позволяющие автоматизировать запись клиентов. Например, сервис онлайн-записи и привлечения новых клиентов в сфере красоты BeautyLook [3] или сервис Napriem.com [4]. Однако эти сервисы не учитывают специфику компании. Возникает необходимость разработки собственной ИС с более широким функционалом, которая позволяет осуществить запись на оказание услуги, с одной стороны, самому клиенту, а с другой – администратору компании.

Разработана ИС, где содержатся взаимосвязанные подсистемы: личный кабинет клиента и подсистема администратора.

Для личного кабинета реализовано:

- аутентификация пользователя;
- профиль пользователя;
- автоматизация записи на услугу;
- возможность просматривать активные записи;
- просмотр архива записей.

Для подсистемы администратора реализовано:

- настройка графика оказываемых услуг (день, месяц, время, число клиентов);
- возможность администратора взаимодействовать с личным кабинетом клиента;
- возможность просматривать информацию обо всех клиентах, зарегистрированных в системе;
- возможность записать, изменить, перенести, удалить запись клиента на услугу.

Рассмотрим подробнее разработанную информационную систему. При создании ИС важно правильно выбрать технологии и инструменты реализации. В данном проекте использовалась архитектура «клиент-сервер».

В качестве языка программирования был выбран JavaScript. JavaScript долгое время широко использовался при создании клиентской части сайта (frontend разработка), но в последнее время благодаря программной платформе NodeJS, основанной на движке V8, появилась возможность использовать JavaScript вне браузера, например, для серверной части (backend разработка). Таким образом, можно разрабатывать как frontend, так и backend, используя один язык программирования.

Для ускорения и упрощения разработки серверного приложения на NodeJS был выбран фреймворк NestJS. Этот фреймворк полностью поддерживает язык Typescript. Сервер построен в соответствии с архитектурным стилем REST (Representational State Transfer – «передача репрезентативного состояния») API [5, с. 2]. Другими словами, REST – это набор правил того, как программисту организовать написание кода серверного приложения, чтобы все системы легко обменивались данными и приложение можно было масштабировать. Далее информация излагается на основе источника [5, с. 8–11]. Основными строительными блоками архитектуры Rest являются ресурсы (resource). Ресурс – это абстракция, которая определяет то, что она будет предоставлять. Структура ресурса представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Структура ресурса

Свойство	Описание
Способ представления данных	Для представления данных можно использовать JSON, XML и другие форматы
Идентификатор	Идентификатор ресурса должен однозначно ссылаться на ресурс в любой момент времени
Метаданные	Заголовок-сущность Content-Type, время последнего изменения и др.

Для ИС важно правильно определить ресурсы, которые будут отвечать архитектурному стилю Rest API. В данной ИС всего 5 ресурсов: users (пользователи), auth (аутентификация), appointments (информация об услугах), profile (профиль пользователя), records (записи пользователя на оказание услуг). В качестве способа представления данных используется JSON, так как он удобочитаемый для человека и в файле JSON очень мало данных, не связанных напрямую с передаваемой информацией. Это основные преимущества JSON-формата над XML.

Связь между клиентом и сервером должна быть выстроена с помощью HTTP-протокола особым образом. Каждый запрос, сделанный от клиента, должен содержать полную информацию, необходимую для того, чтобы сервер определил, какое действие хочет сделать клиент без использования каких-либо сохраненных данных. Для доступа к ресурсам необходимо определить конечные точки (endpoints). В качестве корневой конечной точки выступает /api/v1. Тогда, например, для доступа к ресурсу users можно использовать следующий URI (Unique Resource Identifier): GET



/api/v1/users, для appointments URI будет: GET /api/v1/appointments и т.д. Представленные идентификаторы однозначно ссылаются на соответствующие ресурсы в любой момент времени.

Для каждого ресурса есть общий набор операций CRUD (create, read, update, delete), которые он может предоставлять. Существуют и другие операции, которые клиентское приложение может выполнять с ресурсами, они зависят от возможностей, которые предоставляет API. Для конкретной операции можно сопоставить определенный HTTP-метод (табл. 2).

Таблица 2 – Соответствие операций и HTTP-методов

HTTP-метод	Операция
GET	Получение ресурса только для чтения
POST	Добавление нового ресурса
PUT	Изменение существующего ресурса
DELETE	Удаление ресурса

На рисунке 1 представлена схема обмена данными между клиентским и серверным приложением в соответствии с архитектурным стилем REST.

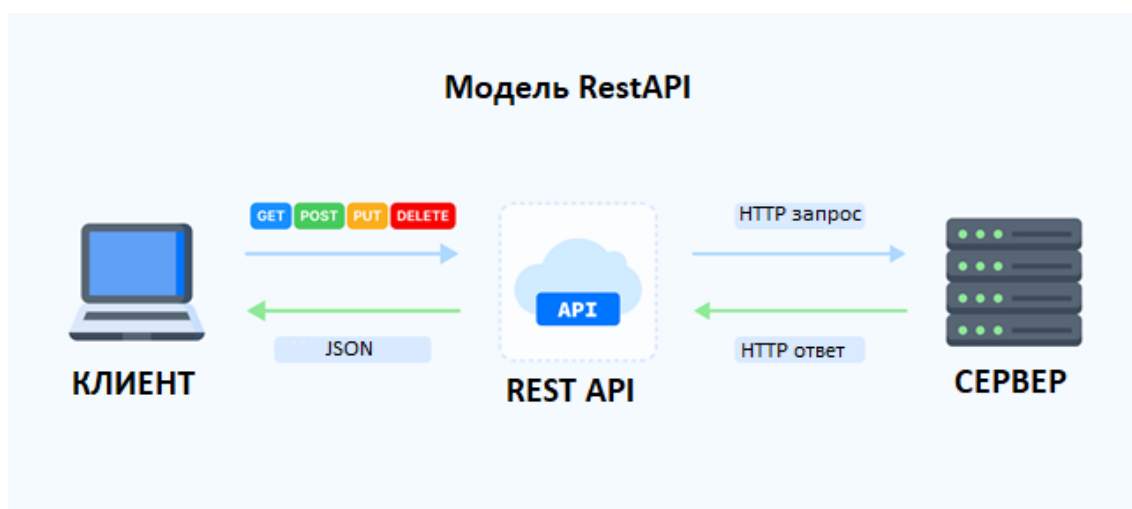


Рисунок 1 – Архитектурный стиль RestAPI

Количество клиентов компании может быть очень большим, поэтому важно выбрать СУБД с высокой производительностью и простой масштабируемостью. Всем этим требованиям удовлетворяет СУБД MongoDB. Кайл Бэнкер в своей книге «MongoDB в действии» приводит описание возможных причин использования MongoDB: «MongoDB – это СУБД, «заточенная» под веб-приложения и инфраструктуру интернета. Модель данных и стратегия их постоянного хранения спроектированы для достижения высокой пропускной способности чтения и записи и обеспечивает простую масштабируемость с автоматическим переходом на резервный ресурс в случае отказа». Данная СУБД типа NoSQL имеет интуитивно понятную модель данных и использует документно-ориентированную модель для представления иерархически организованных структур данных, поэтому большая часть информации может быть представлена в виде одного документа в виде JSON-подобной структуры. Простая масштабируемость, высокая скорость работы, автосегментирование, репликация определяют использование MongoDB в информационной системе [6].

В MongoDB не нужно использовать строгую нормализацию как в СУБД типа SQL (нормализация – это разнесение данных объекта по нескольким таблицам). Модель базы данных представлена на рисунке 2. В коллекции User хранится информация о клиентах, в коллекции Appointments – информация об услугах на каждый день. В коллекции Personal Records – записи клиента на оказание услуги. В коллекции Token – токен обновления для конкретного пользователя.

В NestJS для обработки HTTP-запросов используются контроллеры (controllers). Контроллеры делегируют более сложные задачи провайдерам (providers), в качестве которых выступают сервисы (services). Так как в Nest используется паттерн Dependency Injection (внедрение зависимостей), провайдеры можно внедрить как внешние зависимости в другие классы.

Для создания модели базы данных на серверной части используется ODM (Object Document Mapper – объектно-документный отображитель) mongoose. Он позволяет определять объекты со строго-типизированной схемой, соответствующей документу MongoDB. Описание схем в NestJS

происходит с использованием специальных декораторов. К классу, который описывает схему, необходимо прикрепить декоратор `@Schema()`. К каждому полю класса прикрепляется декоратор `@Prop()` для описания свойств. Экспортировать класс необходимо с помощью функции `createForClass`, которую предоставляет класс `SchemaFactory`. Пример описания схемы коллекции `User` представлен на рисунке 2.

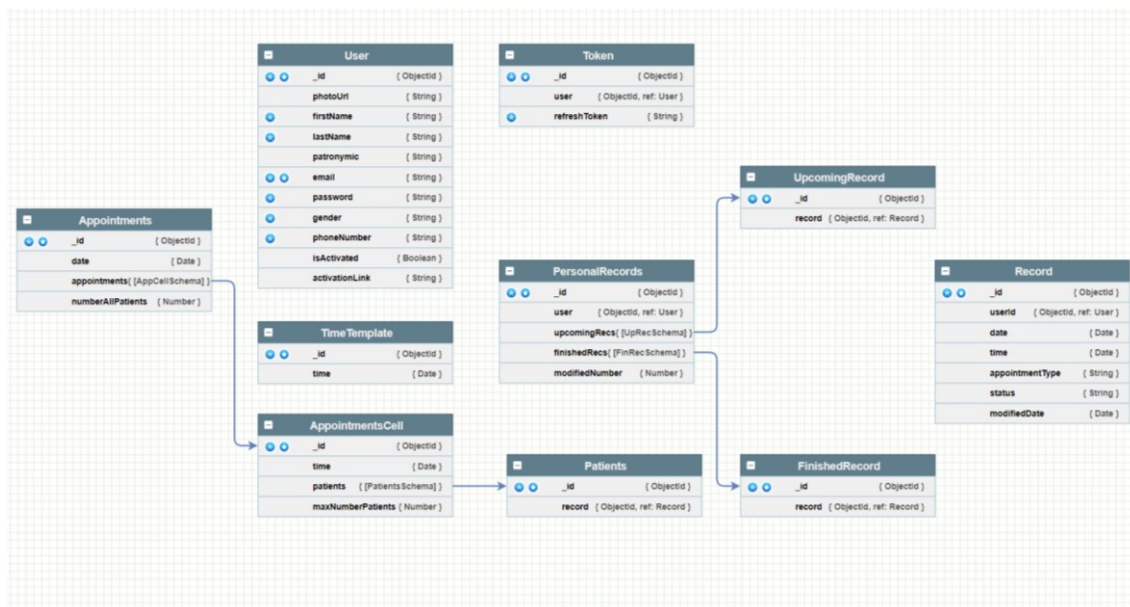


Рисунок 2 – Модель базы данных

```
@Schema()
export class User {
  @Prop({ required: true })
  firstName: string
  @Prop({ required: true })
  lastName: string
  @Prop()
  patronymic: string
  @Prop({ required: true, unique: true })
  email: string
  @Prop({ required: true })
  password: string
}
export const UserSchema = SchemaFactory.createForClass(User)
```

После создания схемы необходимо внедрить модель `User` в сервис `UserService` с помощью декоратора `@InjectModel()`:

```
@Injectable()
export class UserService {
  constructor(@InjectModel(User.name) private userModel: Model<UserDocument>) {}
}
```

В `UserService`, используя модель, можно делать определенные действия, например, создать нового пользователя, найти пользователя по уникальному идентификатору и т.д. Подробнее об этом можно найти в официальной документации [7].

Фреймворк `NestJS` позволяет использовать множество модулей, которые он предоставляет «из коробки». В частности, аутентификация пользователей реализована с использованием специальных модулей `NestJS`, которые основаны на популярной библиотеке для аутентификации `Passport`. Клиент личного кабинета может войти в систему и зарегистрироваться (рис. 3). Чтобы реализовать подобную логику, необходимо определить две конечные точки на сервере, на которые необходимо делать запрос с клиентской части.

Для аутентификации популярным решением являются токены доступа JWT (JSON Web Token). Один из возможных вариантов использования токенов следующий: после регистрации или успешного входа в систему на сервере генерируется и отправляется в качестве ответа два токена: токен доступа и токен обновления. Токен доступа записывается в хранилище на клиентской части, а токен обновления записывается на сервере в HTTP Cookie с флагом `httpOnly`, который указывает на запрет чтения и записи данных Cookie посредством языка JavaScript. В случае если при обращении клиента к серверу токен доступа прошел проверку на валидность и время его жизни не истекло, то пользователь получит доступ к серверу. Иначе серверное приложение ответит ошибкой, клиентское приложение обработает ее и, используя `interceptor` (перехватчик), попытается запросить у сервера новую пару токенов. Реализовать перехватчик проще всего, используя уже готовые решения, в частности библиотека `axios` предоставляет такую возможность. Пример реализации логики аутентификации подробно описан в официальной документации NestJS [8].

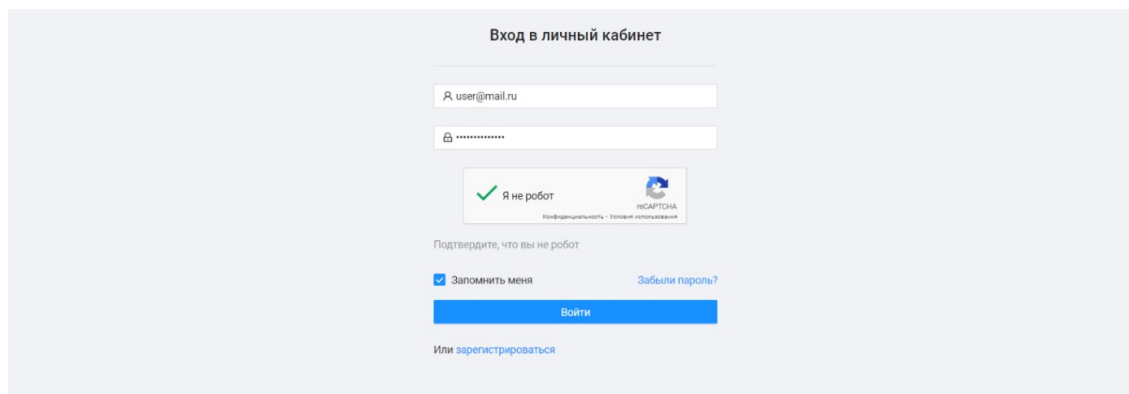


Рисунок 3 – Вход в личный кабинет

Имеет смысл сделать отдельно клиентскую часть для клиента и администратора компании. Для личного кабинета клиента использовалась библиотека `React – JavaScript`-библиотека для создания пользовательских интерфейсов и библиотека для управления состоянием приложения `Redux`.

Страницы входа и регистрации содержат формы с обязательными полями. Перед отправкой данных на сервер важно убедиться, что все поля форм заполнены данными в корректном формате. Это называется валидацией на стороне клиента и помогает убедиться, что данные, введенные в каждый элемент формы, соответствуют требованиям. Для валидации введенных значений на клиентской части используется библиотека `uip`. В случае, когда данные введены правильно, отправляется `POST`-запрос на сервер для регистрации или входа пользователя. Иначе пользователь получает сообщение о неправильно введенных данных. Обнаружение некорректных данных на стороне клиента позволяет пользователю немедленно их исправить.

Для записи на услугу клиент в личном кабинете переходит на вкладку «Услуги» и выбирает дату. При этом отправляется запрос на ресурс `appointments` для получения информации об услугах на эту дату. Сервер обрабатывает запрос и отправляет ответ, в котором содержится информация о свободном времени для записи (рис. 4).

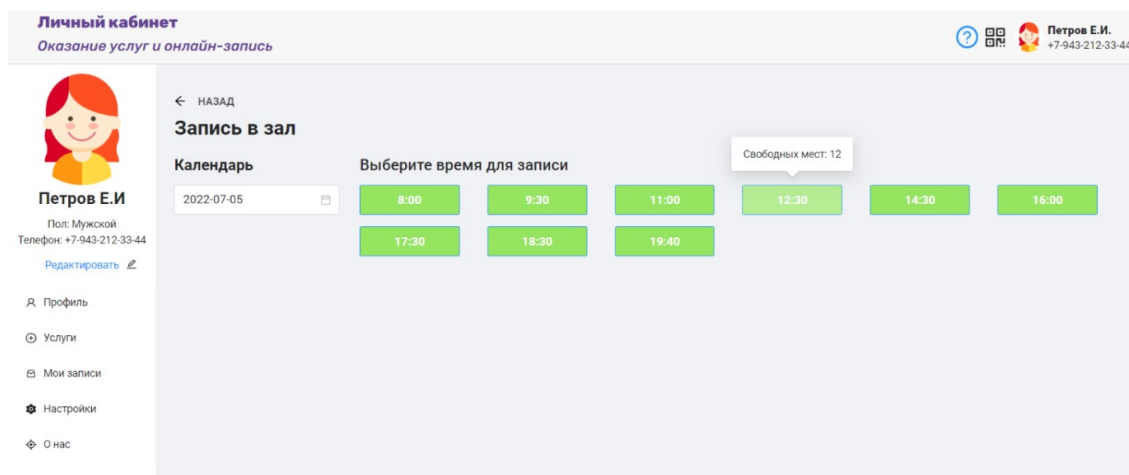


Рисунок 4 – Страница выбора времени оказания услуги

Когда клиент записывается на услугу, отправляется PUT-запрос, при этом в тело запроса помещается информация о времени, дате, типе услуги.

Чтобы получить все записи клиента, необходимо отправить GET-запрос на сервер (GET /api/v1/records), при этом в качестве query-параметров не нужно указывать уникальный идентификатор пользователя, для которого нужно вернуть записи, так как сервер может взять эту информацию из полезной нагрузки (payload) JWT-токена. Записи клиента отображаются во вкладке «Мои записи» (рис. 5).

В личном кабинете клиента находятся контактные данные компании (адрес, телефон) и актуальный список услуг с ценами. Более подробно описание алгоритмов создания клиентской части представлено в работе [9].

Все данные в личном кабинете клиента и в системе администратора синхронизированы, так как используется единый сервер.

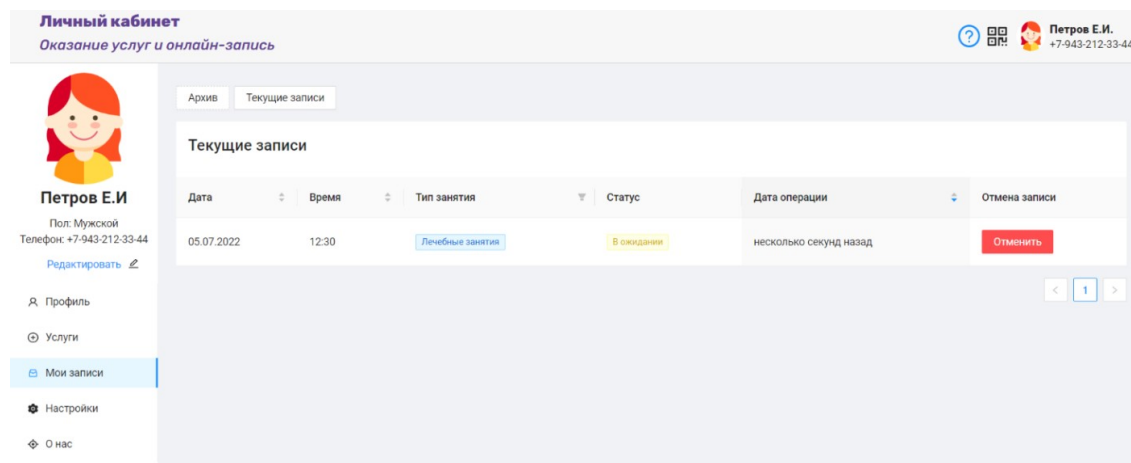


Рисунок 5 – Записи клиента

Для системы администратора использовалась библиотека React Admin. React Admin – это фреймворк для разработки интерфейсов администратора путем взаимодействия с API. Чтобы связать клиент системы администратора и сервер, необходимо создать некоторый промежуточный слой (Data Provider), который будет представлять данные в том виде, в котором его ожидает React Admin (рис. 6).

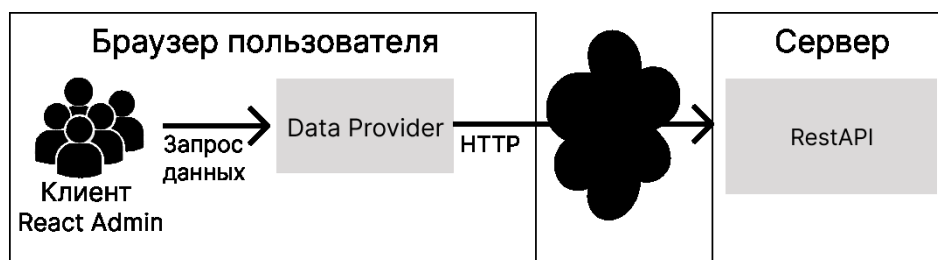


Рисунок 6 – Промежуточный слой Data Provider для взаимодействия React Admin и сервера

Часть кода Data Provider представлена ниже:

```
import { fetchUtils } from 'react-admin';
import { stringify } from 'query-string';
const apiUrl = process.env.REACT_APP_API_URL;
const httpClient = fetchUtils.fetchJson;
const withIdField = (inObject) => {
  let outObject

  if (typeof inObject !== 'object' || inObject === null) {
    return inObject
  }
  outObject = Array.isArray(inObject) ? [] : {}
```

```

for (let key in inObject) {
  const value = inObject[key]
  outObject[key] = withIdField(value)
  if (key === '_id') {
    outObject['id'] = outObject[key]
  }
}
return outObject
}
export default {
  getList: (resource, params) => {
    const { page, perPage } = params.pagination;
    const { field, order } = params.sort;
    const query = {
      sort: JSON.stringify([field, order]),
      range: JSON.stringify([(page - 1) * perPage, page * perPage - 1]),
      filter: JSON.stringify(params.filter),
    };
    const url = `${apiUrl}/${resource}?${stringify(query)}`;
    return httpClient(url).then(({ headers, json }) => {
      const data = withIdField(json)
      return {
        data: data,
        total: parseInt(headers.get('content-range')
          .split('/').pop(), 10),
      }
    })
  }
});

```

Библиотека React Admin требует, чтобы все данные, приходящие с сервера, содержали обязательное поле id. Для этой цели была создана рекурсивная функция withIdField, которая рекурсивно проходит по объекту и создает поле id, равное существующему полю \_id, полученному из Mongo.

Согласно документации React Admin, необходимо описать ресурсы для пользовательского интерфейса. Ресурс – это компонент, имеющий обязательное свойство name, которое отвечает за название точки доступа API на сервере. С помощью свойств list, edit, show указываются компоненты для списка записей, редактирования и отображения записи соответственно. Пример объявления ресурса Appointments ниже:

```

function App() {
  return (
    <Admin title="My Custom Admin" dataProvider={dataProvider}>
      <Resource name="appointments" options={{label: 'Записи'}} list={AppointmentList}
edit={AppointmentEdit} show={AppointmentShow}/>
    </Admin>
  );
}

```

В компонентах AppointmentList, AppointmentEdit, AppointmentShow описаны соответствующие пользовательские интерфейсы. Часть кода файла AppointmentShow представлена ниже:

```

export const AppointmentShow = props => (
  <Show
    title="Запись"
    {...props}
  >
    <SimpleShowLayout>
      <CustomDateField source="date" label="Дата"/>
      <ArrayField source="appointments" label="Расписание на этот день">
        <Datagrid bulkActionButtons={false} >
          <FunctionField label="Время" render={record => format(new Date(record['time']), 'HH:mm',
{locale: ru})}/>
          <FunctionField label="Количество клиентов" render={record => record.patients.length} />
          <PatientInfo source={'treatment'} label={'Лечебные занятия'} />
        </Datagrid >
      </ArrayField >
    </SimpleShowLayout>
  </Show >
)

```

```

        <PatientInfo source={'physicalTraining'} label={'Физкультурно-оздоровительные
занятия'}/>
    </Datagrid>
    </ArrayField>
    <NumberField source="numberAllPatients" label="Общее количество клиентов"/>
</SimpleShowLayout>
</Show>
);
    
```

Компонента <Show> обрабатывает логику страницы показа ресурса:

- извлекает запись с помощью dataProvider.getOne();
- создает RecordContext;
- отображает дочерние компоненты.

Компонента <Show> по умолчанию не отображает никаких полей, она делегирует это своим дочерним элементам. Компонента <SimpleShowLayout> получает запись из RecordContext и отображает на экране поля в столбик. Вложенные в <SimpleShowLayout> компоненты отображают поля с соответствующим типом.

Пользовательский интерфейс компонента <AppointmentShow> представлен на рисунке 7.

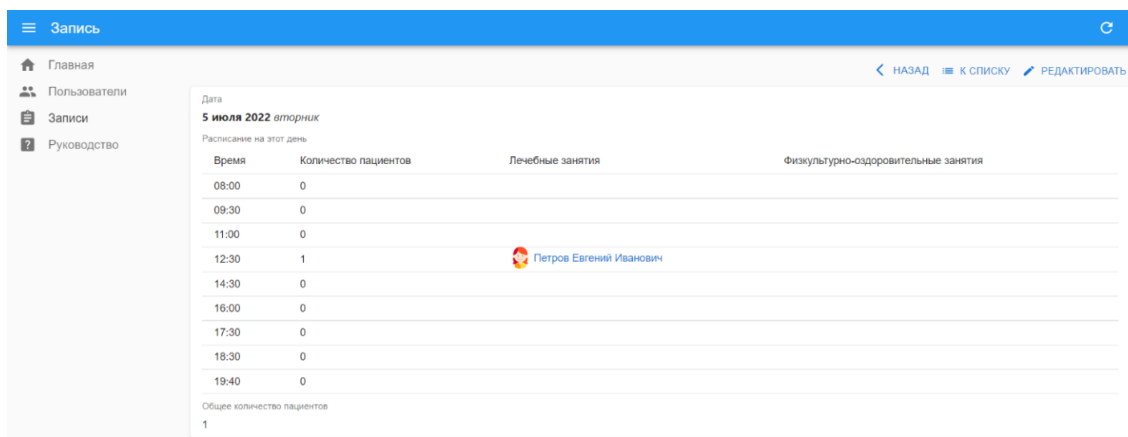


Рисунок 7 – Система администратора

В системе администратора на странице «Записи» находится календарный список, в котором содержится краткая информация об услугах на каждый день (рис. 8). Список записей отображает компонента <AppointmentList>.

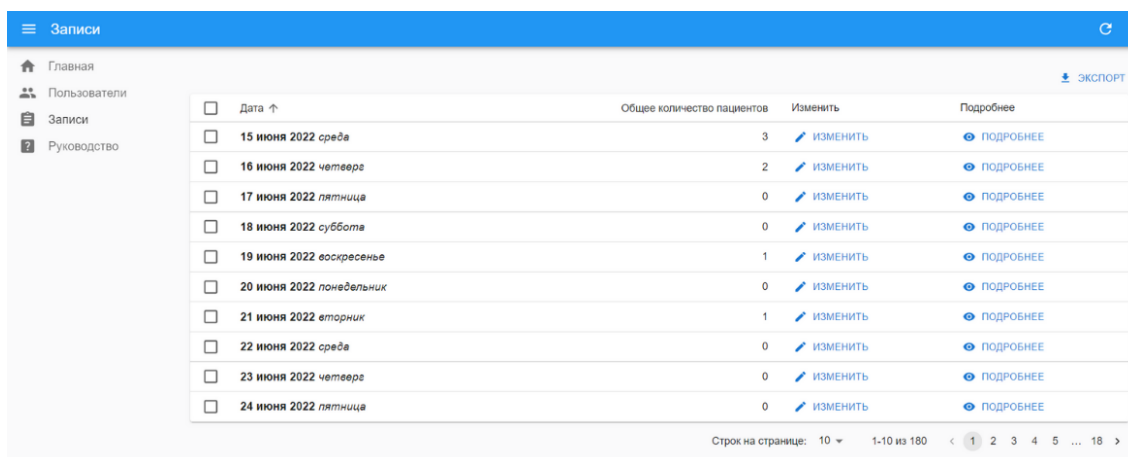


Рисунок 8 – Страница с календарным списком записей

Администратор может изменить время оказания услуги, добавить новое время, установить максимальное количество клиентов (рис. 9). Поля для изменения отображает компонента <AppointmentEdit>.

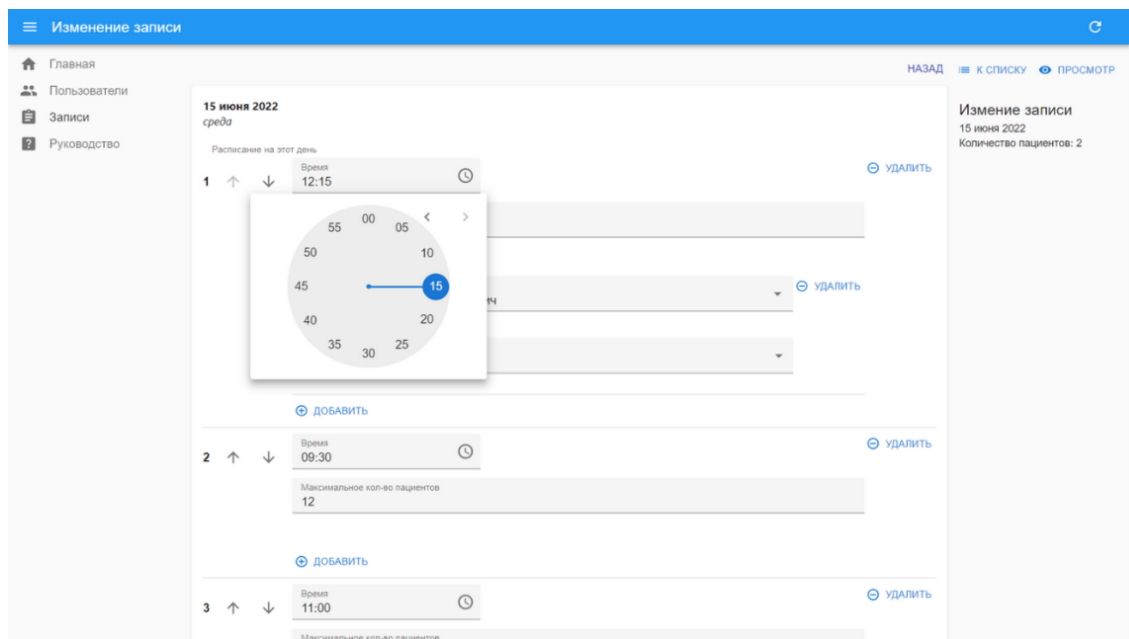


Рисунок 9 – Изменение времени занятия

Все изменения, проведенные администратором, отображаются в личном кабинете клиента. Полная схема ИС изображена на рисунке 10.

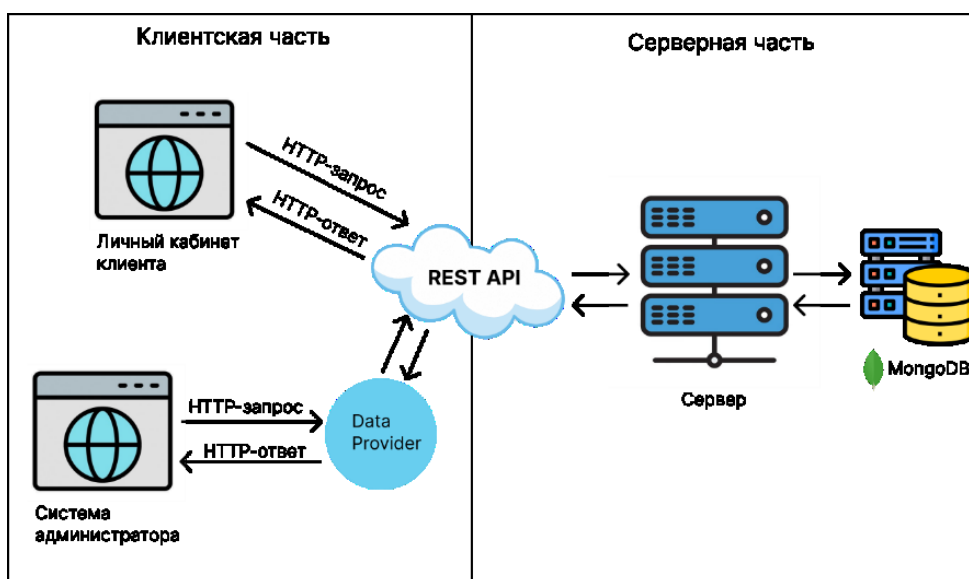


Рисунок 10 – Полная схема ИС

**Заключение.** В представленной информационной системе реализованы: аутентификация пользователей, автоматизация записи на занятия. Проект построен на клиент-серверной архитектуре с использованием архитектурной технологии Rest. Данный подход дает ряд преимуществ: добавление нового функционала в информационную систему, ее масштабируемость.

Система имеет интуитивно понятный интерфейс, предоставляет клиенту возможность самостоятельно записаться, перенести, отменить оказание услуги в любое время. В системе отображается свободное время для записи на услугу, присутствует архив оказанных услуг, формируется база клиентов. Кроме того, администратор видит уведомления об изменениях, которые произвел клиент, имеет возможность управлять записью клиентов на услуги, размещать информацию с перечнем услуг, настраивать время оказания услуг.

Размещение созданной информационной системы на сайте компании позволит:

- привлекать новых клиентов;
- облегчить работу администратора;
- сделать процесс записи клиента на услугу более комфортным и быстрым.



**Библиографический список**

1. Перспективы и возможности использования цифровых технологий в науке, образовании и управлении : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Астрахань, 2022. – 222 с.
2. Гашимова, Г. С. Информационно-поисковая система бронирования баз отдыха Астраханской области для туроператора как модель системы массового обслуживания / Г. С. Гашимова, В. А. Черкасова // Перспективы и возможности использования информационных технологий в науке, образовании и управлении : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 10–14.
3. Онлайн-запись для бьюти-мастера // BeautyLook. – Режим доступа: <https://beautylook.online/ru/business/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.07.2022).
4. Ведение клиентской базы // napriem. – Режим доступа: <https://napriem.com/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 02.07.2022).
5. Fernando Doglio. Pro REST API Development with Node.js // Apress. – 2015. – С. 2–11.
6. Кайл Бэнкер. MongoDB в действии // ДМК Пресс. – 2012. – С. 22–50.
7. Providers // NestJS. – Режим доступа: <https://docs.nestjs.com/providers>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 03.07.2022).
8. Authentication // NestJS. – Режим доступа: <https://docs.nestjs.com/security/authentication>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 02.07.2022).
9. Щербаков, О. А. Создание личного кабинета клиента в информационной системе ООО «Здоровье» / О. А. Щербаков // Перспективы и возможности использования цифровых технологий в науке, образовании и управлении : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Астрахань, 2022. – С. 192–197.

**References**

1. *Perspektivy i vozmozhnosti ispolzovaniya tsifrovyykh tekhnologiy v nauke, obrazovanii i upravlenii: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects and opportunities for using digital technologies in science, education and management : collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference]. Astrahan, 2022. 222 p.
2. Gashimova, G. S., Cherkasova, V. A. Informatsionno-poiskovaya sistema bronirovaniya baz otdykha Astrakhanskoy oblasti dlya turoperatora kak model sistemy massovogo obsluzhivaniya [Information retrieval system for booking recreation centers of the Astrakhan region for a tour operator as a model of a queuing system]. *Perspektivy i vozmozhnosti ispolzovaniya informatsionnykh tekhnologiy v nauke, obrazovanii i upravlenii : sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects and possibilities of using information technologies in science, education and management : collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference], 2019, pp. 10–14.
3. Onlayn-zapis dlya byuti-mastera [Online appointment for a beauty master]. *BeautyLook*. Available at: <https://beautylook.online/ru/business/> (accessed 07.01.2022).
4. Vedenie klientskoy bazy [Maintaining a client base]. *napriem*. Available at: <https://napriem.com/> (accessed 07.02.2022).
5. Fernando, Doglio. Pro REST API Development with Node.js. *Apress*, 2015, pp. 2–11.
6. Kyle, Banker. MongoDB v dejstvii [MongoDB in action]. *DMK Press*, 2012, pp. 22–50.
7. Providers. *NestJS*. Available at: <https://docs.nestjs.com/providers> (accessed 07.03.2022).
8. Authentication. *NestJS*. Available at: <https://docs.nestjs.com/security/authentication> (accessed 07.02.2022).
9. Shcherbakov, O. A. Sozdanie lichnogo kabineta klienta v informatsionnoy sisteme ООО «Zdorove» [Creation of a client's personal account in the information system of Zdorovye LLC]. *Perspektivy i vozmozhnosti ispolzovaniya tsifrovyykh tekhnologiy v nauke, obrazovanii i upravlenii : sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects and opportunities for using digital technologies in science, education and management : collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference]. Astrakhan, 2022, pp. 192–197.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА  
В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ<sup>1</sup>**

*Статья поступила в редакцию 27.12.2022, в окончательном варианте – 17.01.2023.*

**Касимова Алина Ринадовна**, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420006, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, старший преподаватель, ORCID: 0000-0001-8927-9113, e-mail: alrkasimova@kstu.ru

**Золотарев Вячеслав Владимирович**, Сибирский государственный университет науки и технологий, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

**Сафиуллина Лина Хатыповна**, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420006, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, кандидат технических наук, доцент, ORCID:0000-0002-2765-0973, e-mail: lina.kh.safiullina@mail.ru

**Балыбердин Алексей Сергеевич**, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420006, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, доктор технических наук, доцент, ORCID:0000-0002-8009-5040, e-mail: balyberdinalex@gmail.com

Для различных задач построения систем управления информационной безопасностью проблема использования цифрового двойника как компонента системы играет важную роль. Особенно это характерно для ситуаций, требующих сбора цифрового следа для эмпирически определенных ситуаций с высоким уровнем информационного риска. Кроме того, рассматривая связь между технологическим процессом предприятия и процессами управления информационной безопасностью, специалист по защите информации нуждается в исследовании обратной связи. Это может быть реализовано в форме виртуальных или аппаратных лабораторных стендов, имитационных моделей, обучающихся на основе сценариев реального использования с учетом особенностей технологического процесса, накопленных оперативных данных. Цифровой двойник может быть как подключен к системе напрямую, обмениваясь с ней данными, так и использоваться в асимметричной схеме, когда обмен данными происходит в оговоренном заранее дискретном временном режиме. В статье рассмотрено применение технологии цифровых двойников автоматизированных систем управления промышленным предприятием для повышения уровня информационной безопасности компании. В качестве цифрового двойника в работе был использован киберполигон, созданный в виде информационной системы типового химического предприятия с применением специализированного ПО AMPIRE.

**Ключевые слова:** цифровой след, цифровой двойник, технологический процесс, информационная безопасность, киберполигон, автоматизированная система управления, АСУ, AMPIRE, виртуальная лаборатория

**USING THE DIGITAL TWIN IN INFORMATION SECURITY MANAGEMENT**

*The article was received by the editorial board on 27.12.2022, in the final version – 17.01.2023.*

**Kasimova Alina R.**, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420006, Russian Federation,

Senior Lecture, ORCID: 0000-0001-8927-9113, e-mail: alrkasimova@kstu.ru

**Zolotarev Vyacheslav V.**, Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Information Technologies Security Department, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

**Safiullina Lina Kh.**, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420006, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-2765-0973, e-mail: lina.kh.safiullina@mail.ru

**Balyberdin Alexey S.**, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420006, Russian Federation,

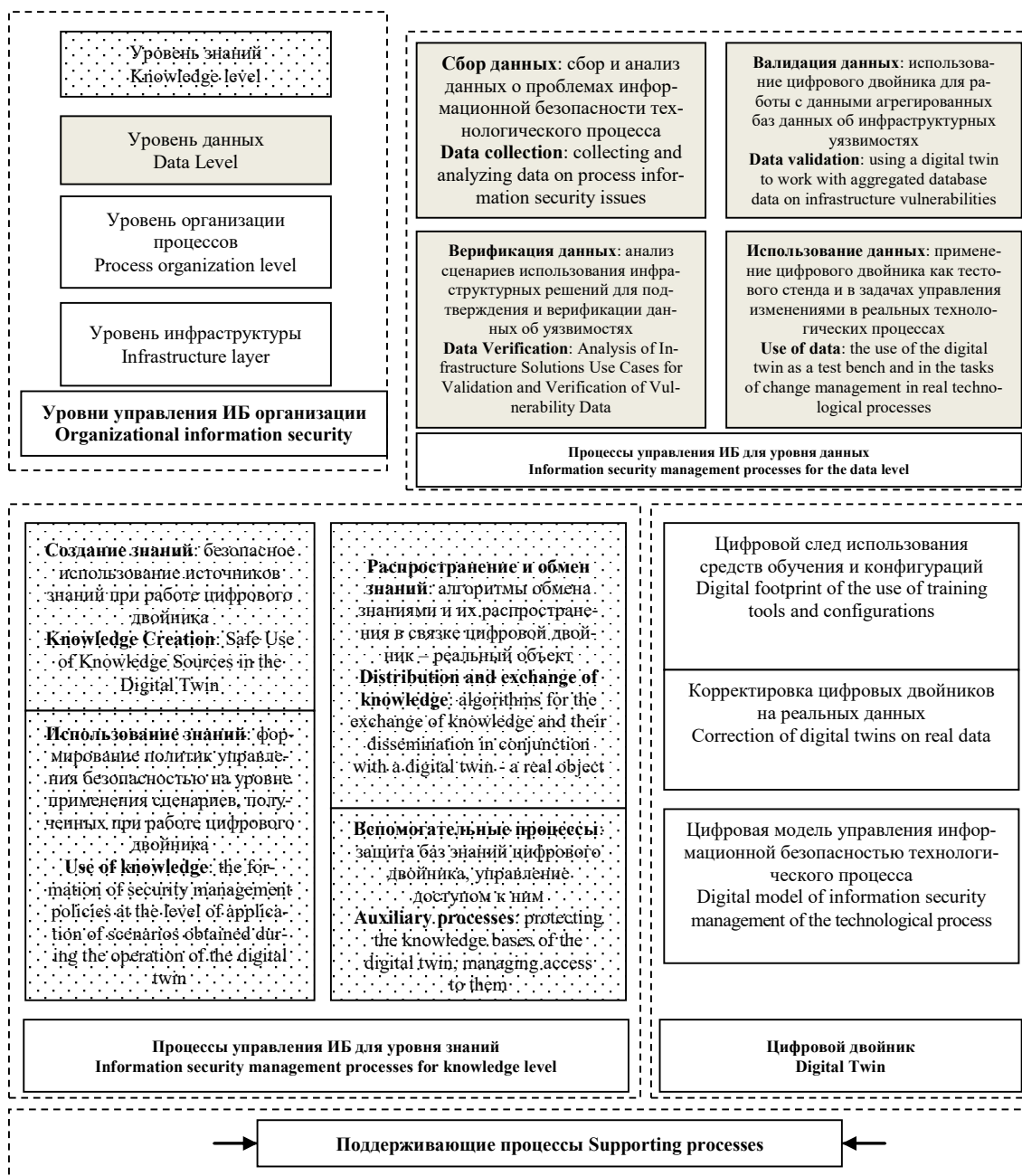
Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-8009-5040, e-mail: balyberdinalex@gmail.com

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Минцифры РФ (Грант ИБ). Проект № 40469-01/2022-д.

For various tasks of building information security management systems, the problem of using a digital twin as a component of the system plays an important role. This is especially true for situations requiring the collection of a digital footprint for empirically defined situations with a high level of information risk. In addition, considering the relationship between the technological process of an enterprise and the processes of information security management, an information security specialist needs to study feedback. This can be implemented in the form of virtual or hardware laboratory stands, simulation models, trained on the basis of real-world use scenarios, taking into account the features of the technological process, accumulated operational data. The digital twin can be either connected to the system directly, exchanging data with it, or used in an asymmetric scheme when data exchange occurs in a discrete time mode agreed in advance. In this article was an overview of digital twin technology of automated control systems to industrial enterprises to level up of information security in the company. In this work, the cyberpolygon was used as digital twin of an information system of a typical chemical enterprise using specialized AMPIRE software

**Keywords:** digital trace, digital twin, technological process, information security, cyberpolygon, automated control system, ACS, AMPIRE, virtual laboratory

**Graphical annotation (Графическая аннотация)**



Управление информационной безопасностью с использованием цифрового двойника

**Введение.** Автоматизированные системы управления (АСУ) отвечают за мониторинг технологического процесса в режиме реального времени и контроль за критическими информационными инфраструктурами (КИИ) зачастую с использованием промышленных протоколов связи, не имеющих встроенные механизмы безопасности и изначально разрабатываемых для применения в закрытых средах [1, 2]. Вместе с тем стремление бизнес-структур к переходу в Индустрию 4.0 заставляет современные АСУ подключаться к сети Интернет и, следовательно, делает их более подверженными кибератакам.

Доля утечек информации в мире вследствие внешнего воздействия возросла с 35,6 % в 2018 году до 63,2 % в 2021 году [3]. Также идет и экспоненциальный рост разнообразия вектора сетевых атак [4]. Потенциальный злоумышленник может получить доступ к закрытым данным, эксплуатируя и уязвимости операционной системы (ОС) (22925 атак из числа обнаруженных в [3]), и прикладное программное обеспечение (ПО) информационных систем (16292 атак из числа обнаруженных в [3]), и средства социальной инженерии, где основной его целью становится персонал АСУ. Характер угроз сетевой безопасности постоянно меняется от распределенных атак типа (DDoS) до программ-вымогателей [5]. Следовательно, обеспечение сетевой безопасности – одна из ключевых задач организации или предприятия, содержащих в своем составе КИИ и АСУ [6]. Кроме того, для задач защиты АСУ ТП дополнительно возникнут вопросы управления технологическим процессом не только в плане безопасности, но и с учетом надежности, эргономичности или учета технологических рисков, вопросы архивирования технологических параметров (и исследования безопасности их использования в реальных ситуациях), работы с аварийной сигнализацией (в различных режимах ее применения). Эти дополнительные вопросы потребуют учета особенностей используемого программного обеспечения, в том числе тестирования его на реальных или виртуальных лабораторных стендах, изучения его безопасности, совместимости, надежности и прочих параметров.

Одной из важных проблем защиты АСУ является внедрение эффективной системы обнаружения вторжения (IDS) для промышленных систем: развертывание IDS поверх критичных по времени программируемых логических контроллеров может негативно повлиять на бесперебойную работу жестких контуров управления и контроля. Еще одна проблема заключается в создании и обслуживании тестовых стендов безопасности для IDS [6]. Использование действующей АСУ в качестве испытательного стенда не допускается из соображения конфиденциальности и безопасности. Кроме того, наличие испытательного стенда в виде физического объекта довольно дорого и требует много времени, что приводит к неполной его реализации и/или устареванию самой концепции.

В работе [7] рассмотрена методика моделирования виртуальной среды предприятия с учетом сценариев атак на предприятие потенциально опасных для АСУ, предложена схема организации цифрового двойника информационной системы предприятия и представлены результаты практического его применения для моделирования действий нарушителя. С точки зрения цифровых двойников в обучении сотрудников также интересен опыт подготовки сотрудников организаций реального сектора, основанный на существующих программах security awareness [8], тренингов и обучения кибербезопасности в целом [9].

**Цифровой двойник.** Концепцию цифровых двойников (digital twins) впервые представил публичке еще в 2002 г. профессор Мичиганского университета Майкл Гривз, выступая с презентацией, посвященной созданию центра управления жизненным циклом продукта (PLM). В частности, он говорил о возможностях, открывающихся при создании виртуального пространства, которое дублировало бы реальное пространство и обменивалось с ним потоками данных.

В производстве цифровой двойник – это виртуальное представление физического продукта в том виде, в каком он спроектирован, построен и обслуживается; дополнен технологическими данными и аналитикой в режиме реального времени, основанными на точных конфигурациях физического продукта производственных систем или оборудования.

Цифровые двойники в целом могут быть использованы в любой отрасли и задаче, где это целесообразно; в рамках представленной работы показано использование цифрового двойника для задачи управления информационной безопасностью.

Интересными в рамках использования цифровых двойников в задачах управления информационной безопасностью могут быть алгоритмы сбора данных, безопасного тестирования известных уязвимостей и их влияния на технологический процесс, анализ возможности сбора цифровых свидетельств, обогащения баз данных и баз знаний инструментальных средств аналитики информационной безопасности.

Цифровые свидетельства, в свою очередь, могут быть использованы как компоненты цифрового следа, позволяя изучать как вектор атаки, так и действия специалистов по защите информации в рамках мониторинга и минимизации ущерба, а также восстановления системы после воздействия.

К средствам формирования цифровых свидетельств как цифровых следов могут быть отнесены: средства контроля утечек информации (DLP), средства анализа уязвимостей, системы анализа

и управления информационными рисками, средства криптографической защиты информации (СКЗИ), средства криминалистического анализа [10], средства предотвращения и обнаружения вторжений, системы управления событиями и инцидентами информационной безопасности, системы оркестрации средств защиты.

Минусы использования средств защиты на модели, абстрагированной от реального технологического процесса, в первую очередь заключаются в сложности интерпретации полученных экспериментальных данных; предлагаемое ниже решение на основе цифрового двойника снимает эту оговорку. Также проблемой является динамичность технологического процесса, его возможные изменения; в этом случае цифровой двойник должен либо меняться вместе с основным процессом в режиме реального времени, либо дискретно, с определенным временным шагом. Во втором случае может быть реализована асимметричная схема обмена информацией между цифровым двойником и реальным объектом, что упрощает как организацию такого взаимодействия, так и обеспечение его безопасности.

Далее предположим, что цифровой двойник используется как инструмент в высокоуровневой задаче управления информационной безопасностью. Очевидно, в этом случае необходимо использовать его на более высоком уровне управления, чем работа непосредственно со средствами защиты информации или организацией процессов внутри системы управления информационной безопасностью. В статье [11] ранее были рассмотрены такие возможности на уровне использования данных или знаний в управлении безопасностью (рис. 1).

Цифровой двойник в этом случае используется для реализации безопасного сбора и анализа данных внутри системы (поскольку фактически представляет собой «песочницу», контролируемое пространство). Также цифровой двойник может быть применен для валидации и верификации данных, применяется как тестовый стенд для задач управления изменениями и применения данных о функционировании системы защиты информации в режимах противодействия атаке и минимизации ущерба, управления инцидентами.

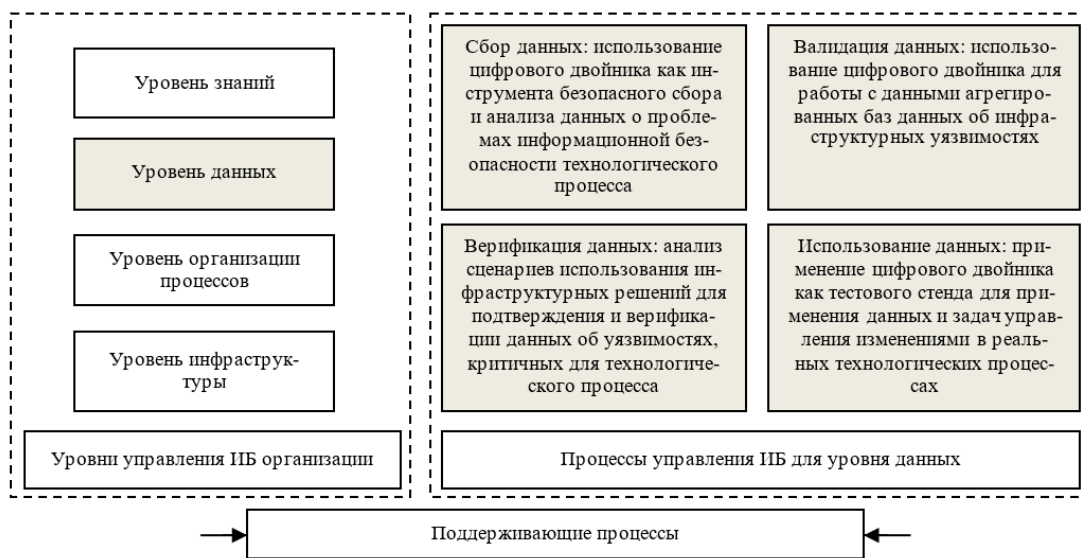


Рисунок 1 – Управление информационной безопасностью с использованием цифрового двойника: уровень данных

Работая с данными цифрового двойника, специалист по защите информации в рамках задач управления информационной безопасностью должен реализовать ряд стандартных процессов, которые позволят как эффективно использовать этот инструмент, так и формировать полезные возможности при его применении.

Основными процессами управления информационной безопасностью в данном случае должны быть (с учетом [10]):

- управление требованиями к безопасности хранения, обработки, синтеза и анализа данных образовательного контента и цифрового следа, основанное на непрерывном мониторинге цифровой среды, в которой развернут образовательный контент. При этом цифровая среда должна предполагать открытую (для внешнего мониторинга) и закрытую (для внутреннего использования) часть с соответствующим разграничением доступа. Необходимо обратить внимание на то, что цифровой двойник может использоваться как для образовательных задач, так и для непрерывного мониторинга реального процесса; целесообразно разделять эти возможности или делать несколько отдельных цифровых двойников;

- реализация процедур и сценариев обеспечения непрерывности технологического процесса или обогащения образовательного контента, включая сценарии нарушения работоспособности при развертывании системы, реализации изменений, оценки возможностей нарушения работоспособности. Этот процесс целесообразно кооперировать с процедурами разработки безопасного программного обеспечения, управления безопасностью развертывания виртуальных инфраструктур, управления нагрузкой и пр.;

- обучающие сценарии для формируемого набора действий при работе с цифровым следом.

Очевидно, что, работая с обучающими или имитирующими сценариями, цифровой двойник будет формировать не только «сырые» данные, но и знания, которые могут быть использованы в дальнейшем при управлении информационной безопасностью реального объекта. В таком случае в упомянутой выше высокоуровневой задаче управления информационной безопасностью можно выделить процессы управления на уровне знаний.

На схеме ниже показан порядок использования знаний для обогащения баз цифрового двойника и реального объекта (рис. 2).

В качестве знаний могут быть полезны:

- сценарии действий;
- процедуры и регламенты реагирования на инциденты;
- методики, сценарии и регламенты оркестрации средств защиты информации;
- вектора атак и порядок эксплуатации уязвимостей;
- результаты исследования величины и мест возникновения ущерба инфраструктуре, процессам и/или данным;
- некорректная реализация отдельных элементов цифрового двойника, выявленная в ходе эксплуатации самого цифрового двойника или реального объекта, связанного с ним.

Любые знания, полученные при эксплуатации цифрового двойника, могут быть использованы в базах знаний экспертных систем, в образовательном процессе для специалистов по защите информации, работающих как с цифровым двойником, так и с реальным объектом. Базы знаний также могут и должны пополняться из внешних источников, таких как результаты работы экспертных групп в области информационной безопасности, рекомендации и исследования регуляторов, сообщения об уязвимостях и способах их эксплуатации и пр.

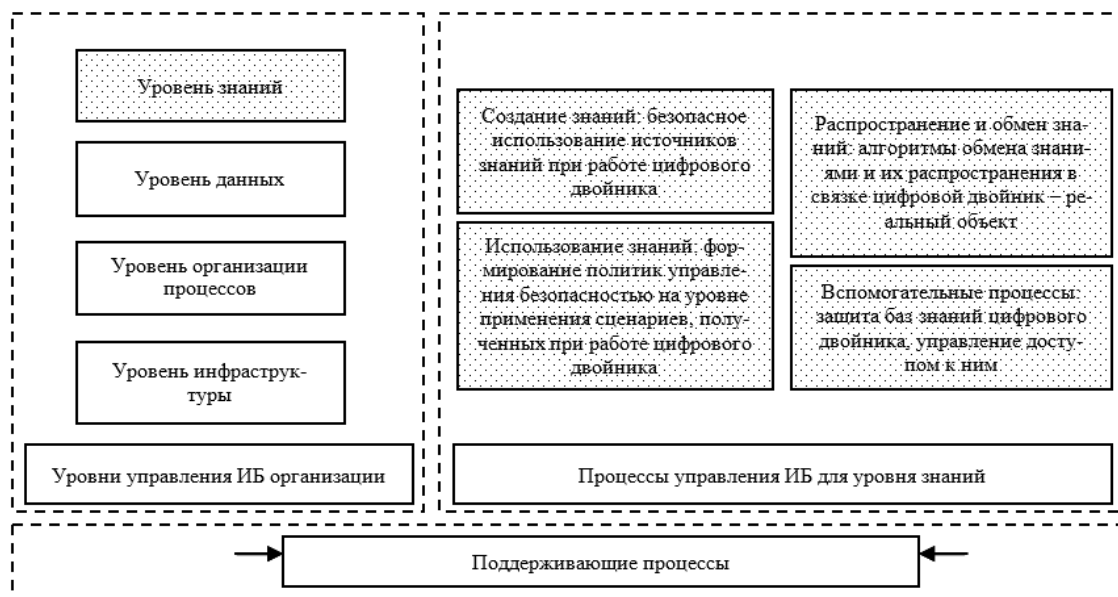


Рисунок 2 – Управление информационной безопасностью с использованием цифрового двойника: уровень знаний

С точки зрения описанного выше интересно рассмотреть следующие возможности. Во-первых, для образовательного процесса и процесса исследования характерна динамика связей между источниками знаний и базами знаний, а также эрозия используемых сценариев (часть тактических решений по использованию знаний может быстро устаревать, особенно в таких областях, как, к примеру, информационные технологии и информационная безопасность). Таким образом, насколько стабильна конкретная связь между источником и базой знаний не так важно, как используемая область

получения знаний для применения в последующем в решении задач управления информационной безопасностью.

Далее рассмотрен принцип и пример организации виртуальной лаборатории, реализующей описанный выше подход.

**Виртуальная лаборатория на базе цифрового двойника.** Рассматривая вариант реализации цифрового двойника для двух задач: моделирования технологического процесса и обучения специалистов по защите информации, целесообразно разделить задачу на несколько этапов, реализуемых последовательно с отдельными требованиями к каждому из них.

В первую очередь, цифровой двойник, используемый как тестовый стенд, должен иметь безопасное соединение как с устройствами управления основным технологическим процессом (если это требуется) как в случае обмена данными в реальном времени, так и в случае обмена данными в асинхронном режиме. Во-вторых, цифровой след, собираемый при работе с цифровым двойником, должен быть полезен для решения задач управления информационной безопасностью реального объекта.

Следовательно, последовательность шагов по интеграции цифрового двойника в качестве лабораторного стенда может быть следующей:

1. Оценка возможных источников данных для формирования цифрового следа. Ранее [10] авторами было указано, что целесообразно оценить формат и способ считывания данных цифрового двойника; но рассматривалось это для задачи образовательной, ограниченной в применении. Трактую задачу более широко, специалист должен учесть и передачу данных цифрового следа на реальный объект, и их использование реальным объектом для модернизации собственной работы, и исследовательские функции цифрового двойника, и пополнение баз знаний средств защиты информации (если таковые имеются и используются).

2. Передача данных как элемент задачи управления безопасностью должна содержать формат самих данных, формат заголовков и метаданных, стандартные формы и протоколы, отчеты и поля баз данных, используемые для хранения. Кроме того, для передачи данных могут быть реализованы способы сжатия или предобработки получаемых данных цифрового следа.

3. Так как данные цифрового следа будут храниться как в базах данных реального объекта, так и в базах данных цифрового двойника, необходимо продумать способы хранения (архивирования) данных, в том числе технологических параметров и аварийной сигнализации. В число способов защиты данных должны входить контроль доступа, резервирование, управление ключами и коммуникациями и другие применимые в задаче средства управления безопасностью (контрмеры).

4. С точки зрения использования данных должны быть проанализированы вопросы доступа к данным, в том числе и с позиции использования автоматического доступа средствами оркестрации в системе управления информационной безопасностью. Интересным здесь является использование агрегированных данных в случае, если они собираются одновременно на реальном объекте и цифровом двойнике и используются совместно; но такая задача требует дополнительного изучения.

Таким образом, при использовании цифрового двойника реального объекта возникает положительная обратная связь с процедурой сбора цифровых свидетельств событий информационной безопасности, реализованной в цифровом двойнике (и/или реальном объекте) и процедурой повышения осведомленности специалистов по защите информации, реализующих задачи управления информационной безопасности в рамках работы с реальным объектом.

При этом, если используется несколько цифровых двойников, возможно реализовать и более сложные схемы работы, что (при возникновении необходимости) потребует сложных протоколов обмена информацией между цифровыми двойниками и реальными объектами, послужившими для них прототипами или использующими их данные; в данном исследовании такая задача не ставилась.

Пример формирования части цифрового двойника – формирование виртуальной образовательной лаборатории (ВЛ). Здесь актуальными будут поддерживающие процессы управления данными, управления безопасностью взаимоотношений с заинтересованными сторонами. Основные процессы показаны на схеме ниже (рис. 3 [10]).



Рисунок 3 – Формирование виртуальной лаборатории, включая поддерживающие процессы управления ИБ

В таком случае обучение специалистов и/или тестирование отдельных сценариев, применяемых в технологическом процессе, будет использоваться ограниченно, в варианте «песочницы» без прямого выхода на управление технологическим процессом. Это позволит как проводить эксперименты, нарушающие целостность технологического процесса (и невозможные или нежелательные на реальном объекте), так и гарантировать широкую технологическую базу процесса обучения специалистов по защите информации в рамках повышения осведомленности в области информационной безопасности.

При необходимости на базе цифрового двойника могут формироваться отдельные кейсовые задания, которые дополняют или анализируют реальные сценарии по типу «что-если» [12].

Далее рассмотрим эксперимент на основе реально существующего цифрового двойника технологического процесса.

**Эксперимент на основе цифрового двойника.** Цифровой двойник информационной системы типового химического предприятия на базе программного комплекса AMPIRE используется в данном примере ограниченно, для тренировки специалистов по защите информации и повышения навыков в обнаружении и реагировании на инциденты безопасности [13, 14].

К функциональным возможностям цифрового двойника, помимо изначально предусмотренных идей реализации [15], с точки зрения информационной безопасности [16, 17] относятся:

- создание экземпляров информационных систем на базе имеющихся шаблонов;
- управление пользователями;
- управление виртуальными нарушителями;
- проведение полноценных практических и лабораторных занятий;
- получение информации о тренировках;
- представление возможности взаимодействия между пользователями посредством встроенного мессенджера и системы тикетов;
- проведение оценивания всех участников тренировки.

На рисунке 4 представлена типовая схема локально-вычислительной сети (ЛВС) предприятия с АСУ ТП (симуляция сети с ИТ и SCADA-сегментами).

ЛВС представлена пятью зонами:

- сеть Интернет;
- демилитаризованная зона (DMZ);
- центр обработки данных (ЦОД);
- офисные пользователи;
- система ISC.

В качестве средства виртуализации используется специализированное ПО VMWare EXSI. На серверах установлены ОС Linux, для файлового сервера, серверов Active Directory (AD)



и Exchange – ОС Windows. На АРМ пользователей установлена ОС Windows и ОС Astra Linux SE 1.6. В качестве базы данных используется MySQL 5.5. IGSS Master используется на АРМ с IP-адресом 10.10.4.1.

Основным преимуществом ПО Ampire является возможность создания уязвимых узлов – виртуальных машин, эмулирующих различные элементы в реальной инфраструктуре компании, производства, университета и т.д. (сервер, сетевое оборудование, ПК пользователя) с известной уязвимостью или дефектом безопасности (CVE).

В таком случае инфраструктура цифрового двойника будет ограничиваться только теми зонами, в которых есть уязвимые узлы. Сначала будет компрометироваться уязвимый узел № 1, затем № 2 и т.д. ПО Ampire позволяет самостоятельно выбирать уязвимые узлы и комбинировать их между собой преподавателю, конфигурировать эти цепочки.

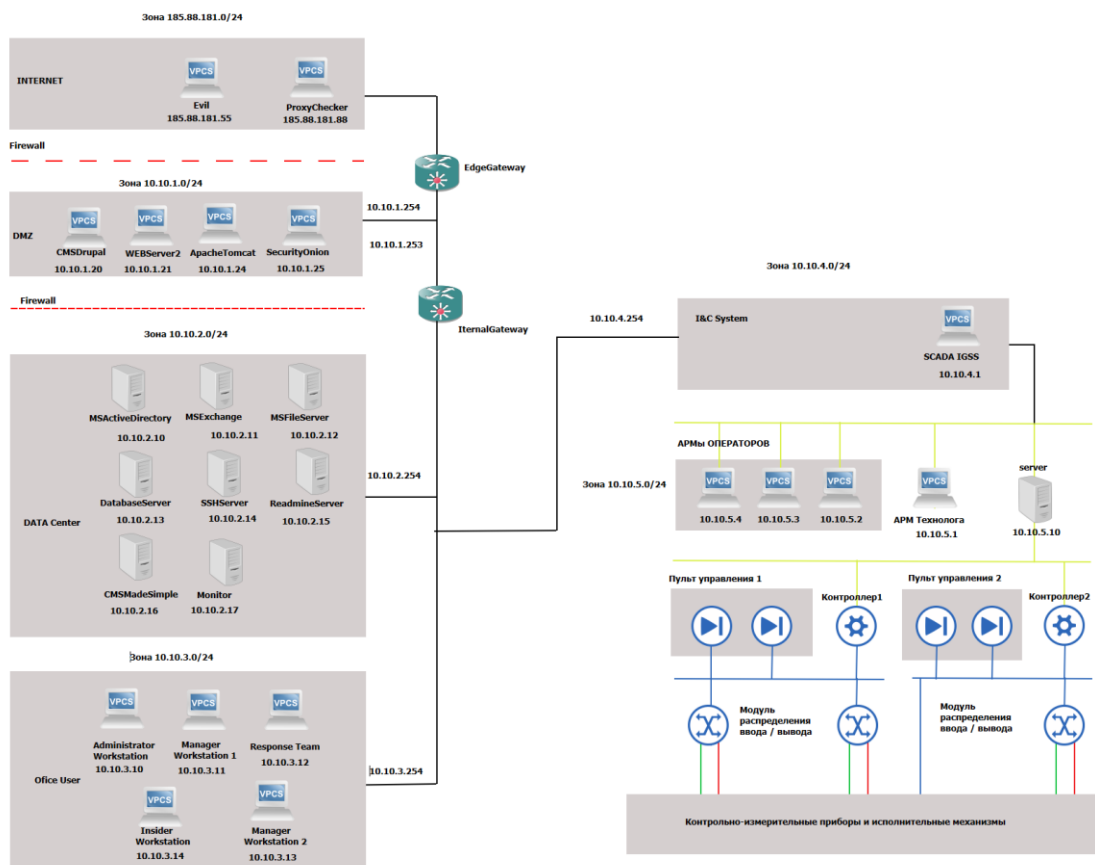


Рисунок 4 – Типовая схема ЛВС предприятия с АСУ

В качестве уязвимого узла будет выступать файловый сервер, имеющий уязвимость в windows-реализации SMB-протокола (CVE-2017-0144). Файловый сервер предоставляет центральный ресурс в сети для хранения и обеспечения совместного доступа к файлам пользователей сети.

Эксплоит EternalBlue, разработанный Агентством национальной безопасности (АНБ) США для эксплуатации уязвимости в протоколе Microsoft Server Message Block (SMB), продолжает представлять серьезную угрозу для многих организаций по всему миру более чем через четыре года после выпуска исправления.

Методы защиты:

- отключение SMBv1;
- установка обновлений от Microsoft;
- в большой сети провести мониторинг сетевого трафика с выявлением станций, использующих SMBv1.

Далее необходимо провести анализ возможности отключения SMBv1 на них, а в случае невозможности анализ целесообразности использования этих хостов, возможности временной изоляции за WAF, а также планирование их последующей модернизации.

Рассмотрим несколько вариантов реализации:

Первый вариант (типовой)

Внешний нарушитель производит поиск активных хостов в сегменте внешнего периметра предприятия DMZ, сканирование их на предмет открытых HTTP/HTTPS портов. Далее осуществляется поиск страницы аутентификации в обнаруженном во время сканирования веб-приложении и брутфорс атака. Используя веб-почту для доступа к серверу совместной работы Microsoft Exchange Server, определяется адрес для RDP-подключения, а также аутентификационные данные подключения. Сканирование доступных сегментов сети ЦОД на поиск файлового сервера к уязвимости MS17-010, эксплуатация уязвимости MS17-010 и получение доступа к файловому серверу. Помимо уязвимости CVE-2017-0144 уязвимости подключения (простой пароль, подключение по RDP).

Второй вариант (конфигуратор)

Нарушитель (внутренний или внешний) получает доступ к SSH-серверу, используя брутфорс атаку, при условии знания IP-адреса машины и открытого ssh-порта. Эксплоит EternalBlue использует уязвимость в реализации протокола Server Message Block v1. Нарушитель, сформировав и передав на узел особым образом подготовленный пакет, способен получить удалённый доступ к системе и запустить на ней произвольный код.

К основным способам защиты от CVE-2017-0144 могут служить следующие рекомендации:

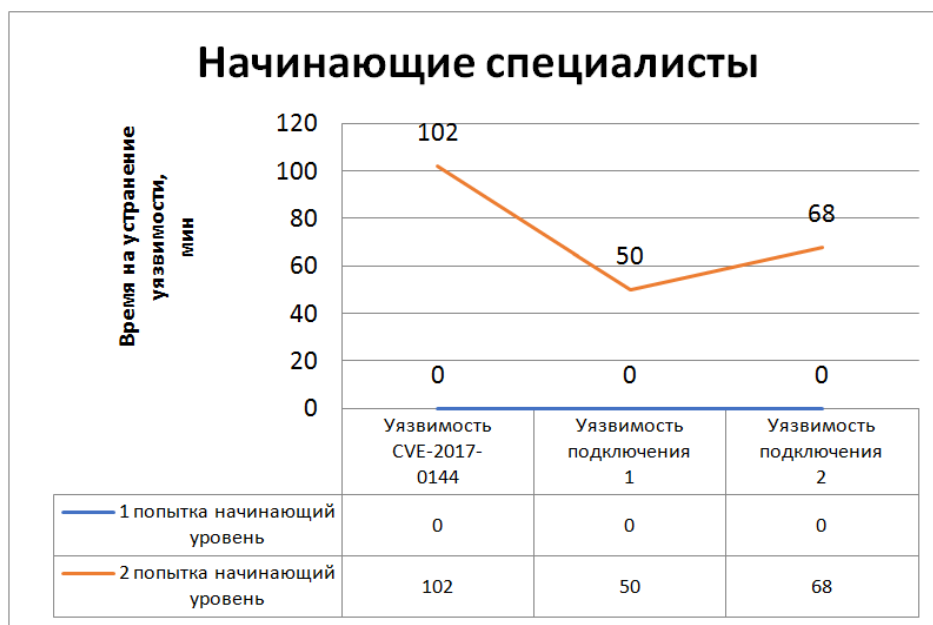
- установка системных обновлений безопасности;
- грамотная политика использования электронной почты в организации;
- отключение SMBv1, используя инструкции, предоставленные Microsoft.

На типовом сценарии отработывали навыки как начинающие специалисты по информационной безопасности (далее начинающие), так и специалисты по информационной безопасности (далее специалисты). Усредненный результат их работы представлен на рисунке 5.

Во время первой попытки начинающим не удалось добиться положительных результатов, несмотря на предварительную теоретическую подготовку, в то время как специалисты достигли своей цели в заранее определенный временной промежуток (90 минут).

Во время второй попытки и начинающие, и специалисты успешно справились с поставленными задачами.

Неоднократный «прогон» одного и того же типового сценария приведет к автоматическому заучиванию действий, которые ведут к успеху, и в реальной ситуации отключит критическое мышление специалиста ИБ, не позволив ему адекватно оценить ситуацию.



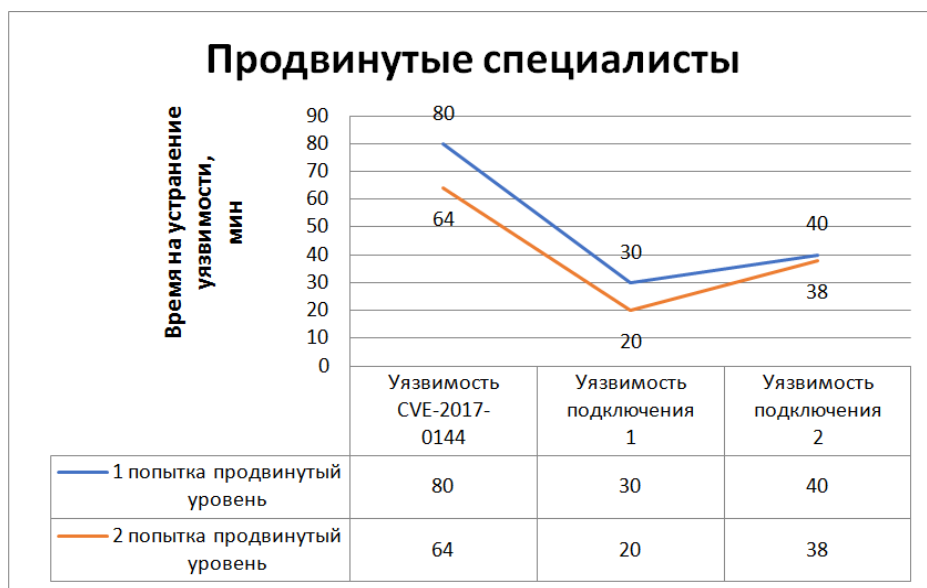


Рисунок 5 – Результаты устранения уязвимостей на цифровом двойнике

По итогам работы на цифровом двойнике отрабатываются навыки анализа событий информационной безопасности, заведение карточек инцидентов, расследование инцидентов. Основная цель – устранение уязвимостей и описание вектора атаки (Cyber Kill Chain).

**Заключение.** В статье приведены возможности использования цифрового двойника как инструментального дополнения к задаче управления информационной безопасностью. На базе ранее представленных схем показано место цифрового двойника в управлении информационной безопасностью, описаны особенности и порядок его интеграции в задачу.

Само по себе использование цифровых двойников может существенно расширить возможности специалиста по защите информации, особенно для реальных объектов, не предполагающих некоторые режимы работы как экспериментальные (в частности, моделирование реальных атакующих действий, встречающихся как составная часть векторов атак). Цифровые двойники в этом случае могут дать необходимый эмпирический опыт.

Отдельно рассмотрено использование цифрового двойника как образовательной составляющей как в рамках повышения осведомленности, так и в исследовательских целях. В этом случае асинхронно подключенный к реальному объекту (прототипу) цифровой двойник используется как «песочница», в которой специалисты по защите информации реализуют различные обучающие сценарии.

Также в статье рассмотрен типовой сценарий, включающий уязвимости подключения сервера и CVE-2017-0144, организованный на ПО AMPiRE, позволяющий оценить навыки специалистов по информационной безопасности. Оценка навыков показала, что использование цифровых двойников позволяет выработать навыки решения типовых задач у начинающих специалистов и впоследствии его развить на решение нетипичных задач.

#### Библиографический список

1. Kuznetsova, N. Building a digital twin of the main automated systems of an industrial enterprise to determine the level of information security / N. Kuznetsova, T. Karlova, A. Bekmeshov // Ergodesign. – 2021. – Vol. 2021, № 2. – P. 97–102.
2. Varghese, S. A. Digital Twin-based Intrusion Detection for Industrial Control Systems / S. A. Varghese et al. – 2022.
3. Экспертно-аналитический центр InfoWatch. Отчёт об исследовании утечек информации ограниченного доступа в 2021 году // Infowatch. – 2022. – P. 1–32.
4. Петрищева, К. Г. Разработка цифрового двойника городской инфраструктуры как инструмента обеспечения информационной безопасности / К. Г. Петрищева // Российская наука и образование сегодня: проблемы и перспективы. – 2022. – Vol. 4, № 1 (43). – P. 53–57.
5. Абрамов, В. И. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации компании / В. И. Абрамов, А. А. Туйцына // Цифровая трансформация экономики. – 2020. – Vol. 7. – P. 33–39.
6. Varghese, S. A. Digital Twin-based Intrusion Detection for Industrial Control Systems / S. A. Varghese et al. – 2022.
7. Касимова, А. Р. Использование цифровых двойников при построении системы безопасности предприятия / А. Р. Касимова, Л. Х. Саифуллина // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2022 : сборник материалов / сост.: Р. Ш. Ахмадиева, Р. Н. Минниханов ; под общ. ред. чл.-корр. Академии наук Республики Татарстан, д-ра техн. наук, проф. Р. Н. Минниханова. – Казань : ГБУ «НЦБЖД», 2022. – Ч. 1. – С. 291–298.
8. Ali Zani, A. A review of security awareness approaches: Towards achieving communal awareness / A. Ali Zani, A. Norman, N. Ghani // Cyber Influence and Cognitive Threats. – Academic Press, 2020. – P. 97–127. – Режим доступа: <https://aisel.aisnet.org/pacis2018/278>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 20.10.2021).
9. Kim, B.-H. Development of cyber information security education and training system / B.-H. Kim, K.-C. Kim, S.-E. Hong, S.-Y. Oh // Multimedia Tools and Applications. – 2017. – № 76 (4). – P. 6051–6064.

10. Попов, А. М. Проблема управления информационной безопасностью при создании цифрового двойника дисциплины / А. М. Попов, В. В. Золотарев, Е. Ю. Кунц // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 2. – С. 109–118.
11. Золотарев, В. В. Модель и алгоритм управления информационной безопасностью образовательной организации высшего образования с учетом требований управления на основе данных / В. В. Золотарев, М. А. Лапина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 4.
12. Sillanpää, M. Social Engineering Intrusion: A Case Study / M. Sillanpää, J. Hautamäki // IAIT2020 : The 11th International Conference on Advances in Information Technology. – 2020. – P. 1–5.
13. Хорзова, И. С. Применение возможностей киберполигона для подготовки и повышения квалификации специалистов по информационной безопасности / И. С. Хорзова // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем. – 2021. – Vol. 2. – P. 46–47.
14. Mantulenko, V. V. Prospects of Digital Footprints Use in the Higher Education / V. V. Mantulenko. – 2021. – P. 581–589.
15. Stavropoulos, P. Digital twins in industry 4.0 / P. Stavropoulos, D. Mourtzis // Design and Operation of Production Networks for Mass Personalization in the Era of Cloud Technology. – Elsevier, 2022. – P. 277–316.
16. Rafisovich Gapsalamov, A. Approaches to Information Security in Educational Processes in the Context of Digitalization / A. Rafisovich Gapsalamov et al. // TEM Journal. – 2020. – P. 708–715.
17. Holmes, D. Digital Twins and Cyber Security – solution or challenge? / D. Holmes et al. // 2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM). – IEEE, 2021. – P. 1–8.

### References

1. Kuznetsova, N., Karlova, T., Bekmeshov, A. Building a digital twin of the main automated systems of an industrial enterprise to determine the level of information security. *Ergodesign*, 2021, vol. 2021, no. 2, pp. 97–102.
2. Varghese, S. A. et al. *Digital Twin-based Intrusion Detection for Industrial Control Systems*, 2022.
3. Экспертно-аналитический центр InfoWatch. Otchyot ob issledovanii utechek informatsii ogranichennogo dostupa v 2021 godu [Expert-analytical center InfoWatch. 2021 Restricted Information Leakage Study Report]. *Infowatch*, 2022, pp. 1–32.
4. Petrishcheva, K. G. Razrabotka tsifrovogo dvoynika gorodskoy infrastruktury kak instrumenta obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti [Development of a digital twin of urban infrastructure as a tool for ensuring information security]. *Rossiyskaya nauka i obrazovaniye segodnya: problemy i perspektivy* [Russian Science and Education Today: Problems and Prospects], 2022, vol. 4, no. 1 (43), pp. 53–57.
5. Abramov, V. I., Tuitsyna, A. A. Tsifrovyye dvoyniki – effektivnyye instrumenty tsifrovoy transformatsii kompanii [Digital twins are effective tools for digital transformation of a company]. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki* [Digital transformation of the economy], 2020, vol. 7, pp. 33–39.
6. Varghese, S. A. et al. *Digital Twin-based Intrusion Detection for Industrial Control Systems*, 2022.
7. Kasimova, A. R., Safiullina, L. Kh. Ispolzovanie tsifrovyykh dvoynikov pri postroenii sistemy bezopasnosti predpriyatiya [Use of digital twins in building the security system of the enterprise]. *Mezhdunarodnyy forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2022 : sbornik materialov* [Proceedings of the International Forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2022]. Kazan: State budgetary institution «Scientific Center of Safety Research», 2022, p. I, pp. 291–298.
8. Ali Zani A., Norman A., Ghani N. A review of security awareness approaches: Towards achieving communal awareness. *Cyber Influence and Cognitive Threats*. Academic Press, 2020, pp. 97–127. <https://aisel.aisnet.org/pacis2018/278> (дата обращения 20.10.2021).
9. Kim, B.-H., Kim, K.-C., Hong, S.-E., Oh, S.-Y. Development of cyber information security education and training system. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, no. 76 (4), pp. 6051–6064.
10. Попов, А. М., Золотарев, В. В., Кунц, Е. Ю. Проблема управления информационной безопасностью при создании цифрового двойника дисциплины [The problem of information security management when creating a digital twin of the discipline]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2022, no. 2, pp. 109–118.
11. Золотарев, В. В., Лапина, М. А. Модель и алгоритм управления информационной безопасностью образовательной организации высшего образования с учетом требований управления на основе данных [Model and algorithm of information security management of an educational organization of higher education taking into account the requirements of data-based management]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2022, no. 4.
12. Sillanpää, M., Hautamäki, J. Social Engineering Intrusion: A Case Study. *IAIT2020: The 11th International Conference on Advances in Information Technology*, 2020, pp. 1–5.
13. Khorzova I. S. Primenenie vozmozhnostey kiberpoligona dlya podgotovki i povysheniya kvalifikatsii spetsialistov po informatsionnoy bezopasnosti [Application of the capabilities of the cyberpolygon for the training and advanced training of specialists in information security]. *Aktualnye voprosy ekspluatatsii sistem okhrany i zashchishchennykh telekommunikatsionnykh sistem* [Actual issues of operation of security systems and protected telecommunication systems], 2021, vol. 2, pp. 46–47.
14. Mantulenko, V. V. *Prospects of Digital Footprints Use in the Higher Education*, 2021, pp. 581–589.
15. Stavropoulos, P., Mourtzis, D. Digital twins in industry 4.0. *Design and Operation of Production Networks for Mass Personalization in the Era of Cloud Technology*. Elsevier, 2022, pp. 277–316.
16. Rafisovich Gapsalamov, A. et al. Approaches to Information Security in Educational Processes in the Context of Digitalization. *TEM Journal*, 2020, pp. 708–715.
17. Holmes, D. et al. Digital Twins and Cyber Security – solution or challenge? *2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*. IEEE, 2021, pp. 1–8.

УДК 004.93'1

## **АУТЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ СМАРТФОНА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С АКСЕЛЕРОМЕТРА**

*Статья поступила в редакцию 09.01.2023, в окончательном варианте – 20.01.2023.*

**Корякова Виктория Андреевна**, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,  
магистрант, ORCID: 0000-0002-2472-9248, e-mail: koryakova-01@mail.ru

**Марьенков Александр Николаевич**, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,  
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-1378-3553, e-mail: marenkovan17@gmail.com

В связи с ростом числа пользователей смартфонов и последующим увеличением объемов личной информации, хранящихся на них, все чаще стали подниматься многочисленные вопросы в области безопасности и конфиденциальности данных на мобильных устройствах. Чтобы решить эти проблемы, исследователи внедрили множество методов, включая подходы непрерывной аутентификации, основанные на поведении пользователя. В ходе анализа существующих решений было выявлено, что использование алгоритмов машинного обучения обеспечивает лучшее решение проблем аутентификации на основе поведенческой биометрии, которая направлена на выявление поведенческих черт, которыми обладает пользователь, таких как движения рук и модели размахивания руками. Новые методы должны фокусироваться на нескольких характеристиках и защищать от различных атак, делая систему безопасности простой в использовании и адаптированной для каждого владельца. Анализ и оценка научных, методологических, технологических, алгоритмических, программных решений показали, что необходимо разработать методику мониторинга и анализа информации, поступающей от различных датчиков мобильных устройств, на основе которой можно было бы с достаточно высокой вероятностью аутентифицировать пользователя мобильного устройства, его типичное и атипичное поведение, а также различные жесты, производимые пользователем с помощью мобильного устройства. Были спроектированы архитектуры одиннадцати полносвязных нейронных сетей, содержащих в себе разное количество слоев и нейронов. В результате экспериментов было выявлено, что наиболее оптимальной НС для распознавания жестов мобильным устройством является нейронная сеть, состоящая из двух скрытых слоев с 32 и 16 нейронами соответственно. Качество (Accuracy) разработанной модели в среднем составило 94 % верно предсказанных жестов. В результате было разработано, протестировано и описано клиент-серверное приложение, которое позволяет: собирать показания акселерометра смартфона и передавать их на сервер; распознавать жесты пользователя, совершаемые мобильным устройством; выводить на экран мобильного устройства информацию о характере движения.

**Ключевые слова:** аутентификация пользователя, поведенческая биометрия, распознавание жестов, трехосевые акселерометры, мобильные устройства, машинное обучение

## **SMARTPHONE USER AUTHENTICATION BASED ON DATA RECEIVED FROM THE ACCELEROMETER**

*The article was received by the editorial board on 09.01.2023, in the final version – 20.01.2023.*

**Koryakova Victoria A.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,  
undergraduate student, ORCID: 0000-0002-2472-9248, e-mail: koryakova-01@mail.ru

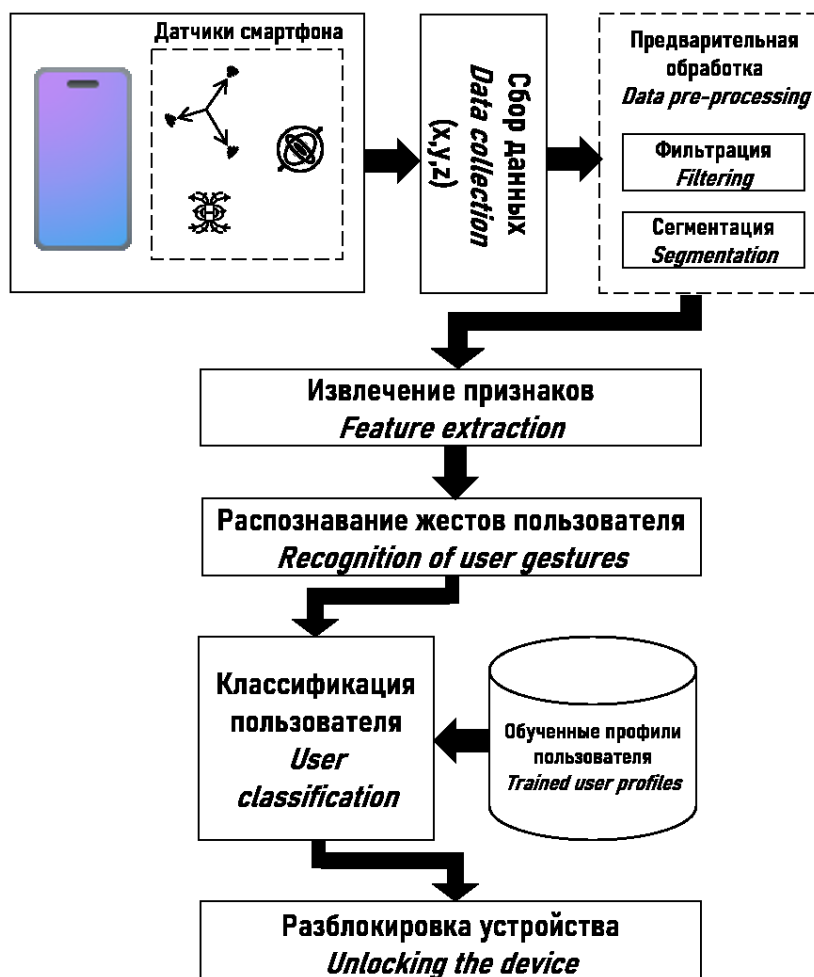
**Marenkov Alexander N.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,  
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-1378-3553, e-mail: marenkovan17@gmail.com

With the growing number of smartphone users and the subsequent increase in the amount of personal information stored on them, numerous questions have been raised regarding the security and privacy of data on mobile devices. To solve these problems, researchers have implemented a variety of methods, including continuous authentication approaches based on user behavior. In the course of the analysis of existing solutions, it was found that the use of machine learning algorithms provides a better solution to authentication problems based on behavioral biometrics, which aims to identify behavioral traits that the user possesses, such as hand movements and hand-waving patterns. New methods should focus on multiple characteristics and protect against various attacks, making the security system easy to use and tailored to each owner. Analysis and evaluation of scientific, methodological, technological, algorithmic, software solutions showed that it is necessary to develop a methodology for monitoring and analyzing information coming from various sensors of mobile devices, on the basis of which it would be possible to authenticate a user of a mobile device with a sufficiently high probability, his typical and atypical behavior, as well as various gestures made by the user using a mobile device. The architectures of eleven fully connected neural networks were designed, containing a different number of layers and neurons. As a result of the experiments, it was found that the most optimal neural network

for gesture recognition by a mobile device is a neural network consisting of two hidden layers with 32 and 16 neurons, respectively. The quality (Accuracy) of the developed model averaged 94 % of correctly predicted gestures. As a result, a client-server application was developed, tested and described, which allows you to: collect smartphone accelerometer readings and transfer them to the server; recognize user gestures made by the mobile device; display information about the nature of the movement on the screen of the mobile device.

**Keywords:** user authentication, behavioral biometrics, gesture recognition, triaxial accelerometers, mobile devices, machine learning

**Graphical annotation (Графическая аннотация)**



**Введение.** Высокая производительность, мобильность, удобство в использовании позволили смартфонам и планшетам стать неотъемлемой частью повседневной жизни людей. С помощью мобильных устройств люди ежедневно выполняют множество задач, расширяют возможности общения, творчества и развлечений. Зачастую мобильные устройства становятся удобной и гибкой площадкой для реализации рабочих процессов. С развитием сектора разработки мобильных приложений современный гаджет получает все больше функциональных возможностей. С ростом установленных приложений увеличивается и объем информации, которые они хранят о пользователе. На смартфоне могут храниться персональные данные пользователя, рабочие документы, данные банковских карт, личная информация. Утечка такой информации может привести к нарушению конфиденциальности, финансовым и репутационным последствиям. В 2022 году доля утечки данных через мобильные устройства возросла на 5 % по сравнению с предыдущим периодом. При этом 60 % подобных инцидентов признаны крупными, а остальные 40 % – крупными с долгосрочными последствиями [1]. Подобные утечки информации могут возникать вследствие нелегитимного использования мобильного устройства/кражи мобильного устройства. Кроме того, смартфоны оснащены модулями GPS, NFC и Bluetooth, а также цифровой камерой и почти всегда подключены к интернету, тем самым раскрывая много информации о физической активности их владельцев.

Смартфоны гораздо более подвержены краже за счет своих размеров. Конфискация мобильных устройств, у которых отсутствует система аутентификации, либо она слабая и подвержена быстрому взлому, может привести к краже личных данных пользователя и использованию их с целью шантажа, вымогательства. Поэтому важно обезопасить свое мобильное устройство от нелегитимного доступа. Существующие методы аутентификации на смартфоне имеют ряд недостатков: пароль или ПИН-код можно подсмотреть, либо подобрать с помощью специального программного обеспечения, графический ключ можно воспроизвести по наличию отпечатков пальцев на экране смартфона, биометрическая верификация подвержена атакам спуфинга. Разработка методики мониторинга и анализа информации, поступающей от различных датчиков мобильных устройств, позволит с достаточно высокой вероятностью аутентифицировать пользователя мобильного устройства, его типичное и атипичное поведение, а также различные жесты, производимые пользователем с помощью мобильного устройства.

**Анализ существующих подходов для аутентификации пользователя мобильных устройств.** Существующие средства аутентификации можно разделить на три группы: методы аутентификации по паролю; метод аутентификации с помощью магнитных карт, токенов и других устройств; метод аутентификации, использующий персональные свойства пользователя (отпечаток пальца, структуру сетчатки глаза и т.д.) (рис. 1).



Рисунок 1 – Методы аутентификации

1. Метод с использованием пароля основан на том, что человек знает уникальный код или последовательность цифр и букв: это может быть пароль, ответ на секретный вопрос или идентификационный номер, который должен знать пользователь.

2. Метод с использованием уникального объекта, чем человек обладает в физическом смысле. Распространенными примерами этого типа являются токен, идентификационная карта или другое доверенное устройство.

3. Биометрические методы, обозначающие физическую или поведенческую характеристику: могут быть представлены одним или несколькими физическими или поведенческими атрибутами. Типичными примерами являются отпечатки пальцев и динамические модели нажатия клавиш владельца устройства.

Благодаря достижениям в области технологий, позволяющим точно измерять характеристики человека, а также доступности большей вычислительной мощности для анализа полученных характеристик, которые можно сравнивать в режиме реального времени, появилась биометрическая идентификация как эффективный и удобный способ проверки личности человека для осуществления непрерывной аутентификации.

Биометрия характеризует уникальные физические или поведенческие особенности человека. Выделяют две категории биометрии: поведенческую и физиологическую [2]. Физиологическая биометрия использует такие характеристики человека, как сетчатка или радужная оболочка глаза, отпечатки пальцев и лицо человека. Поведенческая биометрия основана на поведении пользователя и включает в себя анализ такой информации, как форма и направление почерка, время нажатия клавиш, уникальные паттерны, присущие походке, речи и использованию стилуса, а также другие особенности общего поведения человека [3].

Непрерывная аутентификация (СА) предлагает преимущества в отношении удобства использования и безопасности. Данный подход пассивно повторно аутентифицирует пользователей, не уведомляя пользователя и не требуя его внимания, и автоматически блокирует систему, если



пользователь неактивен или когда он наблюдает нарушения или аномальное поведение. Непрерывная аутентификация использует распознавание физиологических и поведенческих биометрических образов и режимы контекстно-зависимой аутентификации, иногда в комбинации. Сочетание нескольких режимов называют мультимодальной аутентификацией. Методы аутентификации на основе поведенческой биометрии были разделены на две категории: методы одномодальной и мультимодальной аутентификации. Схематичное разделение методов аутентификации на основе поведенческой биометрии представлено на рисунке 2.



Рисунок 2 – Методы поведенческой биометрии

Одномодальная система аутентификации относится к системе аутентификации на основе одной биометрической характеристики, такой как походка, динамика нажатия клавиш и размахивание рукой. Мультимодальная поведенческая биометрия относится к объединению различных биометрических показателей для аутентификации пользователя.

По мере развития вычислительных и сенсорных возможностей смартфонов исследователи начали использовать больше типов сенсорных данных с устройств для самых разных целей. Данные мобильного зондирования использовались для краудсорсинга, понимания контекста и распознавания активности. Были опубликованы обзорные статьи о поведенческих биометрических системах аутентификации, однако некоторые обзоры сосредоточены только на определенных поведенческих чертах [4, 5].

Динамика нажатия клавиш широко используется для непрерывной идентификации пользователей смартфонов на основе их моделей набора текста. Так, авторы работы [6] предложили динамику нажатия клавиш, чтобы охарактеризовать поведение пользователей при наборе текста с помощью уникальных сенсорных функций. Благодаря использованию методов машинного обучения для аутентификации пользователей предложенный подход позволил достичь EER (одинаковую частоту ошибок) на уровне 0,08 %. В работе [7] исследовали эффективность функций нажатия клавиш для подмножества наиболее часто используемых английских слов, используя функции: длительность нажатия клавиш, время ожидания, общую продолжительность слова. Были проведены эксперименты для измерения производительности каждой функции в отдельности, а затем результатов различных комбинаций этих функций. Сенсорная динамическая биометрия предназначена для измерения и оценки сенсорного ритма пользователей на смартфонах. Данные получают, когда пользователь взаимодействует с сенсорным экраном, не требуя выполнения какой-либо конкретной задачи. Включив эту временную информацию в процесс аутентификации, предложенная модель смогла достичь средних равных коэффициентов ошибок ~ 4,0 % и ~ 2,5 % соответственно на двух наборах данных. Авторы [8] предложили динамическую аутентификацию пользователей смартфонов на основе их жестов на сенсорном экране. Были определены четыре типа жестов для аутентификации пользователя:



нажатие, прокрутка, перетаскивание и масштабирование. Для классификации признаков применялись различные классификаторы, в том числе MVP, k-NN и случайный лес (RF). Экспериментальные результаты показали, что классификатор MVP достиг наилучших результатов при использовании отдельных жестов, а k-NN сообщил о лучших результатах при объединении двух жестов. Классификатор k-NN достигает равного уровня ошибок 0 %, используя всего три жеста.

Голосовое поведение также используется для идентификации пользователей смартфонов по манере и характеру их речи. Каждый человек имеет различные голосовые подписи. В [9] представлены новые подходы к извлечению и использованию функций с помощью моделей глубокого обучения для проверки говорящего в зависимости от текста. Были исследованы четыре типа моделей глубокого обучения: ограниченная машина Больцмана, речевая дискриминантная глубокая нейронная сеть (DNN), дискриминантная глубокая нейронная сеть и многозадачная глубокая нейронная сеть с совместным обучением. Совместный линейный и вероятностный линейный дискриминантный анализ использовался в качестве классификаторов для признаков на основе вектора идентичности. Эксперименты с набором данных RSR2015 показали, что методы, основанные на глубоких функциях, могут обеспечить значительное повышение производительности по сравнению с традиционными базовыми показателями, достигающими EER 0,10 %. Авторы исследования [10] разработали эффективную систему на основе голосовых отпечатков (называемую DR-EiSV-IAS) для пользователей смартфонов на китайском языке. Авторы создали общедоступную базу данных мандаринского языка, записанную смартфонами, для исследования распознавания говорящего в зависимости от текста. Эксперименты подтвердили эффективность предложенного ими DR-EiSV-IAS, который обеспечивает наилучшее значение EER 1,17 %.

Поведенческое профилирование относится к проверке личности пользователя смартфона на основе приложений и служб, которые он использует. В работе [11] предложили подход к аутентификации для поведенческого профилирования пользователей на основе контекста использования мобильных устройств (использование приложения, местоположение, время, использование полосы пропускания и взаимодействие человека с устройством), где для аутентификации использовалась наивная байесовская модель. Авторы работы [12] изучали возможность использования метода поведенческого профилирования на основе истории использования приложений для постоянной проверки мобильных пользователей. Был достигнут EER 9,8 %. Кроме того, была предложена новая модульная структура профилирования поведения, которая не отклоняла бы доступ пользователя только после ряда последовательных нетипичных манипуляций с приложениями. В экспериментах с набором данных MIT Reality значения FRR и FAR составили 11,45 % и 4,17 %. В [13] представили метод аутентификации пользователя смартфона, основанный на статистике использования. Для оценки предложенного подхода использовались два общедоступных набора данных. При использовании двухклассовой SVM была достигнута точность более 85 %.

Авторы [14] использовали акселерометр, гироскоп и датчик сенсорного экрана для аутентификации пользователя смартфона путем анализа того, как пользователь касается телефона. Различные функции, такие как ускорение, давление, размер области касания и течение времени, были собраны с использованием экспериментальных данных как для четырехзначных, так и для восьмизначных PIN-кодов с использованием поведения касания для проверки кодов доступа разных участников. Авторы использовали одноклассовый классификатор, основанный на понятии расстояния до ближайшего соседа для распознавания пользователей. Авторы [15] предложили схему, сочетающую анализ нажатия клавиш и рукописного ввода на смартфонах с целью аутентификации пользователя. Во время записи данных авторы просили разных испытуемых ввести предложение или пароль определенное количество раз. Для оценки своего подхода авторы выбрали различные алгоритмы машинного обучения, включая дерево решений, байесовскую сеть и MLP.

Таким образом, поведенческая биометрия предлагает решения для пассивной и непрерывной аутентификации. Одномодальные системы поведенческой биометрии могут обеспечить приемлемую производительность, однако существует множество проблем, связанных с применением этого типа биометрии. Биометрические датчики очень чувствительны к внешним факторам, приводящим к плохому сбору данных, таким как шум в системах аутентификации на основе голосовых биометрических данных. Кроме того, эмоциональное или физическое состояние пользователя изменчиво с течением времени и может находиться в различных условиях окружающей среды. Также одномодальные биометрические данные уязвимы перед вредоносными атаками, такими как спуфинг и атаки ботов. Мультимодальные биометрические системы зачастую более надежны, чем одномодальные, поскольку они сочетают в себе различные биометрические данные, поэтому может быть достигнут высокий уровень безопасности. Кроме того, слияние нескольких модальностей преодолевает многочисленные проблемы одномодальных систем, включая неуниверсальность некоторых характеристик, внутриклассовые различия, зашумленные сигналы и высокий уровень ошибок. С ростом популярности новых инновационных смартфонов все вышеупомянутые биометрические

системы стали применимы на мобильных устройствах. Однако при выборе и реализации методов аутентификации необходимо учитывать многочисленные ограничения, такие как вычислительные затраты, аппаратные ограничения, скорость, время, необходимое для процесса аутентификации, и потребления энергии. Вопрос о балансе между безопасностью и удобством использования систем аутентификации на основе поведенческой биометрии требует детального анализа и проработки.

**Анализ существующих программных решений и постановка задачи.** В мобильных устройствах уже встроены различные способы аутентификации пользователя. Но часто используемые схемы аутентификации для защиты смартфонов (такие как пароли, PIN-коды и шаблоны блокировки) уязвимы для многих атак. Пароль или ПИН-код можно подсмотреть, либо подобрать с помощью специального программного обеспечения. Пароль пользователя могут получить обманным путем. Не исключены ситуации, когда пароль может быть похищен или снят у его владельца [16]. Графический ключ можно воспроизвести по наличию отпечатков пальцев на экране смартфона. Смарт-карты, карты с магнитной полоской, USB-ключи требуют специальное оборудование для работы. Не исключена возможность изготовления копии или эмулятора. Биометрическая верификация подвержена атакам спуфинга. Отдельные биометрические данные меняются как в результате старения, так и травм, ожогов, порезов, различных болезней [16].

Многие люди предпочитают использовать меньше барьеров конфиденциальности каждый раз, когда они решают получить доступ к своему устройству, что снижает эффективность таких схем аутентификации и в конечном итоге делает их уязвимыми для кражи данных. Кроме того, эти подходы бесполезны при идентификации пользователя в режиме реального времени из-за их неспособности обнаружить и распознать пользователя после того, как он прошел успешную аутентификацию. Поэтому крайне важно найти эффективные решения этих проблем для защиты конфиденциальных данных, доступных через эти устройства.

Анализ и оценка научных, методологических, технологических, алгоритмических, программных решений показали, что необходимо разработать методику мониторинга и анализа информации, поступающей от различных датчиков мобильных устройств, на основе которой можно было бы с достаточно высокой вероятностью аутентифицировать пользователя мобильного устройства, его типичное и атипичное поведение, а также различные жесты, производимые пользователем с помощью мобильного устройства.

В связи с этим цель работы – повышение безопасности данных пользователя смартфона путем разработки мобильного приложения для аутентификации на основе поведенческой биометрии с применением методов машинного обучения.

Схемы поведенческой биометрии позволят выявить характеристики поведения пользователя, обладающие определенным паттерном в течение определенного периода времени, таких как движение рук и помахивание, взаимодействие с сенсорным экраном.

**Методика аутентификации пользователя смартфона на основе его поведенческой биометрии.** Предлагаемая методика состоит из пяти этапов: сбор данных, предварительная обработка данных, извлечение признаков, распознавание жестов пользователя и аутентификация пользователя. На рисунке 3 показаны этапы реализации разработанной методики.

На первом этапе происходит сбор данных, поступающих с датчиков мобильного устройства. Помимо указанных данных для обучения модели необходимо предусмотреть возможность размечать данные о типе выполненного движения. Размеченные данные будут использованы для обучения с учителем.

Данные, собранные с датчиков смартфона, содержат нежелательный шум, создаваемый участниками и генерируемые самими датчиками. Предварительная обработка данных необходима для уменьшения нежелательного шума от данных, поступающих с датчиков и разделения данных на небольшие сегменты для лучшего извлечения признаков. Предварительная обработка данных будет проводиться в два этапа (фильтрация и сегментация). Отфильтрованные данные можно в дальнейшем использовать для извлечения признаков.

Для идентификации пользователей на основе их взаимодействия со смартфоном предполагается использовать распространенные классификаторы: машина опорных векторов (SVM), случайные леса (RF) и байесовская сеть, а также нейронные сети. Классификаторы были выбраны из-за их частого использования и отличной эффективности в существующих исследованиях.

После того как паттерны поведения пользователя совпали с паттернами поведения легитимного пользователя, то есть на основе своих поведенческих черт пользователь подтвердил, что является владельцем мобильного устройства, телефон разблокируется. В случае если же поведенческие черты не совпадают с профилем владельца, занесенным в базу данных, ему будет отказано в доступе.

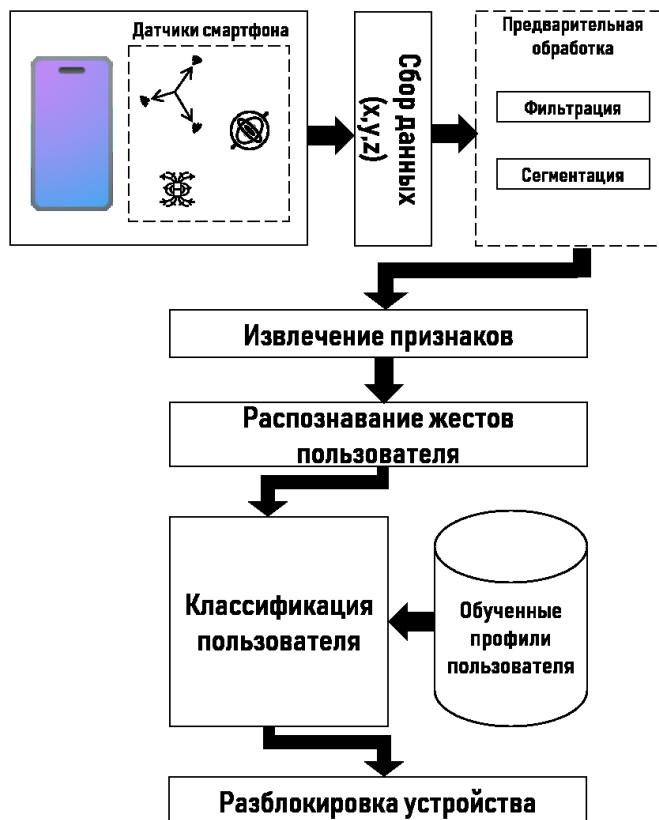


Рисунок 3 – Методика аутентификации пользователя смартфона

Во время эксплуатации модели будет производиться непрерывная проверка данных, поступающих с датчиков смартфона. В состав получаемых данных, кроме информации с датчиков, поступают временные метки и информация для идентификации смартфона. В случае, если искомое движение было распознано, информация передается в блок реагирования. На данном этапе происходит обработка информации о выявленном движении пользователя с последующим принятием мер в соответствии с установленными правилами реагирования.

**Описание разработанного программного продукта.** На первом этапе авторами было принято решение реализовать методику распознавания жестов мобильным устройством. В основные этапы методики входили:

- 1) сбор, предварительная обработка и хранение данных с акселерометра мобильного устройства;
- 2) обучение модели распознавания жестов на основе собранных данных;
- 3) распознавание жеста пользователя смартфоном;
- 4) реагирование на распознанные движения смартфоном пользователем.

На основании проведенного анализа исследований в области распознавания движений смартфоном было принято решение в работе в качестве данных использовать показания акселерометра.

Акселерометр – это специальный прибор, предназначенный для измерения кажущегося ускорения. Кажущееся ускорение – это разница между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением. Принципиально акселерометр состоит из пружины, подвижной массы и демпфера.

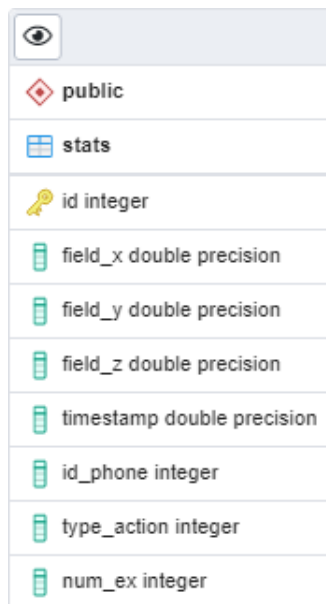
Необходимо предусмотреть три переменные для передачи информации с акселерометра. Кроме того, для распознавания жеста имеет значение последовательность данных, получаемых с датчика. Для этого необходимо ввести дополнительную переменную, передающую время получения показаний.

Чтобы обучить модель распознавания жестов с применением учителя, необходим большой набор размеченных данных, поэтому к уже перечисленным полям в приложение для сбора датасета необходимо добавить поле «тип жеста», в которое будет помещаться информация о том, какой жест описывает данные показания. Поскольку данные о различных экспериментах в базе будут храниться вместе, для удобства работы с ними также предлагается разметить каждый эксперимент, для этого ввести дополнительное поле для номера эксперимента.

Таким образом, приложение для сбора данных, а также база данных для сбора датасета должна позволять хранить следующие данные:

- измерения акселерометра по трем плоскостям;
- время получения данных с датчика;
- идентификатор мобильного устройства, с которого получены данные;
- тип выполняемого жеста (только в приложении для сбора данных);
- номер эксперимента (только в приложении для сбора данных).

Для хранения базы данных была использована система управления базами данных (СУБД) PostgreSQL версии 14. СУБД PostgreSQL является свободной объектно-реляционной системой управления базами данных. Хранение данных было организовано в таблице «stats» (рис. 4).



id	field_x	field_y	field_z	timestamp	id_phone	type_action	num_ex
----	---------	---------	---------	-----------	----------	-------------	--------

Рисунок 4 – Таблица «stats»

Для сбора датасета было написано клиент-серверное приложение. Для разработки сервера был использован Spring Framework – универсальный фреймворк с открытым исходным кодом для Java-платформы. В качестве метода для построения серверного API был использован REST (Representational state transfer). REST – это стиль архитектуры программного обеспечения для распределенных систем. Мобильное приложение было разработано для устройств с операционной системой Android. Язык программирования Java. Главная форма приложения представлена на рисунке 5.

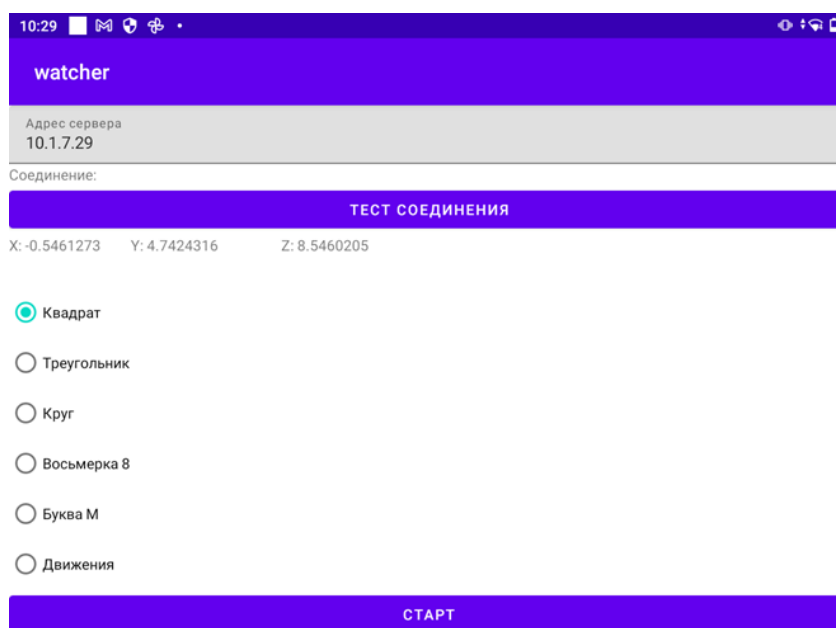


Рисунок 5 – Главная форма приложения для сбора статистики

Приложение состоит из поля для ввода адреса сервера и кнопки проверки соединения. Далее идет ряд переключателей, позволяющих разметить производимые пользователем движения (например, пользователь выбирает переключатель «квадрат» перед тем, как изобразить мобильным устройством квадрат и отправить данные на сервер).

Для сбора данных необходимо отметить переключателем необходимый жест, нажать кнопку «Старт» и воспроизвести жест мобильным устройством. После того как движение будет завершено, необходимо нажать кнопку «Стоп». Собранные данные в формате JSON будут отправлены на сервер и записаны в базу данных.

В результате было собрано 40415 строк данных с показаниями акселерометра при выполнении разных жестов. В ходе сбора данных выполнялись следующие жесты:

- квадрат (0);
- треугольник (1);
- круг (2);
- восьмерка (3);
- буква «М» (4);
- движения смартфоном при обычной эксплуатации (5).

Графическое представление выбранных жестов пользователя для распознавания показано на рисунке 6.

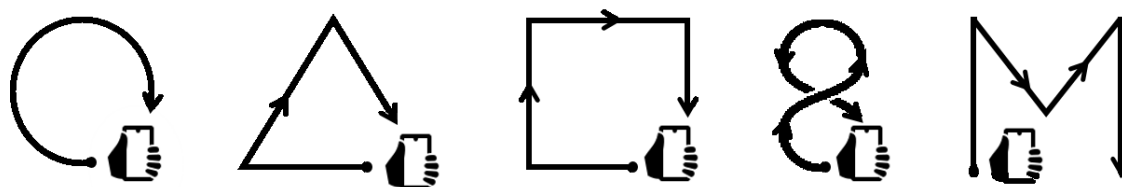


Рисунок 6 – Графическое представление выбранных жестов

Пример собранных данных представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример данных для обучения модели

id	field_x	field_y	field_z	timestamp	id_phone	type_action	num_ex
53	0,61102062463760	-2,6297397613525	10,14796352386	2,53E+14	6,89E+08	4	7,31E+08
54	0,85807800292968	-1,9876708984375	9,588699340820	2,53E+14	6,89E+08	4	7,31E+08
55	0,85807800292968	-1,9876708984375	9,588699340820	2,53E+14	6,89E+08	4	7,31E+08
56	-0,352984607219696	-1,6766933202743	8,730855941772	2,53E+14	6,89E+08	4	7,31E+08
57	-0,37733459472656	-1,6704406738281	8,713607788085	2,53E+14	6,89E+08	4	7,31E+08

На рисунке 7 представлен график значений акселерометра по трем осям при воспроизведении фигуры «квадрат».

Далее полученные данные были использованы для обучения модели нейронной сети, которая лежит в основе распознавания жестов пользователя мобильного устройства.

Поскольку самым слабым местом в обработке параметров, поступающих с датчиков мобильных устройств, является этап выделения признаков, оптимальным решением будет применить метод машинного обучения, который меньше зависит от качества выделения этих признаков [17]. Кроме того, выделение признаков – довольно емкая операция с точки зрения временных затрат, и в большинстве случаев выбранные признаки могут не отражать всю сложность взаимосвязей и закономерностей, которые могут быть в анализируемых данных. При анализе методы глубокого обучения дают более высокие результаты по классификации и распознаванию объектов, чем подходы, которые основываются на признаках, выделенных вручную. Нейронные сети и глубокое обучение, в частности, все активнее захватывают первенство среди методов машинного обучения. При решении задачи распознавания жестов человека, совершаемых смартфоном, на основе показаний акселерометра данные с датчиков рассматриваются как одномерная сеть из выборочных совокупностей, полученных через равные интервалы времени. Как показывает анализ работ в этом области, нейронные сети можно использовать в обработке сигналов, что позволяет отказаться от этапа выделения признаков, поскольку обучение нейронной сети включает этот этап.

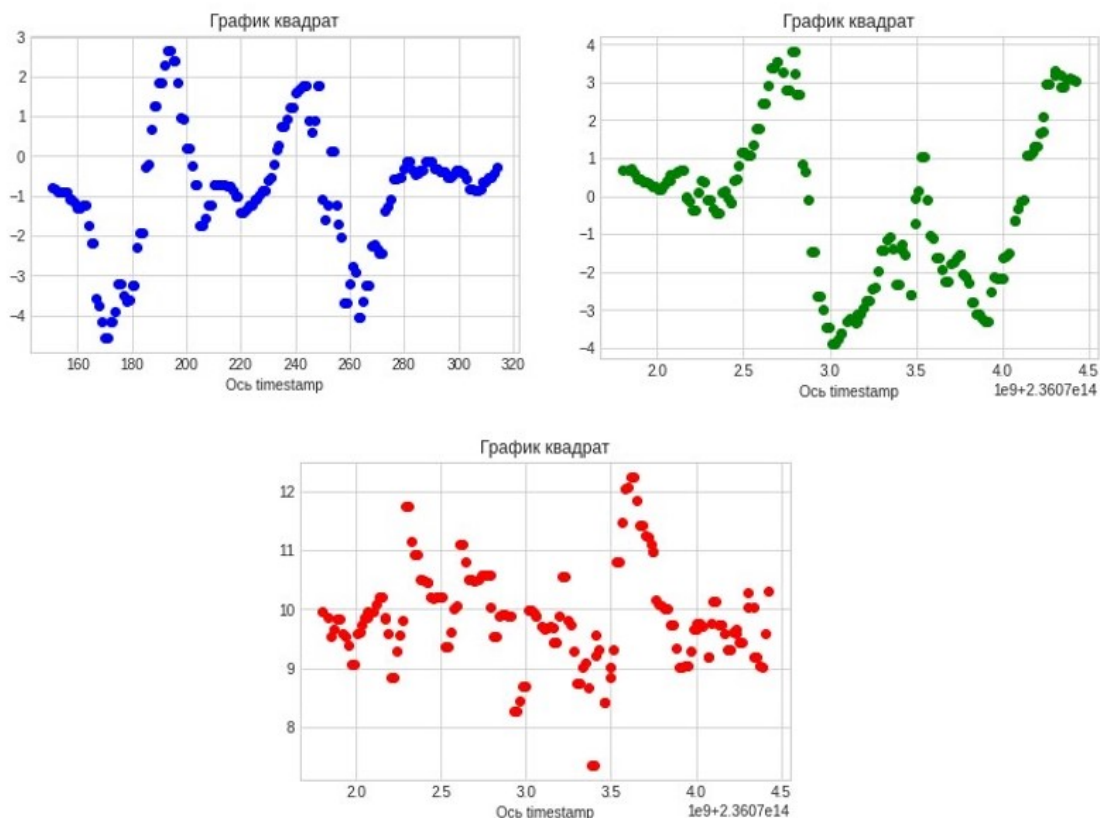


Рисунок 7 – График показаний трехосевого акселерометра для жеста «квадрат»

Для проектирования нейронной сети необходимо сначала определить количество нейронов во входном и выходном слоях. Поскольку в качестве примеров распознаваемых движений было выбрано 5 движений (круг, квадрат, треугольник, буква «М» и цифра «8»), а также обычные движения смартфоном, которые не должны быть определены как распознаваемое движение, то выходной слой нейронной сети должен составить 6 нейронов.

На вход нейронной сети подаются показания с трехосевого акселерометра. Проанализируем, сколько точек было получено для различных движений. Общее количество экспериментов составило 243. Из них:

- квадрат (40 штук);
- треугольник (36 штук);
- круг (40 штук);
- восьмерка (45 штук);
- буква «М» (43 штуки);
- движения смартфоном при обычной эксплуатации (39 штук).

Количество точек данных на эксперимент составило от 100 до 255. При этом поскольку показания снимались с трехосевого акселерометра, то каждая точка включала в себя значения по трем плоскостям. Таким образом, было принято решение – на вход сети подавать 100 точек данных, а количество нейронов во входном слое составило  $100 * 3$  штук. Для работы были спроектированы несколько нейронных сетей с количеством скрытых слоев 2 и 3. Общие характеристики сетей представлены в таблице 2.

В качестве функции потери была использована «перекрестная энтропия классификации» и оптимизатор Adam. В оптимизаторе скорость обучения позволяет задать допустимую степень изменения весовых коэффициентов в нейронной сети в отношении градиента потери. В ходе обучения для данного параметра использовалось значение 0,001.

Далее имеющийся датасет был разделен на две части: для обучения и тестирования в отношении 70 % и 30 %. После этого нейронные сети были обучены. Количество эпох во всех экспериментах составило 50. Этого количества было достаточно, чтобы сеть обучилась и перестала улучшать свои показатели.

Таблица 2 – Параметры нейронных сетей

№	Количество скрытых слоев	Количество нейронов в первом слое	Количество нейронов во втором слое	Количество нейронов в третьем слое
НС1	3	64	64	32
НС 2	3	256	128	64
НС 3	3	256	256	256
НС 4	3	64	64	64
НС 5	2	64	64	–
НС 6	2	32	32	–
НС 7	2	16	16	–
НС 8	2	32	16	–
НС 9	2	32	8	–
НС 10	2	64	32	–
НС 11	2	128	32	–

Лучше показатели обученных сетей представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты обучения нейронных сетей

	НС 1	НС 2	НС 3	НС 4	НС 5	НС 6	НС 7	НС 8	НС 9	НС 10	НС 11
Ассигасу всей модели, %	91	91	91	93	93	93	93	94	93	94	93
Ассигасу квадрат, %	82	88	82	88	88	88	82	88	82	88	88
Ассигасу треугольник, %	80	60	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ассигасу круг, %	100	100	91	100	91	91	100	100	100	100	91
Ассигасу восьмерка, %	100	100	100	92	100	100	100	100	100	100	100
Ассигасу буква «М», %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ассигасу обычные движения, %	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85

Как видно из таблицы, лучшие показатели были у сетей с относительно небольшим количеством нейронов. Лучшие показатели были у сетей НС 8 и НС 10. В работу была выбрана сеть НС 8, так как у нее было наименьшее количество нейронов из рассмотренных двух сетей.

При разработке серверной части информационной системы были использованы следующие технологии:

- Spring Framework;
- Spring boot;
- Flask;
- СУБД PostgreSQL;
- языки программирования Java и Python.

При запуске сервер загружает переобученную модель полносвязной нейронной сети и ожидает запросы, поступающие с основного сервера. После получения данных сначала происходит их обработка и сокращение количества элементов массива с показаниями акселерометра до 100 элементов. Далее все показатели «вытягиваются» в один массив, при этом показания по трем осям акселерометра записываются последовательно друг с другом. На выходе получается 300 точек данных, которые преобразовываются в тензор и передаются на вход модели. Выходные данные с информацией о распознанном жесте, а также информация об идентификаторе телефона в JSON-формате передаются на основной сервер.

В ходе выполнения исследования было разработано мобильное приложение для ОС Android. Приложение включает 8 форм и взаимодействует с сервером посредством сети с применением технологии REST. Снятие показаний с акселерометра осуществлялось стандартными средствами ОС Android. Для взаимодействия с сервером со стороны мобильного приложения был реализован ряд запросов, соответствующий API сервера. Для разработки запросов была использована библиотека Retrofit, применение которой позволило значительно ускорить и упростить разработку программного продукта. Каждый запрос выполняется в отдельном асинхронном потоке, что позволяет избавиться от «зависания» пользовательского интерфейса на время, пока ожидается ответ сервера. Поскольку приложение должно непрерывно отсылать на сервер показания акселерометра (даже в случае, если пользователь его свернул или закрыл), было принято решение вынести код отправки данных на сервер в отдельный поток и оформить его в виде сервиса (Service) – специального компонента мобильного приложения, который может выполнять длительные операции в фоновом режиме.

Таким образом, разработанное мобильное приложение позволяет собирать показания акселерометра смартфона и передавать их на сервер для дальнейшего распознавания движения мобильным устройством с применением методов машинного обучения, выводить на экран информацию о характере движения, полученную с сервера.

Результаты распознанных жестов, отображаемые на главной форме, представлены на рисунках 8 и 9.

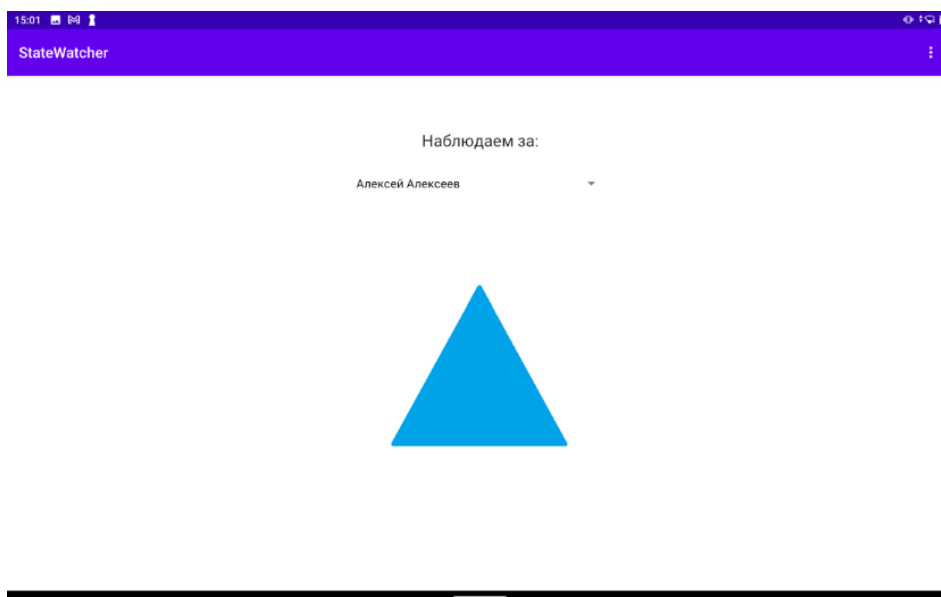


Рисунок 8 – Отображение распознанного жеста пользователя (треугольник)

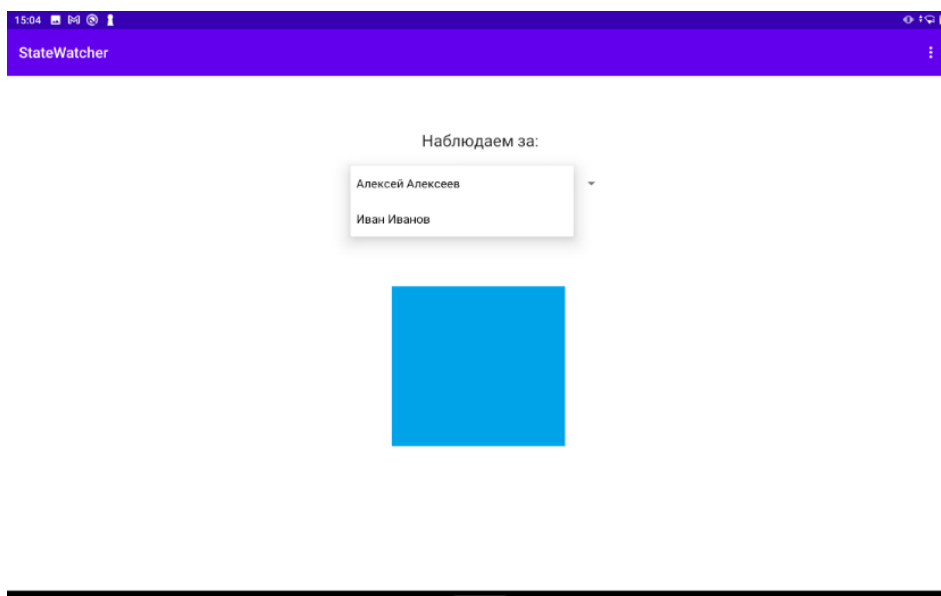


Рисунок 9 – Отображение распознанного жеста пользователя (квадрат)



**Заключение.** Таким образом, в ходе работы были предложены решения, направленные на сбор, обработку информации, получаемых от пользователя смартфона; была описана предложенная методика для распознавания поведенческих черт пользователя смартфона и методики формирования наборов данных для обучения модели. Было разработано и протестировано мобильное приложение, которое позволяет собирать показания акселерометра смартфона и передавать их на сервер для дальнейшего распознавания движения мобильным устройством с применением методов машинного обучения, выводить на экран информацию о характере движения, полученную с сервера. Результаты тестирования позволяют говорить о полноценности разработанного прототипа приложения.

#### Библиографический список

1. Отчет об утечках данных за 1 полугодие 2022 года // INFOWATCH. – Режим доступа: [https://www.infowatch.ru/sites/default/files/analytics/files/otchyot-ob-utechkakh-dannykh-za-1-polugodie-2022-goda\\_1.pdf](https://www.infowatch.ru/sites/default/files/analytics/files/otchyot-ob-utechkakh-dannykh-za-1-polugodie-2022-goda_1.pdf), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 21.12.2022).
2. Committee on technology, committee on homeland and national security, subcommittee on biometrics // *Vascular Pattern Recognition*. – 2006. – P. 1–33.
3. Banerjee, S. P. Biometric authentication and identification using keystroke dynamics: A survey / S. P. Banerjee and D. L. Woodard // *Journal of Pattern Recognition Research*. – 2012. – Vol. 7, no. 1. – P. 116–139.
4. Teh, Pin Shen. A survey on touch dynamics authentication in mobile devices / Teh, Pin Shen, Zhang, Ning, Teoh, Andrew Beng Jin et al. // *Computers and Security*. – 2016. – Vol. 59. – P. 210–235.
5. Wan, Changsheng. A survey on gait recognition / Wan, Changsheng, Wang, Li, Phoha, Vir V. // *ACM Computing Surveys*. 2018. – Vol. 51, № 5.
6. Giuffrida, C. I Sensed It Was You: Authenticating Mobile Users with Sensor-enhanced Keystroke Dynamics / C. Giuffrida, K. Majdanik, M. Conti et al. // *Proceedings of the 11th Conference on Detection of Intrusions and Malware and Vulnerability Assessment (DIMVA)*. – Springer, 2014. – P. 92–111 (Lecture Notes in Computer Science).
7. Darabseh, A. Keystroke Active Authentications Based on Most Frequently Used Words / A. Darabseh & A. S. Namin // *Proceedings of the 2015 ACM International Workshop on International Workshop on Security and Privacy Analytics*. – 2015.
8. Alghamdi, S. J. Dynamic authentication of smartphone users based on touchscreen gestures / S. J. Alghamdi, and L. A. Elrefaie // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2018. – № 43 (2). – P. 789–810.
9. Larcher, A. Text-dependent speaker verification: Classifiers, databases and RSR2015 / A. Larcher, K. Lee, B. Ma, & H. Li // *Speech Commun.* – 2014. – Vol. 60. – P. 56–77.
10. Liu, X. Multi-source interactive behavior analysis for continuous user authentication on smartphones / X. Liu, C. Shen, Y. Chen // *CCBR 2018. LNCS*. – 2018. – Vol. 10996. – P. 669–677.
11. Bassu, D., Cochinwala, M. & Jain, A. // 2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security. – HST, 2013. – P. 441–446.
12. Li, Fudong. Active authentication for mobile devices utilising behaviour profiling / Li, Fudong, Clarke, Nathan, Papadaki, Maria et al. // *International Journal of Information Security*. – 2014. – Vol. 13, № 3. – P. 229–244.
13. Datta, Trisha. Using SVM for user profiling for autonomous smartphone authentication / Datta, Trisha and Kyriakos Manousakis // 2015 IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC). – 2015. – P. 1–5.
14. Zheng, N. You are how you touch: User verification on smartphones via tapping behaviors / N. Zheng, K. Bai, H. Huang, H. Wang // *International Conference on Network Protocols, ICNP*. – 2014. – P. 221–232.
15. Trojahn, M. Toward mobile authentication with keystroke dynamics on mobile phones and tablets / M. Trojahn, F. Ortmeier // *Proceedings of the 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Barcelona, Spain, 25–28 March 2013*. – P. 697–702.
16. Десятов, Сергей Васильевич. Сравнительный анализ достоинств и недостатков наиболее распространенных методов идентификации и аутентификации пользователей и других участников идентификационных процессов / Сергей Васильевич Десятов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2021. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-dostoinstv-i-nedostatkov-naiboleerasprostranennyh-metodov-identifikatsii-i-autentifikatsii-polzovateley-i>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 22.12.2022).
17. Panagiotis, Kasnesis. Changing Mobile Data Analysis through Deep Learning / Panagiotis Kasnesis, Charalampos Z. Patrikakis, Iakovos S. Venieris // *IT Pro*, May/June 2017. IEEE Computer Society. – Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2017/03/13052701>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 04.01.2023).

#### References

1. Otchot ob utechkakh dannykh za 1 polugodiye 2022 goda [Data Breach Report for 1H 2022]. *INFOWATCH*. Available at: [https://www.infowatch.ru/sites/default/files/analytics/files/otchyot-ob-utechkakh-dannykh-za-1-polugodie-2022-goda\\_1.pdf](https://www.infowatch.ru/sites/default/files/analytics/files/otchyot-ob-utechkakh-dannykh-za-1-polugodie-2022-goda_1.pdf) (accessed 12.21.2022).
2. Committee on technology, committee on homeland and national security, subcommittee on biometrics. *Vascular Pattern Recognition*, 2006, pp. 1–33.
3. Banerjee, S. P. and Woodard, D. L. Biometric authentication and identification using keystroke dynamics: A survey. *Journal of Pattern Recognition Research*, vol. 7, no. 1, 2012, pp. 116–139.
4. Teh, Pin Shen, Zhang, Ning, Teoh, Andrew Beng Jin et al. A survey on touch dynamics authentication in mobile devices. *Computers and Security*, 2016, vol. 59. pp. 210–235.
5. Wan, Changsheng, Wang, Li, Phoha, Vir V. A survey on gait recognition. *ACM Computing Surveys*, 2018, vol. 51, no. 5.

6. Giuffrida, C., Majdanik, K., Conti, M. et al. I Sensed It Was You: Authenticating Mobile Users with Sensor-enhanced Keystroke Dynamics. *Proceedings of the 11th Conference on Detection of Intrusions and Malware and Vulnerability Assessment (DIMVA)*. Springer, 2014, pp. 92–111 (Lecture Notes in Computer Science).
7. Darabseh, A., & Namin, A. S. Keystroke Active Authentications Based on Most Frequently Used Words. *Proceedings of the 2015 ACM International Workshop on International Workshop on Security and Privacy Analytics*, 2015.
8. Alghamdi, S. J. and Elrefaei, L. A. Dynamic authentication of smartphone users based on touchscreen gestures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, no. 43 (2), pp.789–810.
9. Larcher, A., Lee, K., Ma, B., & Li, H. Text-dependent speaker verification: Classifiers, databases and RSR2015. *Speech Commun.*, 2014, vol. 60, pp. 56–77.
10. Liu, X., Shen, C., Chen, Y. Multi-source interactive behavior analysis for continuous user authentication on smartphones. *CCBR 2018. LNCS*, 2018, vol. 10996, pp. 669–677.
11. Bassu, D., Cochinwala, M. & Jain, A. *2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security*. HST 2013. pp. 441–446.
12. Li, Fudong, Clarke, Nathan, Papadaki, Maria et al. Active authentication for mobile devices utilising behaviour profiling. *International Journal of Information Security*, 2014, vol. 13, no. 3. pp. 229–244.
13. Datta, Trisha and Kyriakos Manousakis. Using SVM for user profiling for autonomous smartphone authentication. *2015 IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC)*, 2015, pp. 1–5.
14. Zheng, N., Bai, K., Huang, H., Wang, H. You are how you touch: User verification on smartphones via tapping behaviors. *International Conference on Network Protocols, ICNP*, 2014, pp. 221–232.
15. Trojahn, M., Ortmeier, F. Toward mobile authentication with keystroke dynamics on mobile phones and tablets. *Proceedings of the 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Barcelona, Spain, 25–28 March 2013*, pp. 697–702.
16. Desyatov, Sergey Vasilievich. Sravnitelnyy analiz dostoinstv i nedostatkov naiboleye rasprostranennykh metodov identifikatsii i autentifikatsii polzovateley i drugikh uchastnikov identifikatsionnykh protsessov [Comparative analysis of the advantages and disadvantages of the most common methods of identification and authentication of users and other participants in identification processes]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2021. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-dostoinstv-i-nedostatkov-naiboleerasprostranennykh-metodov-identifikatsii-i-autentifikatsii-polzovateley-i> (accessed 12.22.2022).
17. Panagiotis, Kasnesis, Charalampos, Z. Patrikakis, Iakovos, S. Venieris, Changing Mobile Data Analysis through Deep Learning. *IT Pro, May/June 2017, IEEE Computer Society*. Available at: <https://www.osp.ru/os/2017/03/13052701> (accessed 04.01.2023).

УДК 004.942

## МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ 3D ОБЛАКОВ ТОЧЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕКЦИИ ПЛОСКОСТЕЙ И КОРРЕЛЯЦИИ ГИСТОГРАММ<sup>1</sup>

*Статья поступила в редакцию 27.01.2023, в окончательном варианте – 08.02.2023.*

**Msallam Majdi**, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 36, аспирант, ORCID: 0000-0002-9529-8289, e-mail: majdi.f.msallam@gmail.com

**Сырямкин Владимир Иванович**, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 36, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством, ORCID: 0000-0001-5610-8940, e-mail: svi\_tsu@mail.ru

Итеративный алгоритм ближайших точек (англ. Iterative Closest Point, ICP) является одним из наиболее известных алгоритмов, который был представлен для решения задачи регистрации трехмерных облаков точек благодаря своей простоте, легкости для понимания и реализации. Однако алгоритм ICP имеет некоторые недостатки, такие как сходимость к локальному минимуму и низкая скорость. В литературе было представлено большое количество работ с целью улучшения алгоритма ICP с точки зрения его скорости, точности и прочности. В этой статье представляется краткое описание основных этапов алгоритма ICP. Кроме того, предлагается новая методика для решения задачи приближенной регистрации, которая заставляет алгоритм ICP сходиться к глобальному решению. Предлагаемая методика основана на предположении, что трехмерная сцена содержит по меньшей мере одну горизонтальную плоскость и одну вертикальную плоскость, которые обнаруживаются и используются для исправления поворотов и переносов в двух регистрируемых облаках точек. Кроме того, представляется методика получения эталонных данных (англ. Ground Truth, GT) из любого облака точек для расчета метрик, оценивающих производительность алгоритмов регистрации. На основе сеток занятости предлагается новая метрика, которая учитывает все точки трехмерной сцены при ее расчете, она также может учитывать информацию о цвете. Предложенная методика реализована и протестирована с использованием набора данных RGB-D Objects dataset. Результаты моделирования показали, что предложенная методика позволяет выполнять регистрацию с высокой точностью порядка долей миллиметра, при этом общее время выполнения регистрации равно или меньше, чем у рассматриваемого варианта алгоритма ICP.

**Ключевые слова:** робототехника, система технического зрения, реконструкция 3D-карты, регистрация облаков точек, итеративный алгоритм ближайших точек

## A METHOD FOR 3D POINT CLOUD REGISTRATION USING PLANE CORRECTION AND HISTOGRAM CORRELATION

*The article was received by the editorial board on 27.01.2023, in the final version – 08.02.2023.*

**Msallam Majdi**, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0000-0002-9529-8289, e-mail: majdi.f.msallam@gmail.com

**Sryamkin Vladimir I.**, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Department of Quality Management, ORCID: 0000-0001-5610-8940, e-mail: svi\_tsu@mail.ru

The Iterative Closest Point (ICP) algorithm is one of the most well-known algorithms that have been introduced to solve the problem of 3D point clouds registration due to its simplicity, ease of understanding and implementation. However, the ICP algorithm has some drawbacks such as convergence to a local minimum and low speed. A lot of work has been done in the literature to improve the ICP algorithm in terms of speed, accuracy, and robustness. In this paper, we provide a brief description of the main steps of the ICP algorithm. We also present a new method for solving the problem of coarse registration that enables the ICP algorithm to converge to the global solution. The proposed method is based on the assumption that the 3D scene contains at least one horizontal plane and one vertical plane, which are detected and used to correct rotations and translations in the two input point clouds. In addition, we present a technique for obtaining a Ground Truth (GT) from any point cloud to calculate metrics that evaluate the performance of registration algorithms. We also propose a new evaluation metric based on occupancy grids, it takes into account all points of the scene, it can also take into account color information.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00389, <https://rscf.ru/project/22-19-00389/>.

We have implemented and tested the proposed methods using RGB-D Objects dataset. Simulation results show that the proposed method allows registering 3D point clouds with a high accuracy of the order of fractions of a millimeter, while the total execution time is equal to or less than that of the considered ICP variant.

**Keywords:** robotics, vision system, reconstruction of 3D map, point cloud registration, iterative closest point

#### Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Регистрация трехмерных (3Д) фигур представляет собой процесс нахождения наиболее подходящего геометрического преобразования, которое перемещает 3Д фигуру в правильное положение и направление относительно другой фигуры (эталонной фигуры) [1, 2]. Процесс регистрации полезен во многих приложениях, например в задаче построения 3Д объекта, где полная фигура устанавливается путем регистрации различных ее частей по отношению к эталону. Другим важным приложением является построение 3Д карты окружающей среды, где регистрируются последовательные снимки трехмерной сцены, чтобы получить одно общее множество для всей трехмерной сцены.

Существует несколько способов представления 3Д фигур, таких как полигональные сетки (англ. polygon mesh), изображения RGB-D, облака точек и др. В статье предполагается, что фигуры представлены с помощью облаков точек из-за широкого использования этого представления, его эффективности и простоты [3], также можно переходить к этому представлению от любого другого представления. Например, параметры камеры могут быть использованы для вычисления положения в 3Д пространстве каждого пикселя изображения RGB-D, а в случае полигональной сетки можно отбирать выборки с элементарных поверхностей объекта для получения точек облака [4].

В литературе говорится о большом количестве приложений для регистрации облаков точек, в том числе [5]: поисково-спасательные операции, например для спасения рабочих при авариях на шахтах и для поддержки пожарных; автоматизация инспекций, таких как осмотр и техническое обслуживание электростанций, а также обследование опасных зон, доступ в которые представляет опасность для жизни человека [6].

Общепринятая стратегия регистрации облаков точек состоит в том, чтобы перейти от приблизительной регистрации к точной, при этом сначала используется методика приблизительной регистрации, чтобы получить приблизительную первоначальную оценку желаемого геометрического преобразования, а затем используется другая методика точной регистрации [7].

На рисунке 1 представлена классификация различных методов регистрации [7]. У методов приблизительной регистрации, основанных на точках, существует несколько недостатков, таких как высокая чувствительность к шуму, низкая прочность, высокая сложность и низкая точность. Методы, основанные на линиях, имеют более высокую точность. В методах, основанных на плоскостях, можно получить больше информации из плоскостей, чем точки и линии. Кроме того, шум оказывает меньшее влияние на плоскости. Примерами плоскостей являются полы, крыши зданий, фасады зданий, стены и т.д. Для извлечения плоскостей из трехмерной сцены существует несколько вариантов, таких как метод наименьших квадратов (англ. Least Squares), алгоритм RANSAC [8] (от англ. Random Sample Consensus) и анализ основных компонентов (англ. Principal Component Analysis, PCA). Остальные методы включают те, основанные на других геометрических фигурах, таких как круги, цилиндры и сферы, в дополнение к методам, основанным на семантической сегментации.

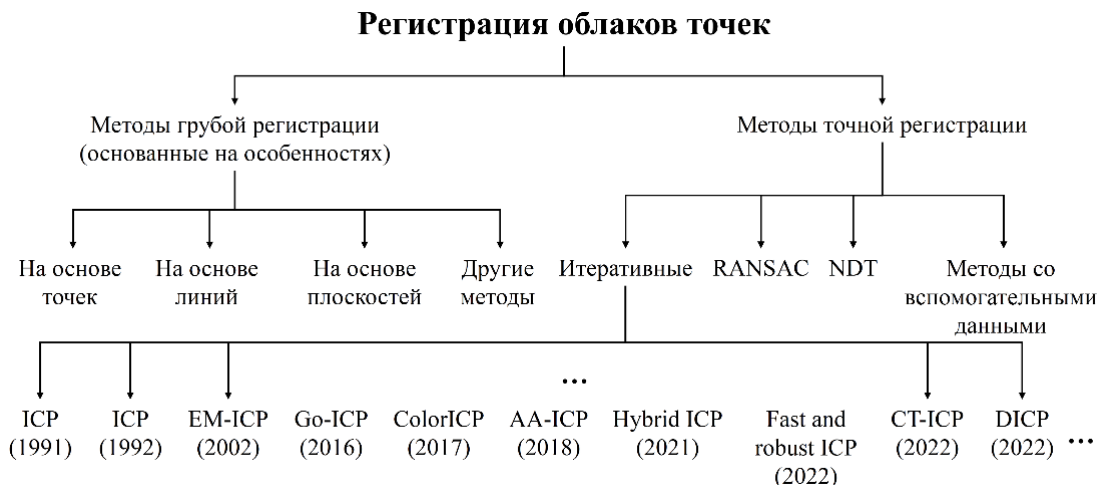


Рисунок 1 – Классификация методов регистрации облаков точек

Методы RANSAC для точной регистрации были впервые предложены в 1981 г. [8], они широко используются при регистрации и дают хорошие результаты даже при небольших перекрытиях между регистрируемыми облаками точек, но они требуют итеративной выборки и расчета согласованности облаков точек, а это влияет на скорость и точность. Методы NDT (преобразование нормального распределения от англ. Normal Distribution Transform) восходят к 2003 г. [9]. В этих методах облако точек преобразуется в трехмерную сетку, ячейки которой представлены с помощью непрерывных дифференцируемых функций нормального распределения. Методы NDT имеют высокую скорость и точность, они подходят для обработки крупномасштабных и больших облаков точек. Одним из недостатков этих методов является сложность выбора оптимального размера сетки, описывающей облако точек наилучшим образом. Методы с вспомогательными данными могут использовать данные другого характера, такие как местоположения от глобальной навигационной спутниковой системы. Кроме того, двухмерные изображения считаются вспомогательными данными, из которых можно вычислять двухмерные особенности, которые обладают большой надежностью и прочностью. Существуют и другие методы, в которых используются стандартные объекты, распределенные по трехмерной сцене, но применение таких методов очень ограничено.

Итерационные методы относятся к алгоритму ICP [1, 2] и его вариантам. В [2] авторы математически продемонстрировали, что алгоритм ICP всегда монотонно сходится к локальному решению с использованием функции среднеквадратичного расстояния. Для сходимости к общему решению алгоритм ICP предполагает, что имеется приблизительная первоначальная оценка требуемого преобразования, т. е. облака точек на входе алгоритма зарегистрированы, но в приблизительном виде, и задача алгоритма сводится к нахождению точного преобразования. Недостаток алгоритма ICP заключается в том, что он не рассматривает соответствия между точками двух входных облаков точек как вероятностную переменную. Скорее, всегда есть соответствия между каждой точкой первого облака точек и другой точкой второго (бинарное соответствие), и это приводит к плохой производительности в случае шума и выбросов [10, 11]. Учитывая важность алгоритма ICP и из-за его недостатков, в литературе было представлено большое количество работ для улучшения его производительности, будь то с точки зрения точности, сложности или устойчивости к наличию шума и выбросов [11–18].

Существует много методов получения первоначальной оценки преобразования в качестве входных данных для алгоритма ICP. Эти методы включают в себя: отслеживание положения сканера; использование особенностей поверхностей; определение принципиальных осей облаков точек; исчерпывающий поиск соответствующих точек и др. [19]. В работе [20] была представлена методика регистрации облаков точек в режиме реального времени в приложении SLAM (от англ. Simultaneous Localization And Mapping). Эта методика очень похожа на методику, предлагаемую в этой статье, где сначала находится плоскость пола с помощью алгоритма RANSAC и корректируется ее направление, затем облако точек проецируется на эту плоскость, уменьшая тем самым размерность с 6 до 3. Проекция облака точек представляется с помощью вероятностных карт занятости (англ. Occupancy Maps), преимуществом которых является то, что они позволяют соединять данные разной природы. После расчета карт занятости находятся повороты вокруг вертикальной оси и переносы по осям  $x$  и  $y$  методом фазовой корреляции (англ. Phase Correlation). Одним из недостатков предложенной методики в работе [20] является то, что определение размеров карты занятости производится пользователем вручную в соответствии с используемыми данными и размерами рассматриваемой трехмерной сцены. Его сложность также резко возрастает при увеличении размеров карты

занятости или уменьшении размеров ее ячеек. Кроме того, на практике обнаружено, что этот алгоритм неудачно выполняет регистрацию на большом количестве тестовых образцов.

В статье предлагается другой способ для нахождения поворота вокруг оси  $z$ , в котором обнаруживается вертикальная плоскость и корректируется ее направление так же, как это делается с помощью плоскости пола. Что касается расчета переносов по осям  $x$  и  $y$ , предлагается методика на основе корреляции гистограмм (англ. histogram correlation). Предлагаемая методика характеризуется высокой точностью и низкой сложностью, как будет показано в разделе 1.3.

## 1. Описание методов.

**1.1. Алгоритм ICP.** Пусть  $P$  и  $Q$  – два множества точек называются зарегистрированными, если одно из них размещено в правильном положении и направлении относительно другого множества, а это означает, что имеется преобразование  $T$ , которое при применении к точкам первого множества позволяет переместить его на правильное положение и направление по отношению к точкам другого множества, а математически это можно выразить следующим образом [1]:

$$\forall p_i \in P, \exists q_j \in Q \|\|Tp_i - q_j\| = 0, \quad (1)$$

где  $Tp_i$  – применение преобразования  $T$  к точке  $p_i$ .

Алгоритм ICP стал доминирующим для достижения выравнивания 3D-облаков точек, которые можно получить с помощью 3D-лазерных сканеров или камер RGB-D. Этот алгоритм в основном использует информацию о местоположении точек, но также может использовать информацию об их цвете [19]. На рисунке 2 показана блок-схема алгоритма ICP, предложенного в работе [2]. На вход алгоритма подаются два множества 3D данных, которые могут быть в любом представлении, но, как упоминалось ранее, предполагается, что они представлены с помощью облаков точек. Задача алгоритма заключается в том, чтобы найти наиболее подходящее преобразование, которое выравнивает одно облако точек, называемое движущимся, с другим облаком точек, называемым фиксированным (эталонным).

Алгоритм предполагает, что существует приблизительная первоначальная оценка преобразования между двумя облаками точек, т. е. они почти зарегистрированы, а в противном случае, когда нет такой оценки, алгоритм будет сходиться к локальному, а не к глобальному решению. Следовательно, начальным значением преобразования на первой итерации алгоритма является единичное преобразование (англ. identity transformation), т. е. с единичной матрицей поворота и нулевым вектором переноса. Поворот можно представлять с помощью кватернионов, при этом каждая матрица поворота эквивалентна четырем значениям кватерниона, к которым добавляется три значения переноса, чтобы получить вектор с семью значениями, представляющими все преобразование. Алгоритм итеративно улучшает оценку преобразования, находя пары соответствующих точек из двух облаков точек и минимизируя одну метрику ошибки между ними. Далее перечислены шаги алгоритма ICP [19]:

1. Выбор подмножества точек одного или обоих облаков точек: этот шаг может быть достигнут с использованием процесса уменьшения частоты дискретизации (англ. downsampling), что можно сделать, например, путем случайного выбора определенного количества точек. Другие методы включают выбор точек на регулярной основе, выбор точек с самым высоким градиентом интенсивности и выбор точек на основе распределения векторов нормали поверхностей. В общем случае предпочтительно выбирать точки из обоих облаков, чтобы снизить сложность.

2. Поиск пар соответствующих точек в двух облаках точек: для этого часто используется алгоритм KD-дерево (дерево  $k$ -мерного пространства от англ. kd-tree), который зависит от евклидова расстояния, чтобы найти ближайшую точку фиксированного облака точек к каждой точке движущегося облака точек.

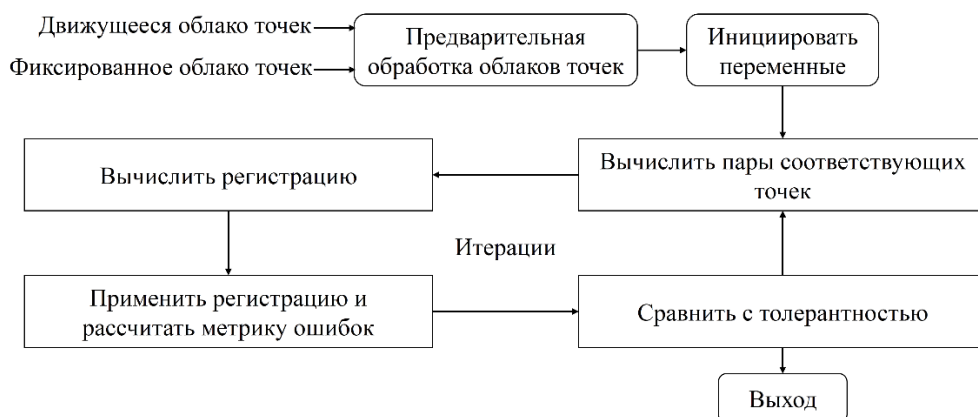


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма ICP

3. Взвешивание найденных пар соответствующих точек: самый простой способ – присвоить всем парам постоянный вес. Однако существуют и другие методы, такие как определение весов обратно пропорционально расстоянию между точками или на основе значения внутреннего произведения векторов нормали. Как правило, влияние этого шага на производительность регистрации невелико и зависит от данных.

4. Удаление пар соответствующих точек, имеющих слабую связь: одним из способов реализации этого шага является удаление всех пар с расстоянием, превышающим определенный порог, или удаление фиксированного процента пар после их упорядочивания по расстоянию. Порог расстояния может быть задан как постоянное значение или вычислен из стандартного отклонения расстояний между точками. Некоторые другие методы исключают пары на основе совместимости с их соседними парами. В общем, удаление пар повышает точность и стабильность алгоритма, но может замедлить сходимость.

5. Расчет наиболее подходящего преобразования, которое переводит точки движущегося облака в соответствующие точки фиксированного облака точек, так что применение преобразования приводит к уменьшению метрики ошибки. Существует несколько различных метрик ошибки, наиболее распространенной является метрика point-to-point [2], где вычисляется сумма квадратов расстояний между соответствующими точками, и в этом случае существуют многие решения в замкнутой форме для расчета преобразования, такие как решения, основанные на сингулярном разложении; кватернионах; ортогональных матрицах и др. Предыдущая метрика также может учитывать информацию о цвете. Второй распространенной метрикой является метрика point-to-plane [1], где расстояние рассчитывается между точкой движущегося облака точек и плоскостью, содержащей точку фиксированного облака и направленной перпендикулярно ее вектору нормали.

Для ускорения сходимости алгоритма ICP в [2] предлагалось использование экстраполяции в пространстве преобразований с целью предсказания значения преобразования в следующей итерации в зависимости от значений текущей итерации и некоторых недавних итераций.

**1.2. Построение эталонных данных для оценки производительности алгоритмов регистрации.** В этом разделе представляется методика получения эталонных данных (англ. Ground Truth, GT) из любого облака точек с целью получения данных, необходимых для оценки любого алгоритма регистрации. После того как осуществить процесс регистрации и найти матрицу преобразования, необходимо сравнить значения переноса и поворота с истинными значениями, а также сравнить движущееся облако точек, полученное в результате процесса регистрации, с самим собой, когда оно идеально зарегистрировано. Чтобы получить такие данные, обычно измеряются положение и направление камеры во время захвата облаков точек.

Основная идея предлагаемой методики состоит в том, чтобы разделить исходное облако точек на два перекрывающихся облака точек в соответствии с заданным коэффициентом перекрытия от 0 до 1. Процесс деления происходит с точки зрения сканера, при этом общий интервал облака точек делится по горизонтали и/или по вертикали на два равных перекрывающихся интервала, один из которых содержит точки фиксированного облака точек, а второй – содержит точки движущегося облака точек. Соотношение объема региона перекрытия к объему фиксированного облака точек равно требуемому коэффициенту перекрытия. Предлагаемая методика позволяет контролировать и значение коэффициента перекрытия между двумя регистрируемыми облаками точек, и преобразование, которое оценивается алгоритмом регистрации.

Чтобы проиллюстрировать детали, предполагаем, что исходное облако точек получено из двух 2D-изображений, цвета и глубины. Также предполагаем, что деление будет производиться только по горизонтали ради простоты, то есть два получившихся облака точек будут иметь одинаковый интервал по вертикали, но перекрываются по горизонтали согласно заданному коэффициенту перекрытия. Шаги следующие:

1. Найти  $m$ , фактическую длину интервала исходного облака точек по горизонтали после удаления нулевых столбцов в начале и конце матрицы изображения глубины. Другими словами, надо найти  $c_1$  и  $c_2$ , индексы первого и последнего столбцов в матрице глубины, которые не равны нулю, а тогда получается, что  $m = c_2 - c_1 + 1$ .

2. Найти длину интервала каждого облака точек, полученного в результате деления в соответствии с требуемым коэффициентом перекрытия следующим образом:

$$n = \frac{m}{2 - \text{overlap}}; \quad \text{overlap} \in [0,1]. \quad (2)$$

3. Определить начало и конец каждого интервала и выполнить деление:

$$\text{Interval}_{\text{fixed}} = [c_1, c_1 + n - 1]; \quad \text{Interval}_{\text{moving}} = [c_1 + n \cdot (1 - \text{overlap}), c_2]. \quad (3)$$

На рисунке 3 показаны фиксированное и движущееся облака точек, полученные в результате процесса деления для нескольких различных значений коэффициента перекрытия. Движущееся облако точек в этом рисунке зарегистрировано идеально по отношению к фиксированному, так как оно находится в правильном положении и направлении по отношению к нему.



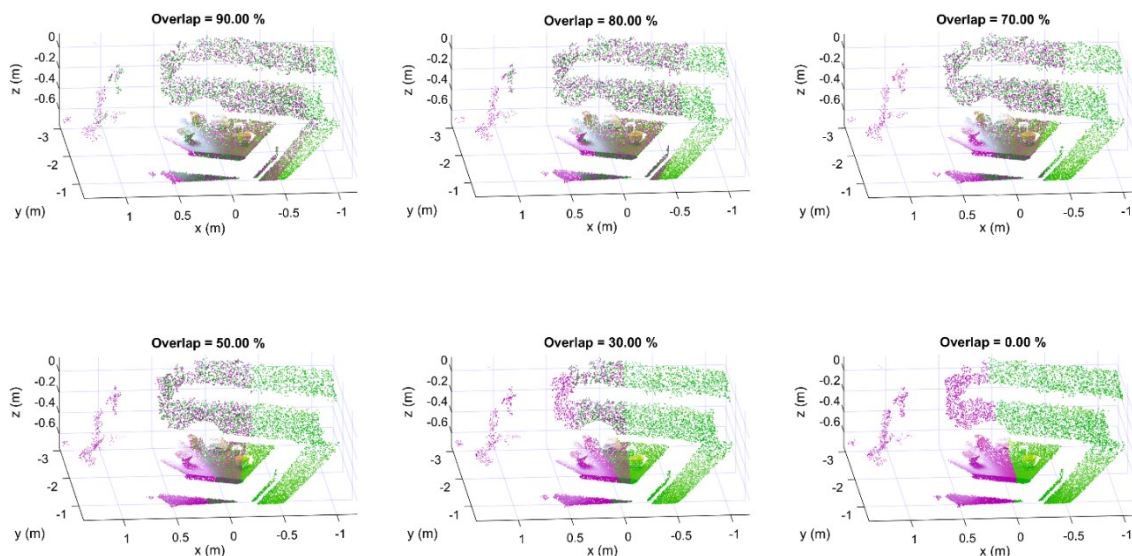


Рисунок 3 – Фиксированное и движущееся облака точек, полученные в результате разделения исходного облака точек одного кадра, для разных значений коэффициента перекрытия

Для получения входных данных алгоритма регистрации применяется произвольное геометрическое преобразование к движущемуся облаку точек, тогда задачей алгоритма регистрации будет оценка этого преобразования. На рисунке 4 показано движущееся облако точек до и после применения различных преобразований по шести рассматриваемым степеням свободы (включая 3 поворота вокруг трех осей координат и 3 переноса).

Перед запуском алгоритма регистрации фиксированное и движущееся облака точек проходят предварительную обработку, заключающуюся в избавлении от недействительных точек и уменьшении частоты дискретизации.

**1.3. Предлагаемая методика регистрации.** В предлагаемой методике предполагается, что фиксированное и движущееся облака точек содержат по меньшей мере одну горизонтальную плоскость и одну вертикальную плоскость. Горизонтальной плоскостью может быть пол, потолок, столешница, улица, крыша здания и т. д., а вертикальной плоскостью может быть стена, фасад здания, доска и т. д. Таким образом, предлагаемая методика подходит для структурированных сред, таких как внутренние и городские среды. Блок-схема предлагаемой методики представлена на рисунке 5 вместе с этапами построения эталонных данных, упомянутыми в разделе 1.2.

1. Первым шагом является обнаружение плоскости пола как в фиксированном, так и в движущемся облаках точек используя алгоритм RANSAC. После этого корректируются направления векторов нормали обнаруженных плоскостей. На рисунке 6 показаны фиксированное и движущееся облака точек после обнаружения в них плоскостей пола и корректировки направлений векторов нормали.

2. Следующим шагом является расчет переноса по оси  $z$ , и для этого применяется преобразование переноса к движущемуся облаку точек по оси  $z$  так, чтобы средняя высота точек его плоскости пола становится равной ей в фиксированном облаке точек, как показано на рисунке 7.

3. Третьим шагом является обнаружение вертикальной плоскости в двух облаках точек также используя алгоритм RANSAC, потом корректируется поворот по оси  $z$ . Для этого поворачиваются два облака точек до тех пор, пока проекции векторов нормали на плоскость  $x$ - $y$  не будут направлены в одну сторону. На рисунке 8 показаны фиксированное и движущееся облака точек после корректировки поворота по оси  $z$ .

4. Четвертым шагом предлагаемой методики является расчет двух переносов по осям  $x$  и  $y$  с использованием методики *корреляции гистограмм*. Основная идея в ней заключается в том, что для расчета переноса по оси  $x$ , например, вычисляется в двух облаках точек гистограмма распределения точек по этой оси, а потом вычисляется корреляционная функция между двумя получившимися гистограммами, а затем вычисляется перенос от пикового положения в полученной корреляционной функции. На рисунке 9 показаны две гистограммы по оси  $y$ , рассчитанные из фиксированного и движущегося облаков точек, в дополнение к корреляционной функции между ними.

5. Полученные облака точек после этих четырех шагов должны быть приблизительно зарегистрированы, поэтому применяется алгоритм ICP, чтобы получить точную оценку преобразования. В этом случае требуется всего несколько итераций для сходимости ICP.



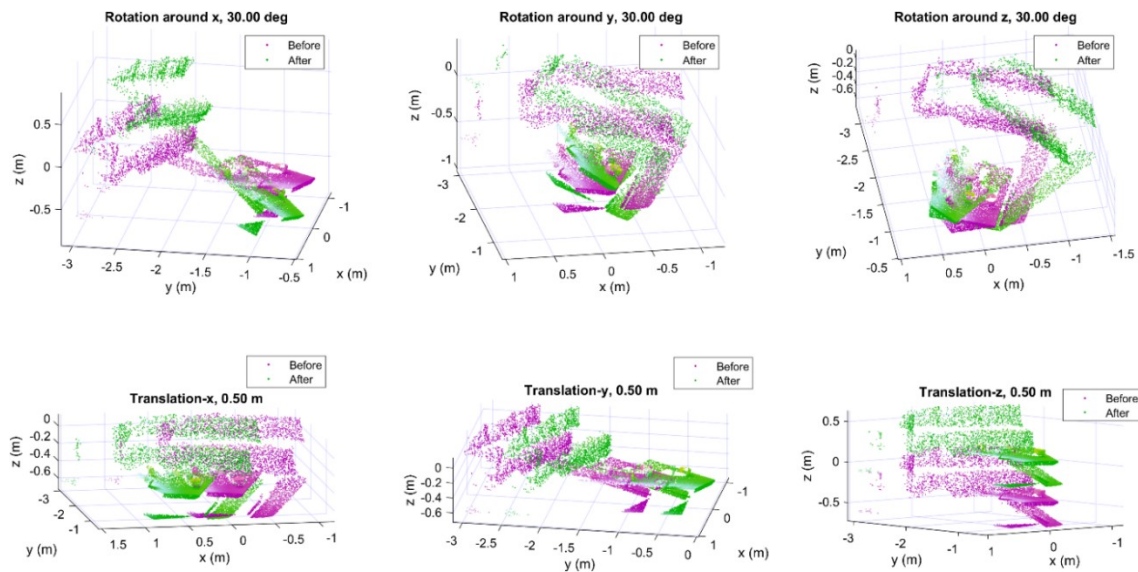


Рисунок 4 – Движущееся облако точек до и после примененного преобразования с шестью доступными степенями свободы, каждая из которых применяется здесь отдельно

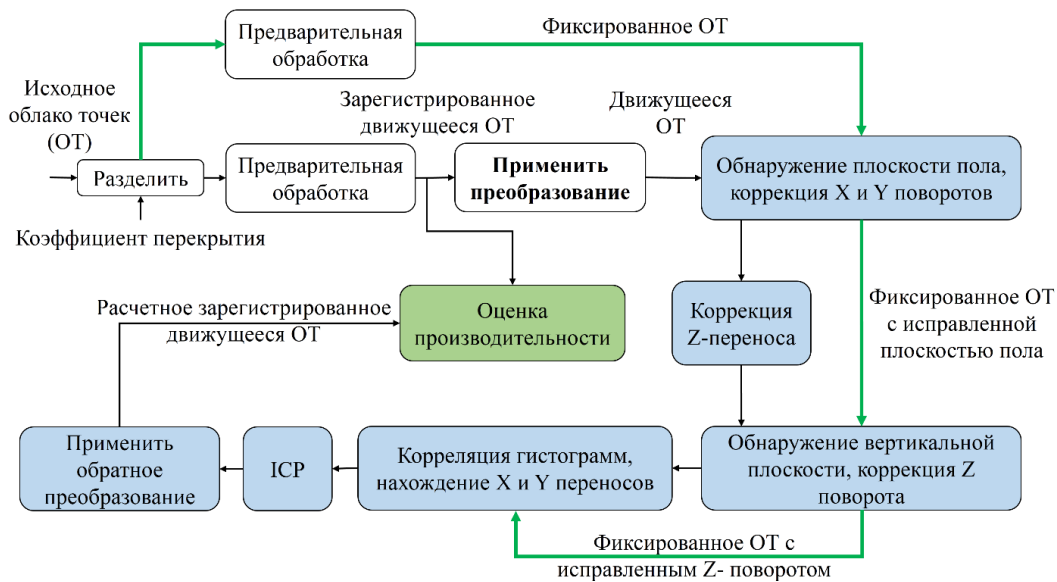


Рисунок 5 – Блок-схема предлагаемой методики регистрации трехмерных облаков точек

После реализации предыдущих шагов получается зарегистрированное движущееся облако точек по отношению к корректированному фиксированному облаку точек, поэтому применяется обратное преобразование поворота, чтобы вернуть движущееся облако точек в направлении исходного фиксированного облака точек. На рисунке 10 показаны фиксированное и движущееся облака точек после процедуры регистрации, а также показан результат слияния зарегистрированного движущегося облака точек с исходным фиксированным облаком точек.

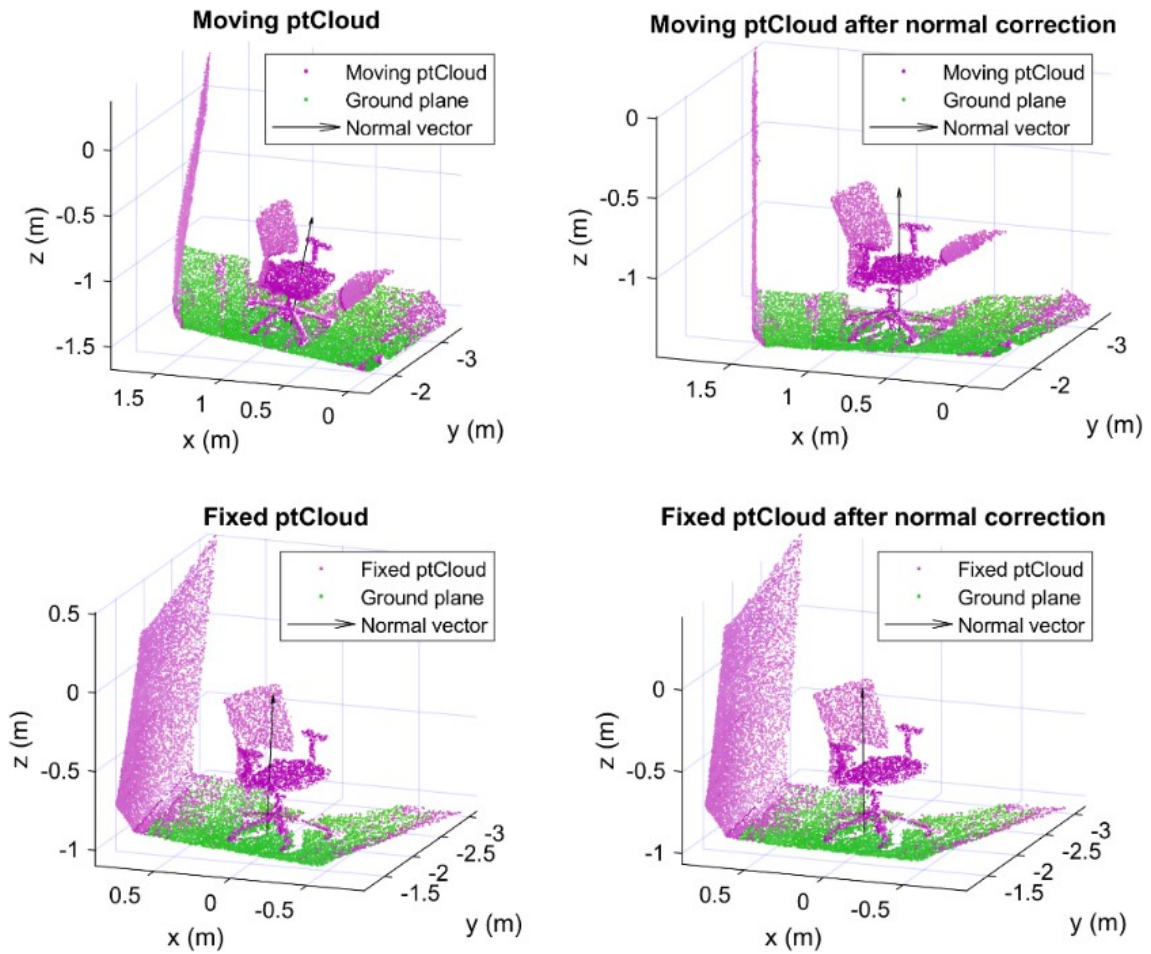


Рисунок 6 – Коррекция направления вектора нормали плоскости пола как для движущегося (вверх), так и для фиксированного (вниз) облаков точек

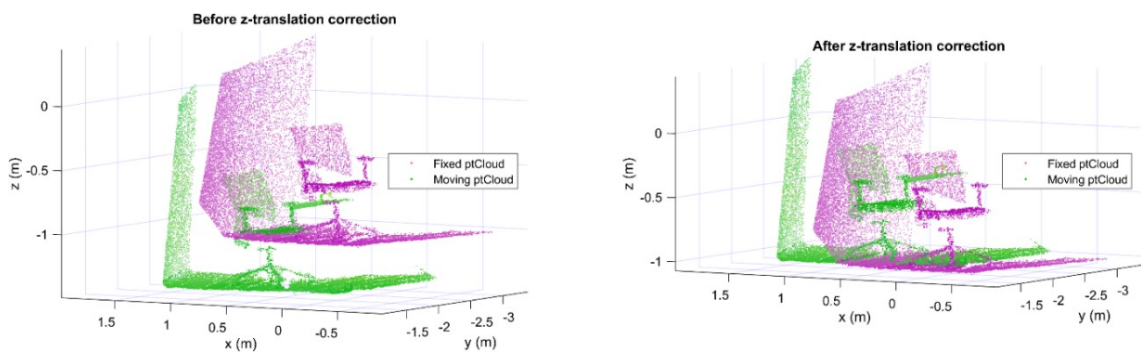


Рисунок 7 – Коррекция переноса по оси z

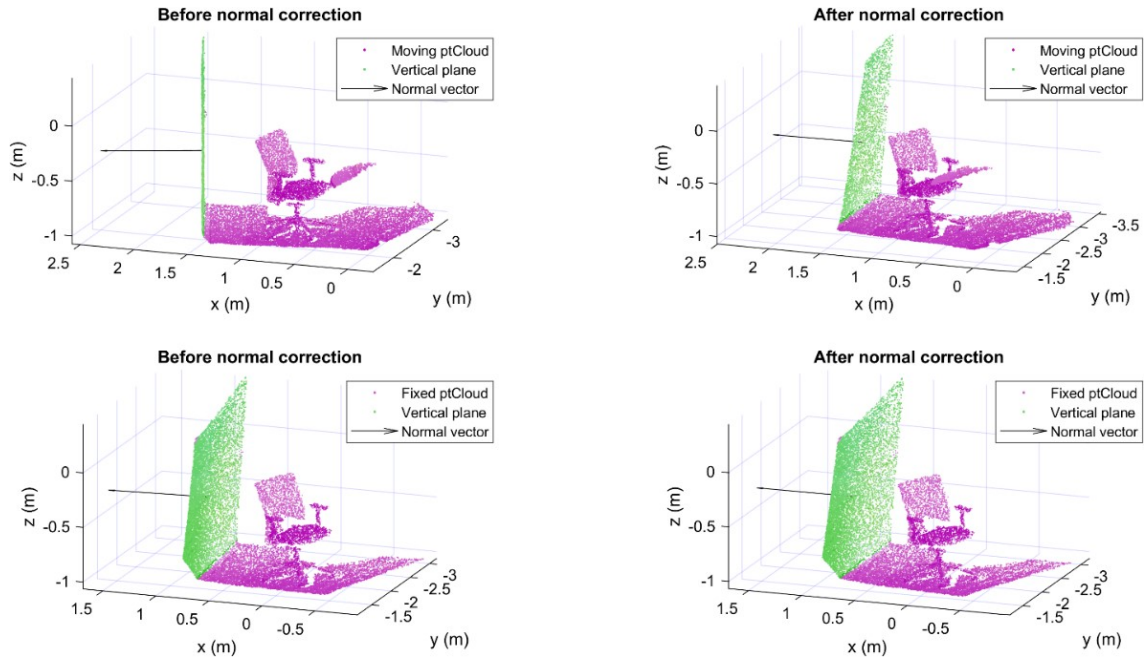


Рисунок 8 – Обнаружение вертикальной плоскости и коррекция ее направления как для движущегося (вверх), так и для фиксированного (вниз) облаков точек

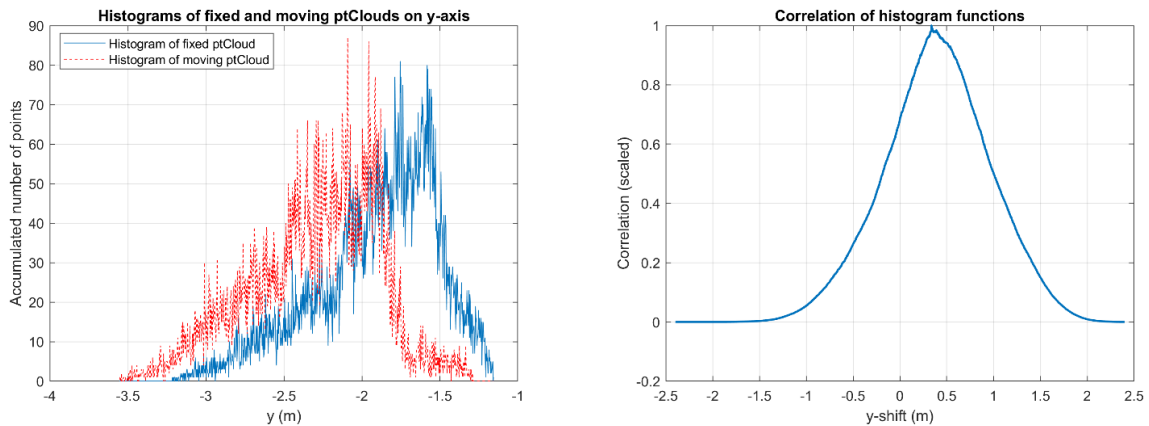


Рисунок 9 – Коррекция переноса методом корреляции гистограмм. Слева: гистограммы фиксированного и движущегося облаков точек по оси y. Справа: корреляция двух гистограмм

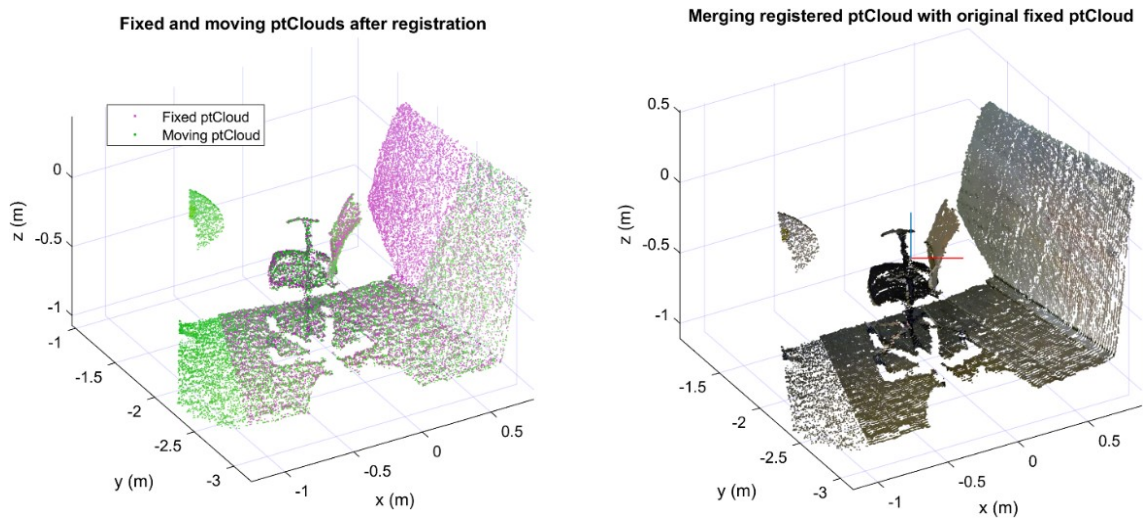


Рисунок 10 – Результат регистрации. Слева: фиксированное и движущееся облака точек после коррекции переносов по осям x и y. Справа: результат слияния движущегося облака точек после обратного преобразования с исходным фиксированным облаком точек

**1.4. Случай отсутствия вертикальной плоскости в трехмерной сцене.** Идеальный случай для предлагаемой методики – когда и фиксированное, и движущееся облака точек имеют одну горизонтальную плоскость и одну вертикальную плоскость, тогда алгоритм обеспечивает выполнение регистрации с большой точностью. Но что произойдет если в одном или обоих облаках точек не обнаружена вертикальная плоскость, или если в трехмерной сцене есть несколько вертикальных или горизонтальных плоскостей?

Что касается горизонтальной плоскости, предлагается, что всегда присутствует по меньшей мере одна такая плоскость. Случай, когда ее нет, не обсуждается в этой статье. Но в трехмерной сцене может быть более одной горизонтальной плоскости, и чтобы гарантировать, что одна и та же плоскость обрабатывается в фиксированном и движущемся облаках точек, рассчитывается соотношение количества точек по обе стороны плоскости, используя ее уравнение. Известно, что точки, расположенные на одной стороне плоскости, будут иметь одинаковый знак, а точки на другой стороне – противоположный знак, а точки, принадлежащие плоскости, дадут нули. По сравнению с рассчитанными соотношениями можно выбирать плоскости, имеющие близкие соотношения. Например, плоскость пола можно отличить по тому, что ее соотношение часто велико, так как все точки в общем случае находятся выше этой плоскости.

Что касается вертикальных плоскостей, то есть большая вероятность, что в трехмерной сцене их несколько с разными положениями и направлениями. Решение в таком случае состоит в том, чтобы сначала выделить все эти плоскости в двух облаках точек. Потом определяется их относительное положение в каждом облаке точек с помощью некоторых признаков, таких как среднее значение в плоскости  $x$ - $y$ , чтобы различить хотя бы одну и ту же плоскость в двух облаках точек, затем можно использовать ее для исправления поворота вокруг оси  $z$ .

В случае, когда в одном или обоих облаках точек отсутствует вертикальная плоскость, то предлагается следующая методика, блок-схема которой показана на рисунке 11. Поскольку вертикальная плоскость в основной предлагаемой методике используется для коррекции поворота вокруг оси  $z$ , то, если плоскость не найдена, ищется этот угол поворота. Предлагаемый метод поиска – это *исчерпывающий поиск с множественной резoluцией*. Это итерационный метод, уменьшающий на каждой итерации интервал и шаг поиска вокруг идеального решения. На первой итерации весь интервал  $[0, 2\pi]$  выбирается с большим шагом, например, 5 градусов. Сложность процесса поиска по этому методу относительно невелика, поскольку он является одномерным. Кроме этого, экспериментально обнаружено, что за три итерации можно получить приблизительную оценку с точностью до  $1/10$  градусов. Для выбора наилучшего угла поворота используется метрика, которая зависит от пересечения двух 3Д сеток занятости фиксированного и движущегося облаков точек, как описано в разделе 1.5.

Предлагаемая методика позволяет получить приблизительную оценку угла поворота вокруг оси  $z$ , а для получения точной регистрации применяется алгоритм ИСР, как показано на рисунке 11. Следует отметить, что данная методика подходит и для решения случая, когда в трехмерной сцене существуют некоторые вертикальные плоскости.

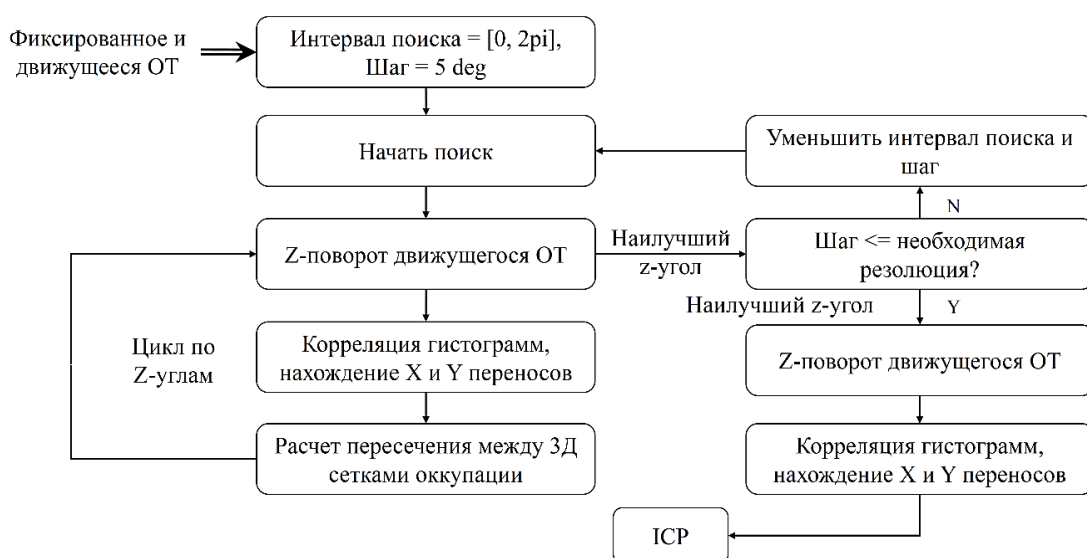


Рисунок 11 – Блок-схема альтернативной методики, предложенная в случае, когда в трехмерной сцене нет вертикальной плоскости



**1.5. Оценка производительности регистрации.** Чтобы оценить производительность алгоритма регистрации облаков точек, обычно используется набор критериев, таких как точность, вычислительная сложность и прочность. В алгоритме ICP, например, в качестве метрики оценки точности регистрации принимается среднеквадратичное расстояние (RMSE) между соответствующими точками. Вычислительная сложность измеряется количеством итераций, необходимых для сходимости, и временем выполнения.

Процедура, описанная в разделе 1.2 для построения эталонных данных из любого облака точек, позволяет получить оценку производительности алгоритма регистрации, потому что нам доступно идеальное зарегистрированное движущееся облако точек. Это означает, что для расчета метрики ошибки можно использовать все точки движущегося облака, а не только пары соответствующих точек. Кроме того, значения идеального преобразования нам известны. Таким образом, можно рассчитать величину ошибки переноса и ошибки поворота.

Для оценки точности регистрации также предлагается использование *3D сетки занятости* с бинарными значениями, при этом вычисляется сетка занятости для фиксированного облака точек и регистрируемого движущегося облака точек, затем находится пересечение между сетками, из которого вычисляется количество занятых ячеек, чем больше которого, тем точнее регистрация.

В случае, когда информация о цвете доступна в облаках точек, сетка занятости может быть взвешена с помощью этой информации, так что каждой ячейке будет присвоено значение, являющееся средним значением цветов точек, принадлежащих этой ячейке.

## 2. Результаты и обсуждение.

**2.1. Используемый набор данных.** Чтобы протестировать методики, предложенные в этой статье, используется набор данных RGB-D Objects dataset [21], снятый с помощью камеры Kinect-style, и содержит 250000 изображений 51 предмета. Однако что нас интересует в этом наборе данных для приложения регистрации облаков точек, это то, что он содержит 14 трехмерных сцен из внутренней среды, каждая из которых состоит из нескольких кадров, а каждый кадр включает два 2D-изображения, цветного изображения и изображения глубины размером 640×480. Из каждого кадра можно найти цветное облако точек, используя параметры камеры. Каждое облако точек перед подачей в алгоритм регистрации проходит некоторую предварительную обработку, включающую избавление от недействительных точек, масштабирование координат точек, чтобы они измерялись в метрах, а также приближительную ручную коррекцию направления плоскости пола на первом кадре трехмерной сцены.

**2.2. Описание моделирования.** Предложенная методика регистрации сравнивается с одним из лучших вариантов ICP, который считается базовой линией (англ. baseline), аналогично тому, что было сделано в [19]. Выбранный вариант ICP имеет следующие характеристики:

- частота дискретизации снижается в обоих облаках точек, так как из каждого выбирается  $M = 20000$  точек случайным образом;
- используется метрика ошибки point-to-plane;
- итерации алгоритма основаны на базовой стратегии выбора-совпадения-минимизации, представленной в [2];
- постоянное взвешивание пар соответствующих точек;
- выбирается: максимальное количество итераций 50, толерантность переноса 0,001 м, толерантность поворота 0,05 градусов, процент сохраненных пар точек 0,7;
- используется техника ускорения сходимости, основанная на экстраполяции в пространстве преобразований.

Чтобы сравнить разные алгоритмы, используется следующая стратегия: выбирается один кадр из одной трехмерной сцены рассматриваемого набора данных и применяется методика разбиения, описанная в разделе 1.2, чтобы получить фиксированное и движущееся облака точек. Эксперимент повторяется много раз, и каждый раз принимается разное преобразование, при этом устанавливаются верхние пределы допустимых переносов и поворотов. Преобразование выбирается случайным образом из допустимых интервалов. В каждом эксперименте оценивается применяемое преобразование с использованием ICP и предложенной нами методики, и вычисляется набор из трех метрик для оценки результатов регистрации, а именно:

- первая метрика представляет собой соотношение пересечения двух сеток занятости движущегося облака точек, зарегистрированного используя рассматриваемый алгоритм, и движущегося облака точек, зарегистрированного оптимально (получается в результате разделения исходного облака точек перед применением к нему преобразования, как показано в разделе 1.2). В случае оптимальной регистрации это соотношение будет равно 100 %;
- вторая метрика – время выполнения регистрации;

- третья метрика – среднее расстояние между точками двух облаков точек, учитываемых в первой метрике. В случае оптимальной регистрации это среднее расстояние будет равно нулю.

Считается, что процесс регистрации неудачным, если значение, рассчитанное по первой метрике (соотношению пересечения), меньше 30 %. А что касается успешных экспериментов, то рассматриваются средние значения трех метрик для сравнения, где рассматриваются три случая.

**2.2.1. Случай 1 – имеется приблизительная первоначальная оценка оптимального преобразования.** В этом случае предполагается, что имеется хорошее первоначальное приближение к требуемому преобразованию, т. е. движущееся облако точек приближенно зарегистрировано по отношению к фиксированному, что является идеальным случаем для алгоритма ICP. Это достигается путем выбора малых значений допустимых поворотов и переносов при применении преобразования на этапе подготовки. Максимальное значение переноса по любой оси выбрано равным 0,05 м, а максимальное значение поворота – 5 градусов. Эксперимент повторяется 1000 раз. Из рассматриваемого набора данных выбран кадр 50 трехмерной сцены 5, который является хорошим примером облака точек с одной горизонтальной и одной вертикальной плоскостями. Также коэффициент перекрытия между фиксированным и движущимся облаками точек определяется равным 0,8. На рисунке 12 показаны гистограммы трех метрик, рассчитанных по всем проведенным экспериментам, для алгоритма ICP (вверху) и предложенной нами методики (внизу), а в первой строке таблицы показаны средние значения трех метрик.

Таблица – Сравнение предложенной нами методики и рассматриваемого варианта ICP для трех проанализированных случаев

	№ попыток	№ неудач		Соотношение пересечения (%)		Время выполнения (s)		Среднее расстояние (мм)	
		ICP	ПМ*	ICP	ПМ	ICP	ПМ	ICP	ПМ
Случай 1	1000	0	0	97,7	99,4	1,0	1,7	2,0	0,3
Случай 2	500	333	11	90,0	99,0	2,8	1,8	25,0	0,4
Случай 3	500	287	17	59,0	97,7	3,5	3,4	271,1	8,1

\* ПМ – предлагаемая методика.

**2.2.2. Случай 2 – нет приблизительной первоначальной оценки оптимального преобразования.** Этот случай отличается от предыдущего тем, что максимально допустимые значения поворота и переноса относительно велики, и поэтому не обязательно имеется приблизительная первоначальная оценка требуемого преобразования. Максимальное значение переноса выбрано равным 2 м, а значение поворота – 45 градусов, и повторили эксперимент 500 раз. Гистограммы трех метрик показаны на рисунке 13, а их средние значения показаны во второй строке таблицы для алгоритма ICP и предложенной нами методики. Выбран тот же кадр и тот же коэффициент перекрытия, что и в первом случае.

**2.2.3. Случай 3 – в трехмерной сцене не найдена вертикальная плоскость.** В этом случае предполагается, что трехмерная сцена не содержит вертикальных плоскостей, тогда будет применена предложенная альтернативная методика, описанная в разделе 1.4. Для тестирования выбран кадр 1100 трехмерной сцены 5, максимальное значение переноса 2 м, максимальное значение поворота 45 градусов, и повторяем эксперимент 500 раз. Результаты для этого случая показаны на рисунке 14 и в третьей строке таблицы.

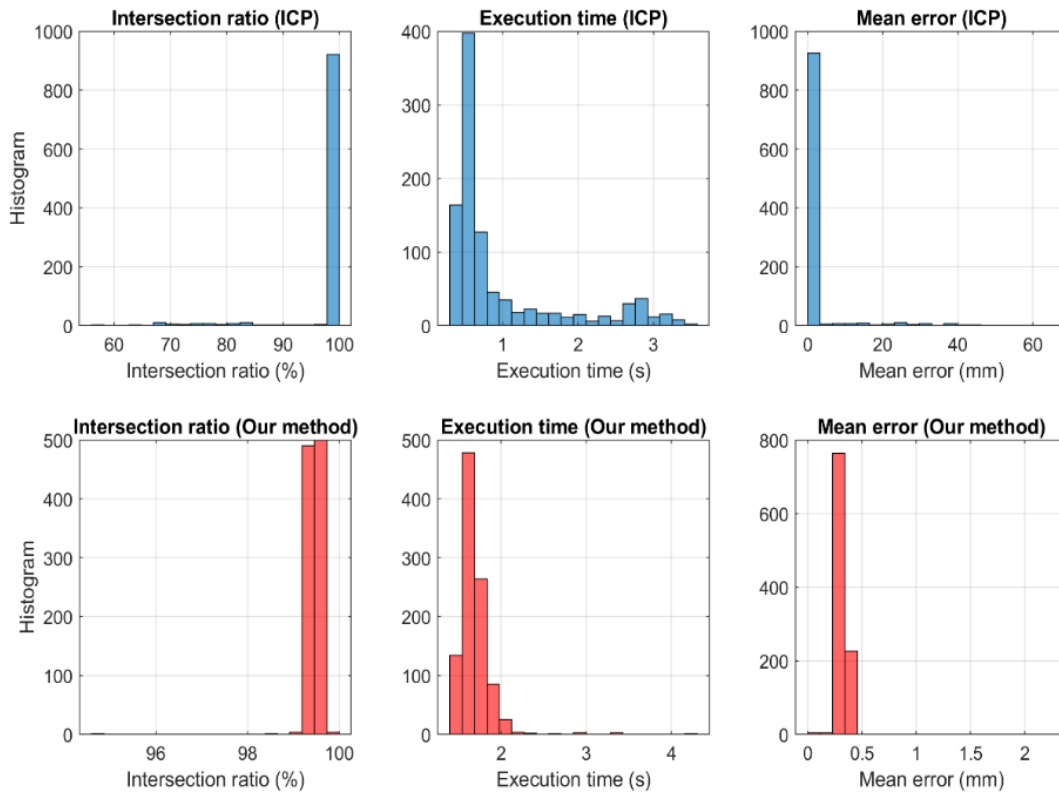


Рисунок 12 – Гистограммы трех рассматриваемых метрик как для ICP (вверху), так и для предлагаемой нами методики (внизу) в случае 1

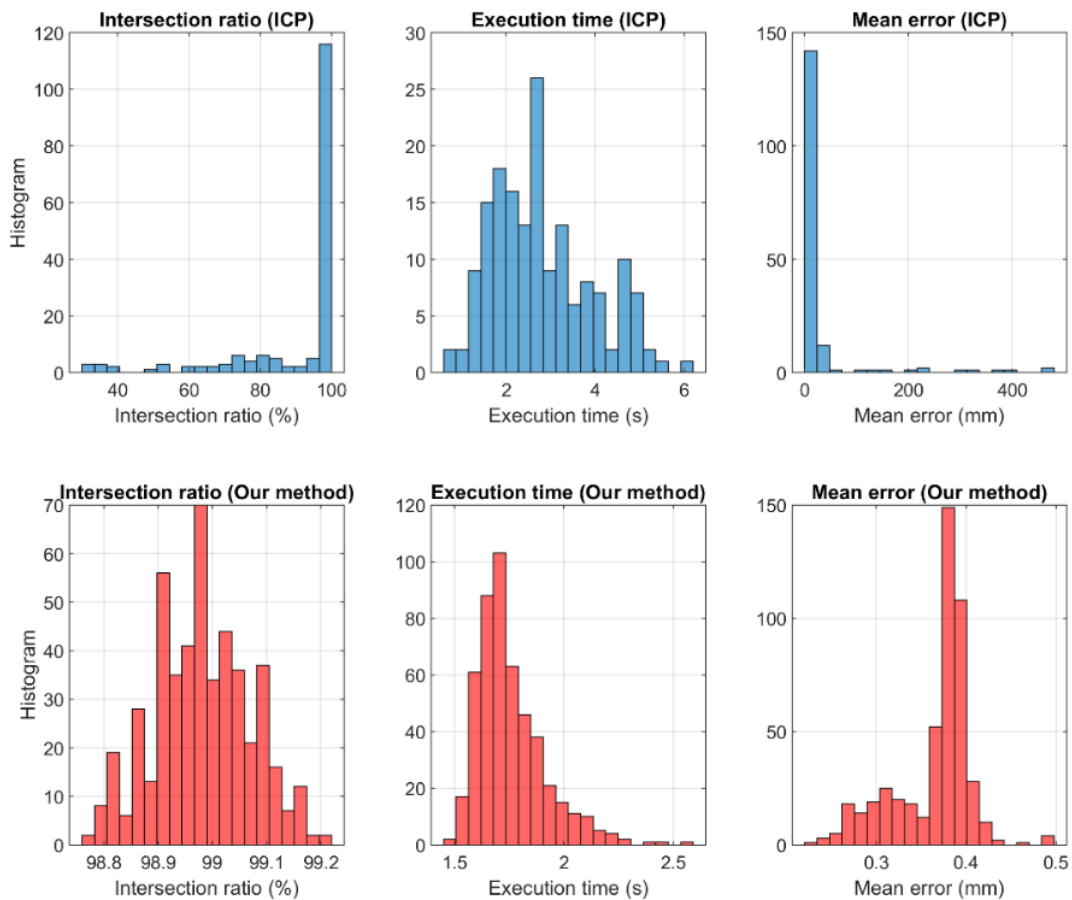


Рисунок 13 – Гистограммы трех рассматриваемых метрик как для ICP (вверху), так и для предлагаемой нами методики (внизу) в случае 2

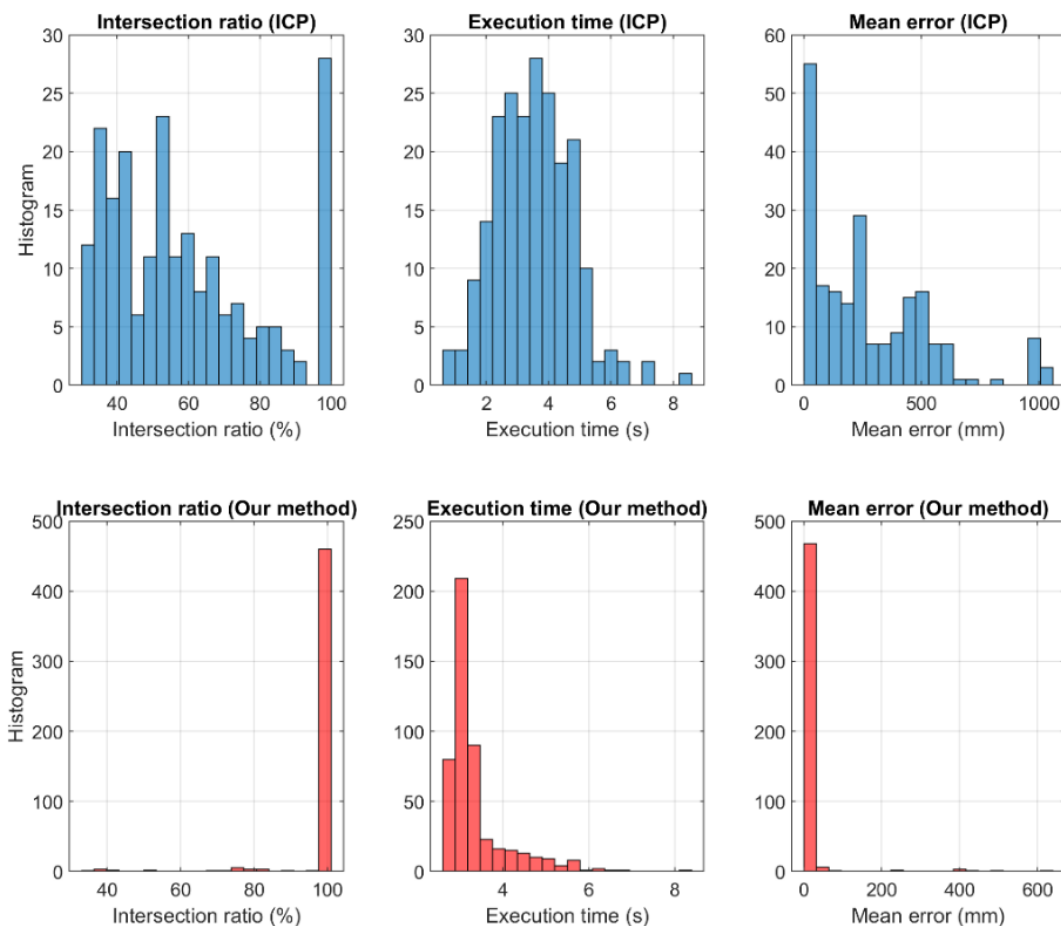


Рисунок 14 – Гистограммы трех рассматриваемых метрик как для ICP (вверху), так и для предлагаемой нами методики (внизу) в случае 3

Что касается алгоритма фазовой корреляции [20], то мы практически попытались протестировать его на данных из набора RGB-D Objects dataset. В [22] имеется код для реализации этого алгоритма на данных LiDAR. Обнаружено, что этому коду нужны некоторые модификации, так как коррекция переноса по оси  $z$  в нем отсутствует, а параметры алгоритма RANSAC необходимо модифицировать для учета наличия наклона в горизонтальной плоскости. Кроме того, параметры алгоритма фазовой корреляции необходимо модифицировать для учета размеров трехмерной сцены, а шаг сетки надо выбирать так, чтобы сложность не возростала существенно, но, несмотря на это, обнаружено, что этот алгоритм неудачно выполняет регистрацию, и ее сложность очень сильно возрастает при уменьшении шага сетки или увеличении ее размеров. Поэтому этот алгоритм не рассматривается для сравнения с нашими результатами.

**2.3. Обсуждение.** Из таблицы видно, что между первой и третьей метриками существует обратная зависимость, так как малым значениям ошибки расстояния соответствуют высокие значения соотношения пересечения, и наоборот.

Первый случай, как упоминалось ранее, является идеальным случаем для алгоритма ICP, и ожидается, что процесс регистрации будет выполнен быстро и с большой точностью. Действительно, этот алгоритм преуспел во всех экспериментах и с большей скоростью, чем предложенная нами методика. Однако можно отметить, что наша методика повысила точность регистрации и уменьшила среднюю ошибку с 2 до 0,3 мм.

Во втором случае алгоритму ICP не удалось зарегистрировать движущееся облако точек в большинстве экспериментов. В экспериментах, которые считаются успешными, отмечается явное снижение точности по сравнению с первым случаем и явное увеличение среднего времени выполнения. Но наша методика сохраняет ту же точность и время выполнения по сравнению с первым случаем, он также превосходит алгоритм ICP по времени выполнения. Этот случай показывает важность предлагаемой методики.

В третьем случае отмечается, что точность альтернативной методики немного меньше точности основной предлагаемой методики, а время выполнения увеличивается настолько, что становится похожим на время выполнения ICP. Конечно, производительность ICP в этом случае также



плоха, как и ожидалось, потому что здесь также необязательно имеется приблизительная первоначальная оценка преобразования.

Также можно заметить, что в некоторых случаях наша методика не успевает выполнить регистрацию, так как в некоторых случаях при больших углах поворота плоскости выделяются неправильно, что, в свою очередь, влияет на результат регистрации.

**Заключение.** В этой статье была представлена предлагаемая методика для получения приблизительной первоначальной оценки преобразования при регистрации 3D облаков точек. Эта первоначальная оценка необходима для алгоритма ICP, чтобы он сходил к глобальному решению, а не к локальному. Предлагаемая методика зависит от горизонтальных и вертикальных плоскостей, присутствующих в трехмерной сцене, чтобы оценить преобразование между двумя регистрируемыми облаками точек. Также были представлены некоторые предложения для случаев, когда в трехмерной сцене существует несколько плоскостей или когда в ней нет вертикальных плоскостей. Также была предложена методика построения эталонных данных из любого облака точек, который, в свою очередь, позволяет оценивать производительность различных алгоритмов регистрации с полным контролем коэффициента перекрытия между облаками точек и геометрического преобразования между ними. Кроме того, была предложена метрика для оценки точности алгоритмов, основанная на 3D сетках занятости или взвешенных сетках занятости, если доступна информация о цвете. Различные предложенные методики были реализованы и протестированы на данных из набора RGB-D Objects dataset, а результаты сопоставлены с одним из лучших вариантов алгоритма ICP.

Идеальным случаем для предлагаемой методики является наличие одной горизонтальной плоскости и одной вертикальной плоскости в каждом из двух регистрируемых облаков точек, а также наличие относительно большого перекрытия между ними. Также предполагается, что повороты, применяемые к движущемуся облаку точек, ограничены, так что они не делают вертикальную плоскость горизонтальной или наоборот. В случае выполнения этих условий предлагаемая методика гарантирует выполнение регистрации с высокой точностью при времени на порядок или меньше времени рассматриваемого варианта ICP.

Однако, если предыдущие условия не выполняются, это отрицательно скажется как на времени выполнения, так и на точности. В случае присутствия нескольких горизонтальных или вертикальных плоскостей требуется некоторая дополнительная обработка, чтобы выделить все эти плоскости и попытаться отличить их друг от друга, чтобы гарантировать, что мы имеем дело с одной и той же плоскостью в двух облаках точек. При отсутствии вертикальной плоскости в трехмерной сцене предлагаемая методика для решения этого случая дает хорошую точность, но приводит к увеличению сложности. В случае небольшого перекрытия двух облаков точек успех регистрации по предлагаемой методике не гарантируется, поскольку в этом случае распределение точек фиксированного облака точек может существенно отличаться от распределения точек движущегося облака точек.

В качестве будущей работы предлагаемая методика может быть улучшена с точки зрения точности и сложности. В ходе тестирования обнаружено, что алгоритм RANSAC имеет некоторые недостатки, так как он может добавлять к обнаруженному плоскому объекту (например, полу или стене) другие точки, принадлежащие другим объектам. Следовательно, можно тестировать и другие алгоритмы для обнаружения плоскостей в трехмерной сцене.

#### Библиографический список

1. Chen, Y. Object modeling by registration of multiple range images / Y. Chen, G. Medioni // 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1991. – Vol. 3. – P. 2724–2729. – DOI: 10.1109/ROBOT.1991.132043.
2. Besl, P. J. A method for registration of 3-D shapes / P. J. Besl, N. D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, № 2. – P. 239–256. – DOI: 10.1109/34.121791.
3. Мсаллам, М. Облака точек – метод представления объектов в трехмерном пространстве / М. Мсаллам, В. И. Сырямкин // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее : X Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых – 2021. – С. 260–264.
4. Syryamkin, V. I. A Method to Create Real-Like Point Clouds for 3D Object Classification / V. I. Syryamkin, M. Msallam, & S. A. Klestov // Frontiers in Robotics and AI. – 2023. – Vol. 9. – DOI: 10.3389/frobt.2022.1077895.
5. Pomerleau, F. A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics / F. Pomerleau, F. Colas, R. Siegwart // Foundations and Trends® in Robotics. – 2015. – Vol. 4, № 1. – P. 1–104.
6. Мсаллам, М. Реконструкция 3D карты путем регистрации облаков точек / М. Мсаллам, В. И. Сырямкин // Инноватика-2022 : сборник материалов XVIII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2022. – С. 183–188.
7. Cheng, L. Registration of laser scanning point clouds: A review / L. Cheng, S. Chen, X. Liu, H. Xu, Y. Wu, M. Li, Y. Chen // Sensors. – 2018. – Vol. 18, № 5. – P. 1641.
8. Fischler, M. A. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography / M. A. Fischler, R. C. Bolles // Communications of the ACM. – 1981. – Vol. 24, № 6. – P. 381–395.

9. Biber, P. The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching / P. Biber, W. Straßer // Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453). – 2003. – Vol. 3. – P. 2743–2748.
10. Chui, H. A. feature registration framework using mixture models / H. A. Chui, A. Rangarajan // Proceedings IEEE Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis. MMBIA-2000 (Cat. No. PR00737). – 2000. – P. 190–197.
11. Zhang, J. Fast and robust iterative closest point / J. Zhang, Y. Yao, B. Deng // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 44, № 7. – P. 3450–3466. – DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3054619.
12. Granger, S. Multi-scale EM-ICP: A fast and robust approach for surface registration / S. Granger, X. Pennec // European conference on computer vision. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. – P. 418–432.
13. Yang, J. Go-ICP: A globally optimal solution to 3D ICP point-set registration / J. Yang, H. Li, D. Campbell, Y. Jia // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2015. – Vol. 38, № 11. – P. 2241–2254.
14. Pavlov, A. L. AA-ICP: Iterative closest point with Anderson acceleration / A. L. Pavlov, G. W. Ovhinnikov, D. Y. Derbyshev, D. Tsetserukou, I. V. Oseledets // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2018. – P. 3407–3412.
15. Park, J. Colored point cloud registration revisited / J. Park, Q. Y. Zhou, V. Koltun // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – P. 143–152.
16. Dreczkowski, K. Hybrid ICP / K. Dreczkowski, E. Johns // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2021. – P. 6801–6808.
17. Dellenbach, P. CT-ICP: Real-time elastic lidar odometry with loop closure / P. Dellenbach, J. E. Deschaut, B. Jacquet, F. Goulette // 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2022. – P. 5580–5586.
18. Hexsel, B. DICP: Doppler Iterative Closest Point Algorithm / B. Hexsel, H. Vhavle, Y. Chen // arXiv preprint arXiv:2201.11944. – 2022.
19. Rusinkiewicz, S. Efficient variants of the ICP algorithm / S. Rusinkiewicz, M. Levoy // Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling. – 2001. – P. 145–152.
20. Dimitrievski, M. Robust matching of occupancy maps for odometry in autonomous vehicles / M. Dimitrievski, D. Van Hamme, P. Veelaert, W. Philips // 11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2016). – 2016. – Vol. 3. – P. 626–633.
21. Lai, K. A large-scale hierarchical multi-view RGB-D object dataset / K. Lai, L. Bo, X. Ren, D. Fox // 2011 IEEE international conference on robotics and automation. – 2011. – P. 1817–1824.
22. Pregistercorr. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/pregistercorr.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.

#### References

1. Chen, Y. & Medioni, G. Object modeling by registration of multiple range images. *1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991, vol. 3, pp. 2724–2729. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.132043.
2. Besl, P. J., & McKay, N. D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, vol. 14, no. 2, pp. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
3. Msallam, M., & Syryamkin, V. I. Oblaka toček – metod predstavljeniya obekto v trekhmernom prostranstve [Point clouds – a method to represent objects in 3D space]. *Resursoeffektivnye sistemy v upravlenii i kontrole: vzglyad v budushchee : X Mezhdunarodnaya konferentsiya shkolnikov, studentov, aspirantov, molodykh uchenykh* [Resource-efficient systems in management and control: a look into the future : X International conference of schoolchildren, students, graduate students, young scientists]. Tomsk, 2021, pp. 260–264.
4. Syryamkin, V. I., Msallam, M., & Klestov, S. A. A Method to Create Real-Like Point Clouds for 3D Object Classification. *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, vol. 9. DOI: 10.3389/frobt.2022.1077895.
5. Pomerleau, F., Colas, F., & Siegwart, R. A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics. *Foundations and Trends® in Robotics*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 1–104.
6. Msallam, M., & Syryamkin, V. I. Rekonstruktsiya 3D karty putem registratsii oblakov toček [Construction of 3D map by point clouds registration]. *Innovatika-2022 : sbornik materialov XVIII mezhdunarodnoy shkoly-konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Innovatika-2022 : collection of materials of the XVIII International school-conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, 2022, pp. 183–188.
7. Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., & Chen, Y. Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, p. 1641.
8. Fischler, M. A., & Bolles, R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 1981, vol. 24, no. 6, pp. 381–395.
9. Biber, P., & Straßer, W. The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching. *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453)*, 2003, vol. 3, pp. 2743–2748.
10. Chui, H., & Rangarajan, A. A feature registration framework using mixture models. *Proceedings IEEE Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis. MMBIA-2000 (Cat. No. PR00737)*, 2000, pp. 190–197.
11. Zhang, J., Yao, Y., & Deng, B. Fast and robust iterative closest point. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, vol. 44, no. 7, pp. 3450–3466. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3054619.
12. Granger, S., & Pennec, X. Multi-scale EM-ICP: A fast and robust approach for surface registration. *European conference on computer vision*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, pp. 418–432.
13. Yang, J., Li, H., Campbell, D., & Jia, Y. Go-ICP: A globally optimal solution to 3D ICP point-set registration. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2015, vol. 38, no. 11, pp. 2241–2254.

14. Pavlov, A. L., Ovchinnikov, G. W., Derbyshev, D. Y., Tsetserukou, D., & Oseledets, I. V. AA-ICP: Iterative closest point with Anderson acceleration. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2018, pp. 3407–3412.
15. Park, J., Zhou, Q. Y., & Koltun, V. Colored point cloud registration revisited. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 143–152.
16. Dreczkowski, K., & Johns, E. Hybrid ICP. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021, pp. 6801–6808.
17. Dellenbach, P., Deschaud, J. E., Jacquet, B., & Goulette, F. CT-ICP: Real-time elastic lidar odometry with loop closure. *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2022, pp. 5580–5586).
18. Hexsel, B., Vhavle, H., & Chen, Y. DICP: Doppler Iterative Closest Point Algorithm. *arXiv preprint arXiv:2201.11944*, 2022.
19. Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. Efficient variants of the ICP algorithm. *Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling*, 2001, pp. 145–152.
20. Dimitrievski, M., Van Hamme, D., Veelaert, P., & Philips, W. Robust matching of occupancy maps for odometry in autonomous vehicles. *11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2016)*, 2016, vol. 3, pp. 626–633.
21. Lai, K., Bo, L., Ren, X., & Fox, D. A large-scale hierarchical multi-view RGB-D object dataset. *2011 IEEE international conference on robotics and automation*, 2011, pp. 1817–1824.
22. *Pcregistercorr*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/pcregistercorr.html>.

УДК 004.056

## ИССЛЕДОВАНИЕ АТАК НА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СЕТЯХ 5G НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ<sup>1</sup>

*Статья поступила в редакцию 20.01.2023, в окончательном варианте – 08.02.2023.*

**Парфёнов Денис Игоревич**, Оренбургский государственный университет, 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-1146-1270, e-mail: parfenovdi@mail.ru

**Болодурина Ирина Павловна**, Оренбургский государственный университет, 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-0096-2587, e-mail: prmat@mail.osu.ru

**Легашев Леонид Вячеславович**, Оренбургский государственный университет, 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,

кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-6351-404X, e-mail: silentgir@gmail.com

**Жигалов Артур Юрьевич**, Оренбургский государственный университет, 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,

аспирант, ORCID: 0000-0003-3208-1629, e-mail: leroy137.artur@gmail.com

**Гришина Любовь Сергеевна**, Оренбургский государственный университет, 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,

аспирант, ORCID: 0000-0003-2752-7198, e-mail: grishina\_ls@inbox.ru

В связи с развитием и активным внедрением сетей 5G стало возможным разрабатывать новые приложения для Интернета вещей (IoT) и областей межмашинного взаимодействия на основе анализа больших данных. В данном исследовании проведен анализ данных в миллиметровых волнах (mmWave) и массивных системах MIMO, сгенерированных на платформе DeepMIMO на основе сценария трассировки лучей на открытом пространстве. Набор данных использован с целью построения моделей машинного обучения для предсказания, находится ли пользователь в зоне линии прямой видимости базовой станции. Кроме того, в рамках данной работы рассмотрен вопрос устойчивости построенных моделей к состязательным атакам и предложен подход к применению генеративно-состязательных сетей для генерации синтетических состязательных образцов путем замены истинных значений целевого признака. Исследование сбалансированной точности базовых классификаторов от нецелевой состязательной атаки при решении задачи бинарной классификации показало, что модели машинного обучения неустойчивы к данному типу атаки. В связи с этим направление будущих исследований включает разработку инструментов защиты от состязательных атак подобного типа, а полученные результаты могут быть использованы при разработке защищенной интеллектуальной системы поддержки принятия решений для анализа трафика сетей 5G и обнаружения аномалий на основе анализа больших данных.

**Ключевые слова:** машинное обучение, состязательные атаки, генеративно-состязательные сети, DeepMIMO, 5G

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-71-10124).

## INVESTIGATION OF ATTACKS ON MACHINE LEARNING MODELS IN 5G NETWORKS BASED ON GENERATIVE-ADVERSARIAL NETWORKS

The article was received by the editorial board on 20.01.2022, in the final version – 08.02.2023.

**Parfenov Denis I.**, Orenburg State University, 13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-1146-1270, e-mail: parfenovdi@mail.ru

**Bolodurina Irina P.**, Orenburg State University, 13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0096-2587, e-mail: prmat@mail.osu.ru

**Legashev Leonid V.**, Orenburg State University, 13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0001-6351-404X, e-mail: silentgir@gmail.com

**Zhigalov Artur Yu.**, Orenburg State University, 13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0000-0003-3208-1629, e-mail: leroy137.artur@gmail.com

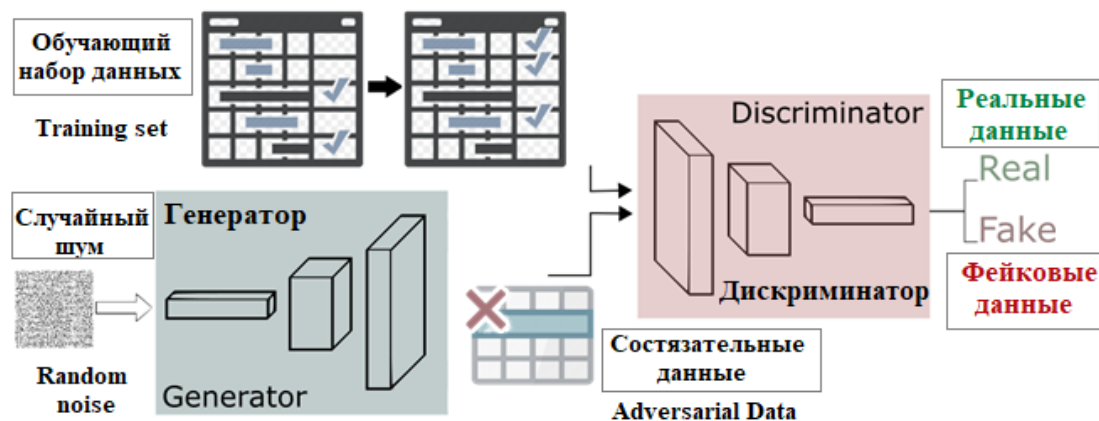
**Grishina Lyubov S.**, Orenburg State University, 13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0000-0003-2752-7198, e-mail: grishina\_ls@inbox.ru

Due to the development and active implementation of 5G networks, it has become possible to develop new applications for the Internet of Things (IoT) and areas of machine-to-machine interaction based on big data analysis. This study analyzes data in millimeter waves (mmWave) and massive MIMO systems generated on the DeepMIMO platform based on the ray tracing scenario in open space. The data set is used to build machine learning models to predict whether an object is in the line-of-sight of base station. In addition, within the framework of this research, the issue of the stability of the constructed models to adversarial attacks is considered and an approach to the use of generative-adversarial networks for generating synthetic adversarial samples by replacing the true values of the target attribute is proposed. A study of the balanced accuracy of basic classifiers from a non-targeted adversarial attack when solving a binary classification problem showed that machine learning models are unstable to this type of attack (in adversarial examples, the balanced accuracy does not exceed 60 %). In this regard, the direction of future research includes the development of tools to protect against adversarial attacks of this type, and the results obtained can be used in the development of a secure intelligent decision support system for analyzing 5G network traffic and detecting anomalies based on big data analysis.

**Keywords:** machine learning, adversarial attacks, generative-adversarial networks, DeepMIMO, 5G

**Graphical annotation (Графическая аннотация)**



**Введение.** Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) открыло новые возможности к построению различных порождающих моделей машинного обучения, одна из ключевых идей которых состоит в разработке неявных подходов к синтетической генерации объектов. Таксономия моделей подобного вида особо выделяет среди методов, использующих неявно выраженные плотности, нейронные сети, которые моделируют марковскую цепь под графиком плотности (порождающие стохастические сети, GSN) или моделируют сэмпирование напрямую из модели (порождающие состязательные сети, GAN) [1, 2].

При этом на данный момент GAN успешно интегрированы в различные интеллектуальные системы для генерации или редактирования изображений, текста, аудио- и видеозаписей [3, 4, 5, 6]. Исследования последних лет также коснулись вопросов формирования методологии генерации табличных данных [7], так как большое количество моделей машинного обучения построено именно на основе транзакционных систем.

Прикладной характер данных исследований носит скорее задел для реализации «сильного» ИИ и не касается области кибербезопасности. Однако полученные результаты позволили применять разработанные структуры синтетической генерации объектов для состязательных атак, которые на основе наложения некоторого «шума» на входные данные обманывают системы ИИ [8]. В связи с этим остро встает вопрос о необходимости исследования существующих моделей машинного обучения и их защиты от атак на базе генеративно-состязательных сетей.

Одно из наиболее важных направлений обеспечения безопасности моделей ИИ с использованием табличных данных – это повышение защищенности моделей, анализирующих трафик сетей и выявляющих аномалии внутри них. В связи с развитием и активным внедрением сетей 5G стало возможным разрабатывать новые приложения для Интернета вещей (IoT) и областей межмашинного взаимодействия на основе анализа больших данных. Данная работа направлена на анализ данных в миллиметровых волнах (mmWave) и массивных системах MIMO, сгенерированный на платформе DeepMIMO на основе сценария трассировки лучей на открытом воздухе с 18 базовыми станциями и более чем одним миллионом пользователей [9]. Сгенерированный набор данных для построения модели машинного обучения использован с целью предсказания, находится ли объект в зоне линии прямой видимости базовой станции. Кроме того, на основе моделей GAN сгенерируем состязательные образцы для проведения атаки на модели и исследуем их устойчивость.

**Обзор исследований.** Исследованиям в области обеспечения безопасности моделей машинного обучения, построенных на основе табличных данных, занимаются ученые по всему миру. Рассмотрим основные примеры успешного проведения состязательных атак на данные подобного типа и возможности генеративно-состязательных сетей.

Так, авторы исследования [10] адаптировали состязательные алгоритмы в области классификации изображений к несбалансированным табличным данным. Особенность данной работы заключается в разработке новой функции потерь и введении ограничений на шум в синтетических данных для построения наиболее реалистичных состязательных примеров.

В рамках работы [11] представлен итеративный градиентный подход к направлению возмущения в признаках объекта к целевому классу. Достоинство предложенного подхода заключается в минимизации состязательного возмущения на основе введения штрафа за возмущение пропорционально важности признаков.

Использование информации о распределении данных для проведения состязательной атаки представлено в работе [12]. Отметим, что разработанный подход построения вектора возмущений продемонстрировал высокую эффективность на различных прикладных задачах.

С другой стороны, исследования в области генерации синтетических, но не состязательных табличных данных за последние годы значительно продвинулись. Авторы работы [13] предложили модель GAN для генерации реляционных таблиц, содержащих непрерывные и дискретные переменные. Предложенный подход на основе использования мультимодального распределения экспериментально подтвердил эффективность генерации синтетических данных.

В работе [14] представлена новая архитектура СТАВ-GAN, учитывающая дисбаланс классов и признаки с резкими различиями в частоте при больших значениях. Особенность данной работы заключается в специальном представлении условного вектора, который кодирует смешанный тип данных и искаженное распределение переменной данных.

Обзор исследований показал, что методы генерации состязательных атак на табличные данные только начинают развиваться и используют в основном градиент функции потерь или информацию о плотности распределения данных в явном виде. Применение генеративно-состязательных сетей позволит проводить сэмплирование из сложных многомерных распределений без явной информации о виде функции. В связи с этим в рамках данного исследования предполагается использование GAN для генерации синтетических состязательных образцов путем замены истинных значений целевого признака.

**Постановка задачи.** Рассмотрим сгенерированный набор данных на платформе DeepMIMO на основе сценария трассировки лучей. Рассмотрим сценарий “O1\_drone scenario” – сценарий на открытом пространстве, с двумя улицами, зданиями варьируемой высоты и одним перекрестком. На улице зафиксирована одна базовая станция на высоте 6 м и одна летающая реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (Reconfigurable Intelligent Surface), находящаяся на высоте 80 м. В качестве массивов пользователей выступают четыре плоскости дронов с общим количеством дронов около 270 тыс. на высоте от 40 до 42,4 м, расстояние между дронами при этом составляет 81 см. Стандартная рабочая частота эмуляции – 200 ГГц. Каждый пользователь (дрон) состоит из одной

антенны. Задано вращение антенн базовой станции по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  в виде  $(30^\circ, 30^\circ, 90^\circ)$ , задано вращение антенны пользователей по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  в виде  $(35^\circ, 20^\circ, 60^\circ)$ . Общая схема расположения пользователей (дронов) и базовой станции представлена на рисунке 1.

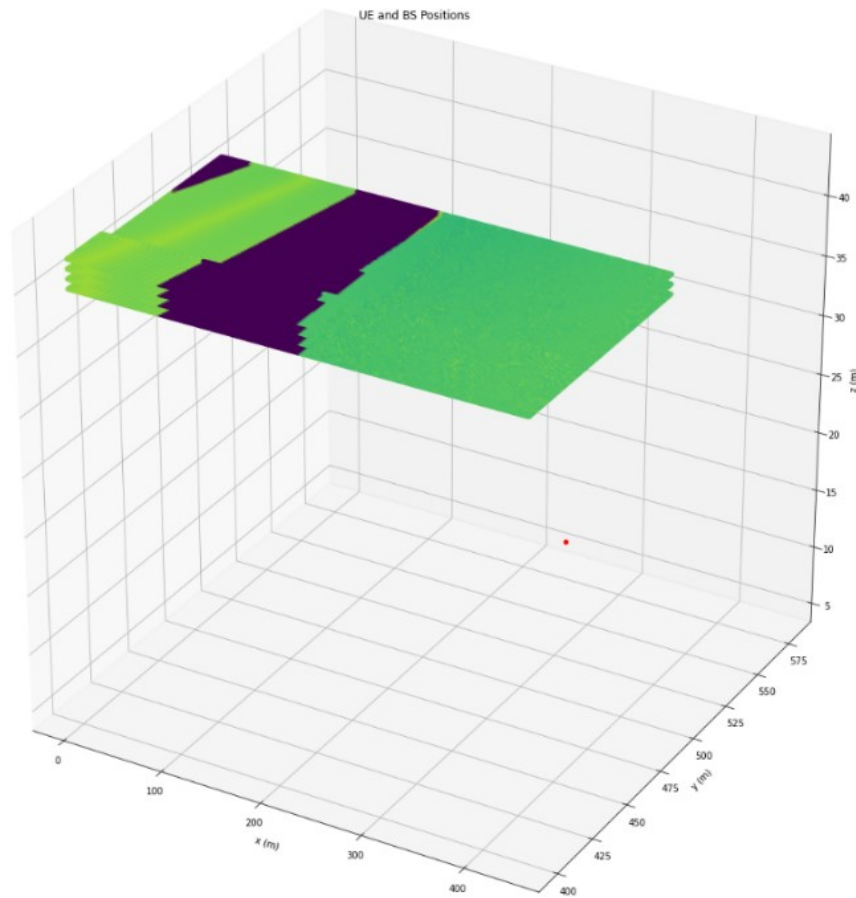


Рисунок 1 – Расположение базовой станции и групп пользователей для сценария “O1\_drone scenario”. Базовая станция отмечена красной точкой. Четыре слоя дронов размещены на высоте  $\sim 41$  метра. Цветовая схема соответствует потерям сигнала на пути канала между пользователями и базовой станцией. Зеленый цвет – высокие потери, темно-синий цвет – низкие

Набор данных содержит 109017 записей, когда пользователь находится в зоне линии прямой видимости базовой станции, и 53240 записей для пользователей вне зоны прямой видимости. Исходная выборка поделена на обучающую и тестовую в соотношении 4:1. Перечень характеристик набора данных:

- 'Distance' – расстояние между базовой станцией и каждым пользователем, в метрах;
- 'DoD\_theta' – зенитный угол отправления, в градусах;
- 'DoA\_theta' – зенитный угол прибытия, в градусах;
- 'phase' – фаза пути распространения сигнала, в градусах;
- 'power' – сила сигнала при получении, в мегаватт;
- 'Line-of-Sight Status' – состояние прямой видимости.

Формально постановка задачи бинарной классификации сигнала может быть сформулирована следующим образом. Пусть  $X = \{\text{'Distance', 'DoD\_theta', 'DoA\_theta', 'phase', 'power'}\}$  – множество признаков объекта,  $Y = \{0,1\}$  – множество классов, описывающее, находится ли объект в зоне линии прямой видимости.

Пусть существует  $y: X \rightarrow Y$  – некоторая зависимость, значения которой известны только на объектах обучающей выборки. Для построения модели машинного обучения необходимо найти алгоритм  $a: X \rightarrow Y$ , способный классифицировать произвольный объект  $x \in X$ .

В рамках данной работы в качестве базовых методов машинного обучения рассмотрены следующие алгоритмы: логистическая регрессия (LR), метод опорных векторов (SVC), случайный лес (RF) и экстремальный градиентный бустинг (XGBoost). В результате обучения моделей сбалансированная точность на тестовой выборке в среднем составила  $99,3\% \pm 0,7\%$ . В следующем разделе

рассмотрим модель GAN для генерации синтетических образцов табличных данных и модифицируем подход для получения состязательных примеров на основе инверсии целевого признака.

**Модель генеративно-состязательной сети.** Основная идея построения порождающих состязательных сетей состоит в разработке комбинированной нейросетевой модели (рис. 2). На основе случайно сгенерированного шума первая модель  $G$  должна построить некоторое приближение распределения данных, а вторая модель реализует бинарный классификатор  $D$  для оценки вероятности принадлежности входного наблюдения к обучающей выборке. Обучение комбинированной модели необходимо проводить одновременно, однако сначала обновляются весовые коэффициенты генератора  $G$ , а затем дискриминатора  $D$ .

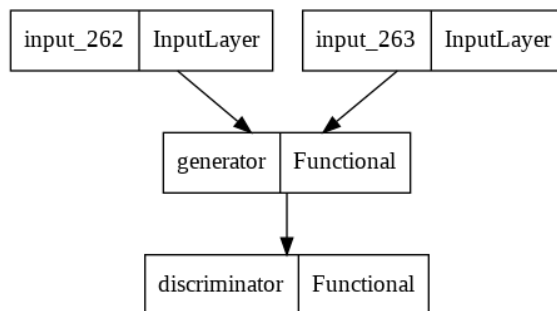


Рисунок 2 – Модель генеративно-состязательной сети

Архитектура генеративной и дискриминативной нейронной сети представлена на рисунке 3. Отметим, что данная модель реализует структуру условных порождающих сетей CGAN, так как дополнительно передает информацию о целевом признаке  $y$  для контроля процесса генерации данных. В рамках данного исследования ключевой вопрос состоит в применении данного подхода для формирования образцов нецелевой состязательной атаки, когда задача состоит в том, чтобы заставить классификатор дать неправильный ответ, однако смещение в сторону определенного класса не задано.

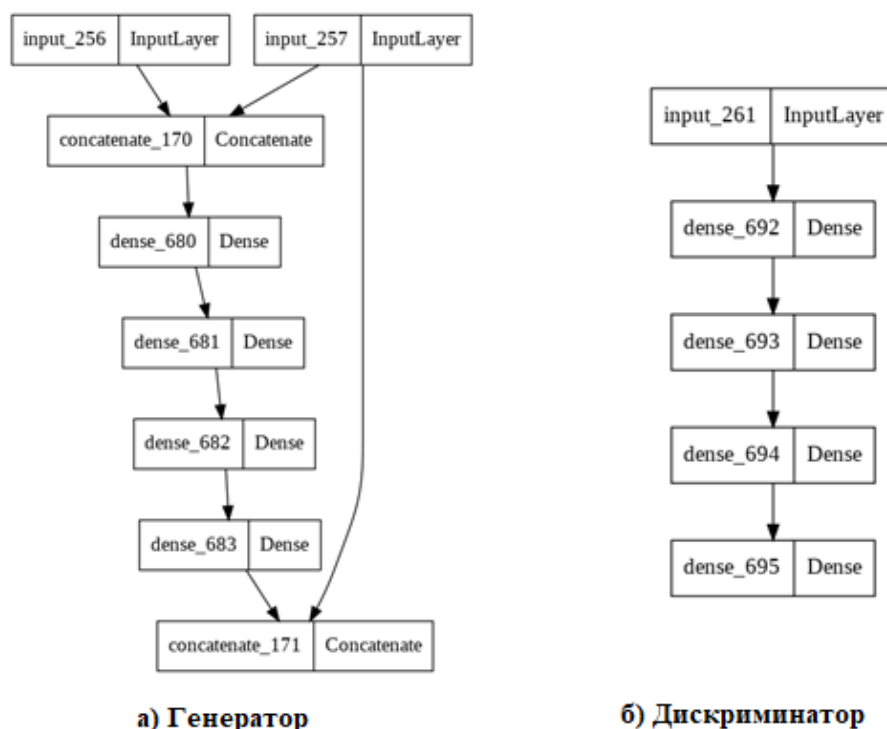


Рисунок 3 – Модель а) генеративной и б) дискриминативной нейронной сети

Используем информацию о целевом бинарном признаке  $y$  для формирования состязательной атаки следующим образом: инвертируем его значения, получим признак  $\bar{y}$  и передадим в модель CGAN на этапе обучения заведомо ложную информацию. Таким образом, характеристики сгенерированных синтетических объектов будут по всем признакам близки к реальным, с учетом замены

истинного класса на ложный. Реализуем предложенную стратегию состязательной атаки и проанализируем ее эффективность на обученных базовых классификаторах предсказания, находится ли объект в зоне линии прямой видимости базовых станций сети 5G.

**Вычислительные эксперименты.** Исследование устойчивости обученных базовых классификаторов от нецелевой состязательной атаки при решении задачи бинарной классификации проведем, основываясь на сравнении точности модели до и после проведения атак. Для обучения модели CGAN определим следующие параметры:

- размерность вектора случайного шума  $rand\_dim = 32$ ;
- количество итераций для обучения  $nb\_steps = 1000$ ;
- размер пакета (количество обучающих примеров за один проход вперед/назад)  $batch\_size = 128$ ;
- количество обновлений сети дискриминатора на каждом этапе состязательного обучения  $k\_d = 1$ ;
- количество обновлений сети генератора на каждом этапе состязательного обучения  $k\_g = 1$ ;
- количество шагов для предварительной подготовки дискриминатора перед началом состязательной тренировки  $critic\_pre\_train\_steps = 100$ ;
- интервал (в шагах), с которым сохраняются веса моделей и графики образцов изображений для обнаружения  $log\_interval = 100$ ;
- скорость обучения  $learning\_rate = 5e-4$ .

Матрицы ошибок классификаторов на состязательном наборе данных представлены на рисунке 4. Отметим, что классификатор XGBoost продемонстрировал смещение в сторону класса «1», когда объект находится в зоне прямой видимости базовой станции. Модели SVC, LR, RF смещения в сторону одного класса не имеют и с примерно равной вероятностью отнесли объекты к различным классам. Все рассмотренные модели неустойчивы к представленной нецелевой состязательной атаке.

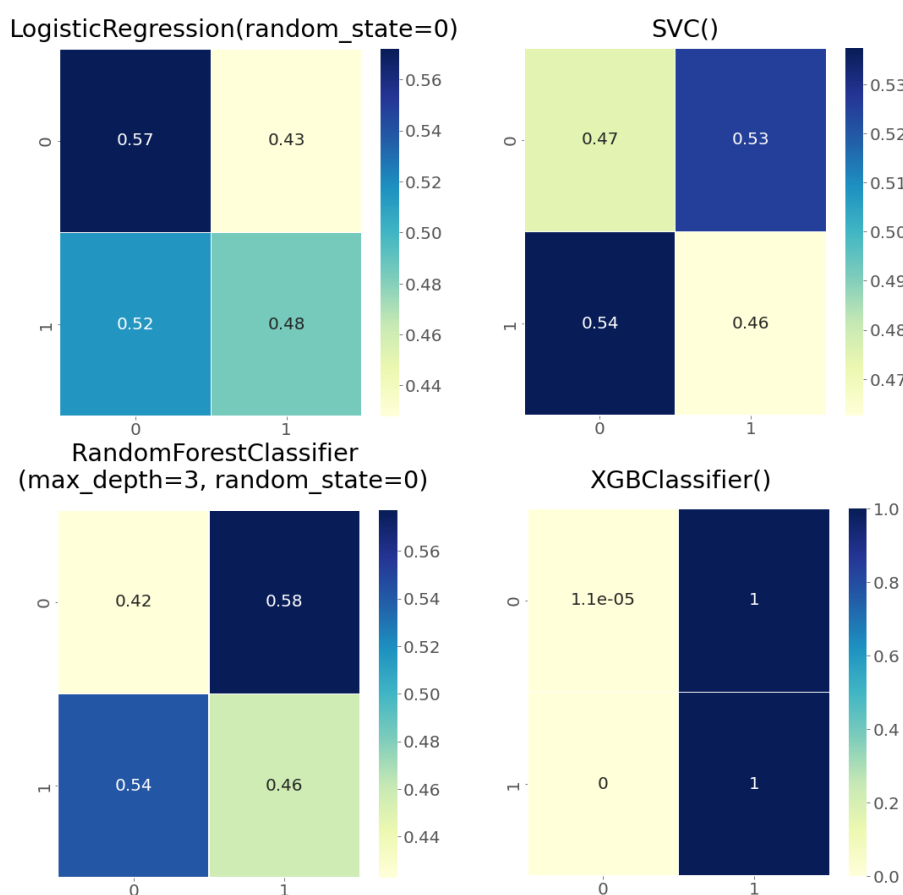


Рисунок 4 – Матрицы ошибок на состязательных примерах для различных моделей машинного обучения

График оценки сбалансированной точности на состязательных примерах на каждой итерации обучения GAN для каждого из базовых классификаторов представлен на рисунке 5.



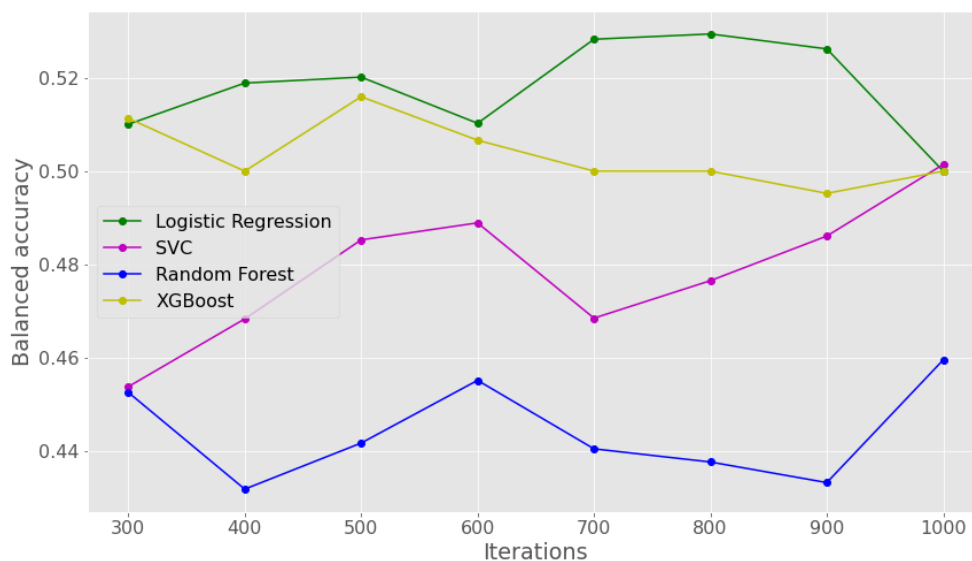


Рисунок 5 – Оценка сбалансированной точности на состязательных примерах на каждой итерации обучения GAN

Сбалансированная точность всех обученных базовых классификаторов на синтетических данных существенно упала (ниже 54 %). При этом модели логистической регрессии (LR) экстремального градиентного бустинга (XGBoost) ведут себя сравнительно одинаково и имеют точность около 50–52 %, что свидетельствует о том, что модели неэффективны (сравнимы со случайным выбором класса). Для метода опорных векторов (SVC) и модели случайного леса (RF) сбалансированная точность находится в пределах 43–50 %, что говорит о полной неустойчивости моделей к данной нецелевой состязательной атаке на основе инверсии целевого признака при генерации синтетических примеров.

Рассмотрим модификацию архитектуры генератора  $G$  на входном слое при подаче случайного вектора шума – проварьируем его размерность `rand_dim` с 8 до 128 (рис. 6). Отметим, что для моделей машинного обучения SVC, RF изменение сбалансированной точности не превышает 1,5 %, а для моделей LR и XGBoost – может изменяться в пределах 4 %.

Таким образом, структура модели генератора может значительно влиять на устойчивость моделей машинного обучения к данному виду состязательной атаки.

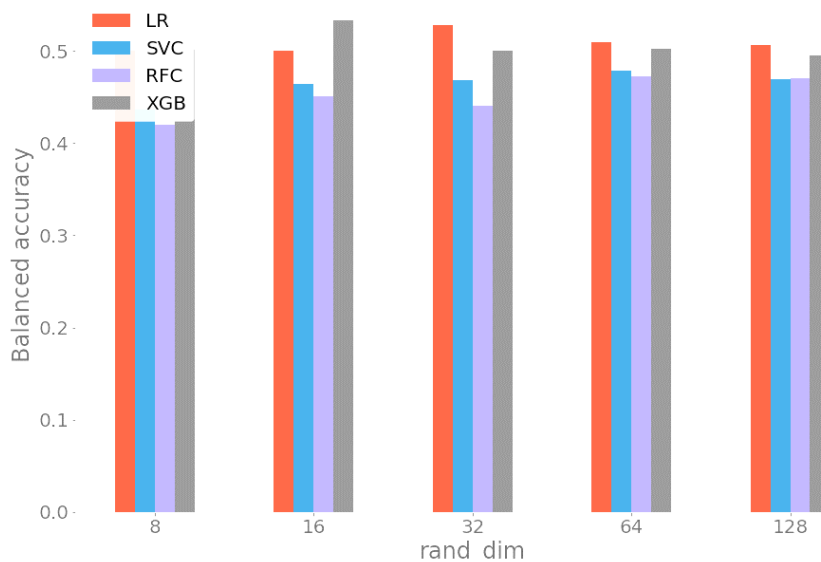


Рисунок 6 – Оценка сбалансированной точности на состязательных примерах при различном значении размерности входного вектора шума для генератора  $G$

**Заключение.** Таким образом, в результате проведенного исследования выполнен анализ данных в миллиметровых волнах (mmWave) и массивных системах MIMO, сгенерированный на платформе DeepMIMO на основе сценария трассировки лучей на открытом пространстве. Сгенерированный набор данных для построения модели машинного обучения использован с целью предсказания, находится ли объект в зоне линии прямой видимости базовой станции. Кроме того, в рамках данной

работы предложен подход к применению генеративно-сопоставительных сетей для генерации синтетических сопоставительных образцов путем замены истинных значений целевого признака. Исследование сбалансированной точности обученных базовых классификаторов от нецелевой сопоставительной атаки при решении задачи бинарной классификации показало, что модели машинного обучения неустойчивы к данному типу атаки. В связи с этим направление будущих исследований включает разработку инструментов защиты от подобного рода нецелевых атак.

Полученные результаты исследования могут быть использованы при разработке защищенной интеллектуальной системы поддержки принятия решений для анализа трафика сетей 5G и обнаружения аномалий на основе анализа больших данных.

#### Библиографический список

1. Alain, G. GSNs: generative stochastic networks / G. Alain, Y. Bengio, L. Yao, J. Yosinski, E. Thibodeau-Laufer, S. Zhang, P. Vincent // *Information and Inference: A Journal of the IMA*. – 2016. – Vol. 5. – P. 210–249.
2. Matsunaga, N. Fine-grained Image Editing by Pixel-wise Guidance Using Diffusion Models / N. Matsunaga, M. Ishii, A. Hayakawa, K. Suzuki, T. Narihira // arXiv:2212.02024 [cs.CV]. – 2022.
3. Li, W. SDM: Spatial Diffusion Model for Large Hole Image Inpainting / W. Li, X. Yu, K. Zhou, Y. Song, Zh. Lin, J. Jia // arXiv:2212.02963 [cs.CV]. – 2022.
4. Mei, X. Towards Generating Diverse Audio Captions via Adversarial Training / X. Mei, X. Liu, J. Sun, M. D. Plumbley, W. Wang, J. Jia // arXiv:2212.02033 [eess.AS]. – 2022.
5. Mei, K. VIDM: Video Implicit Diffusion Models / K. Mei, V. M. Patel // arXiv:2212.00235 [cs.CV]. – 2022.
6. Tan, Z. SSD: Towards Better Text-Image Consistency Metric in Text-to-Image Generation / Z. Tan, X. Yang, Z. Ye, Q. Wang, Y. Yan, A. Nguyen, K. Huang // arXiv:2210.15235 [cs.CV]. – 2022.
7. Kireev, K. Adversarial Robustness for Tabular Data through Cost and Utility Awareness / K. Kireev, B. Kulynych, C. Troncoso // arXiv:2208.13058 [cs.LG]. – 2022.
8. Goebel, M. Adversarial Attacks on Co-Occurrence Features for GAN Detection / M. Goebel, B. S. Manjunath // arXiv:2009.07456 [eess.IV]. – 2020.
9. Alkhateeb, A. DeepMIMO: A Generic Deep Learning Dataset for Millimeter Wave and Massive MIMO Applications / A. Alkhateeb // arXiv:1902.06435 [cs.IT]. – 2019.
10. Cartella, F. Adversarial Attacks for Tabular Data: Application to Fraud Detection and Imbalanced Data / F. Cartella, O. Anunciacao, Y. Funabiki, D. Yamaguchi, T. Akishita, O. Elshocht // arXiv:2101.08030 [cs.CR]. – 2021.
11. Ballet, V. Imperceptible Adversarial Attacks on Tabular Data / V. Ballet, X. Renard, J. Aigrain, T. Laugel, P. Frossard, M. Detyniecki // arXiv:1911.03274 [stat.ML]. – 2019.
12. Ju, L. A Robust Approach to Adversarial Attack on Tabular Data for Classification Algorithm Testing / L. Ju, R. Cui, J. Sun, Z. Li // 2022 8th International Conference on Big Data and Information Analytics (BigDIA). – 2022. – P. 371–376.
13. Xu, L. Synthesizing Tabular Data using Generative Adversarial Networks / L. Xu, K. Veeramachaneni // arXiv:1811.11264 [cs.LG]. – 2018.
14. Zhao, Z. CTAB-GAN: Effective Table Data Synthesizing / Z. Zhao, A. Kunar, H. V. Scheer, R. Birke, L. Y. Chen // arXiv:2102.08369 [cs.LG]. – 2021.

#### References

1. Alain, G., Bengio, Y., Yao, L., Yosinski, J., Thibodeau-Laufer, E., Zhang, S., Vincent, P. GSNs: generative stochastic networks. *Information and Inference: A Journal of the IMA*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 210–249.
2. Matsunaga, N., Ishii, M., Hayakawa, A., Suzuki, K., Narihira, T. Fine-grained Image Editing by Pixel-wise Guidance Using Diffusion Models. *arXiv:2212.02024 [cs.CV]*, 2022.
3. Li, W., Yu, X., Zhou, K., Song, Y., Lin, Zh., Jia, J. SDM: Spatial Diffusion Model for Large Hole Image Inpainting. *arXiv:2212.02963 [cs.CV]*, 2022.
4. Mei, X., Liu, X., Sun, J., Plumbley, M. D., Wang, W., Jia, J. SDM: Spatial Diffusion Model for Large Hole Image Inpainting. *arXiv:2212.02033 [eess.AS]*, 2022.
5. Mei, K., Patel, V. M. VIDM: Video Implicit Diffusion Models. *arXiv:2212.00235 [cs.CV]*, 2022.
6. Tan, Z., Yang, X., Ye, Z., Wang, Q., Yan, Y., Nguyen, A., Huang, K. Towards Better Text-Image Consistency Metric in Text-to-Image Generation. *arXiv:2210.15235 [cs.CV]*, 2022.
7. Kireev, K., Kulynych, B., Troncoso, C. Adversarial Robustness for Tabular Data through Cost and Utility Awareness. *arXiv:2208.13058 [cs.LG]*, 2022.
8. Goebel, M., Manjunath, B. S. Adversarial Attacks on Co-Occurrence Features for GAN Detection. *arXiv:2009.07456 [eess.IV]*, 2020.
9. Alkhateeb, A. DeepMIMO: A Generic Deep Learning Dataset for Millimeter Wave and Massive MIMO Applications. *arXiv:1902.06435 [cs.IT]*. 2019.
10. Cartella, F., Anunciacao, O., Funabiki, Y., Yamaguchi, D., Akishita, T., Elshocht, O. Adversarial Attacks for Tabular Data: Application to Fraud Detection and Imbalanced Data. *arXiv:2101.08030 [cs.CR]*, 2021.
11. Ballet, V., Renard, X., Aigrain, J., Laugel, T., Frossard, P., Detyniecki, M. Imperceptible Adversarial Attacks on Tabular Data. *arXiv:1911.03274 [stat.ML]*, 2019.
12. Ju, L., Cui, R., Sun, J., Li, Z. A Robust Approach to Adversarial Attack on Tabular Data for Classification Algorithm Testing. *2022 8th International Conference on Big Data and Information Analytics (BigDIA)*, 2022, pp. 371–376.
13. Xu, L., Veeramachaneni, K. Synthesizing Tabular Data using Generative Adversarial Networks. *arXiv:1811.11264 [cs.LG]*, 2018.
14. Zhao, Z., Kunar, A., Scheer, H. V., Birke, R., Chen, L. Y. CTAB-GAN: Effective Table Data Synthesizing. *arXiv:2102.08369 [cs.LG]*, 2021.

УДК 167.7

## **МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИКАСПИЙСКОГО РЕГИОНА<sup>1</sup>**

*Статья поступила в редакцию 09.02.2023, в окончательном варианте – 16.02.2023.*

**Ажмухамедов Искандар Маратович**, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim\_agtu@mail.ru

**Федотова Анна Владиславовна**, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор биологических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-0241-1797, e-mail: fedotova@asu.edu.ru

**Корякова Виктория Андреевна**, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

магистрант, ORCID: 0000-0002-2472-9248, e-mail: koryakova-01@mail.ru

Цель исследования – разработка методики комплексной оценки уровня безопасности прикаспийских государств, направленная на унификацию подходов для любого направления комплексной безопасности. На основе предложенной методики был проиллюстрирован пример построения модели оценки уровня экологической безопасности. На первом этапе был проведен сбор информации, далее были выделены критерии, которые непосредственно влияют на уровень экологической безопасности. Затем была проведена оценка уровня экологической безопасности на основе экспертного опроса. Построена когнитивная модель, вычислены веса Фишберна на основании модифицированного метода нестрого ранжирования, вычислен количественный показатель для каждого уровня с применением аддитивной свертки. Обеспечение комплексной безопасности прикаспийских государств по данной методике будет способствовать повышению качества жизни людей и благополучия населения Большого Каспия, социально-экономическому развитию региона, повышению стабильного и взаимовыгодного партнерства.

**Ключевые слова:** комплексная безопасность, уровень безопасности, критерии безопасности, оценка уровня безопасности, нечеткие когнитивные модели

## **METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE LEVEL OF SECURITY OF THE CASPIAN REGION**

*The article was received by the editorial board on 09.02.2023, in the final version – 16.02.2023.*

**Azhmukhamedov Iskandar M.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim\_agtu@mail.ru

**Fedotova Anna V.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Biology), Professor, ORCID: 0000-0003-0241-1797, e-mail: fedotova@asu.edu.ru

**Koryakova Victoria A.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

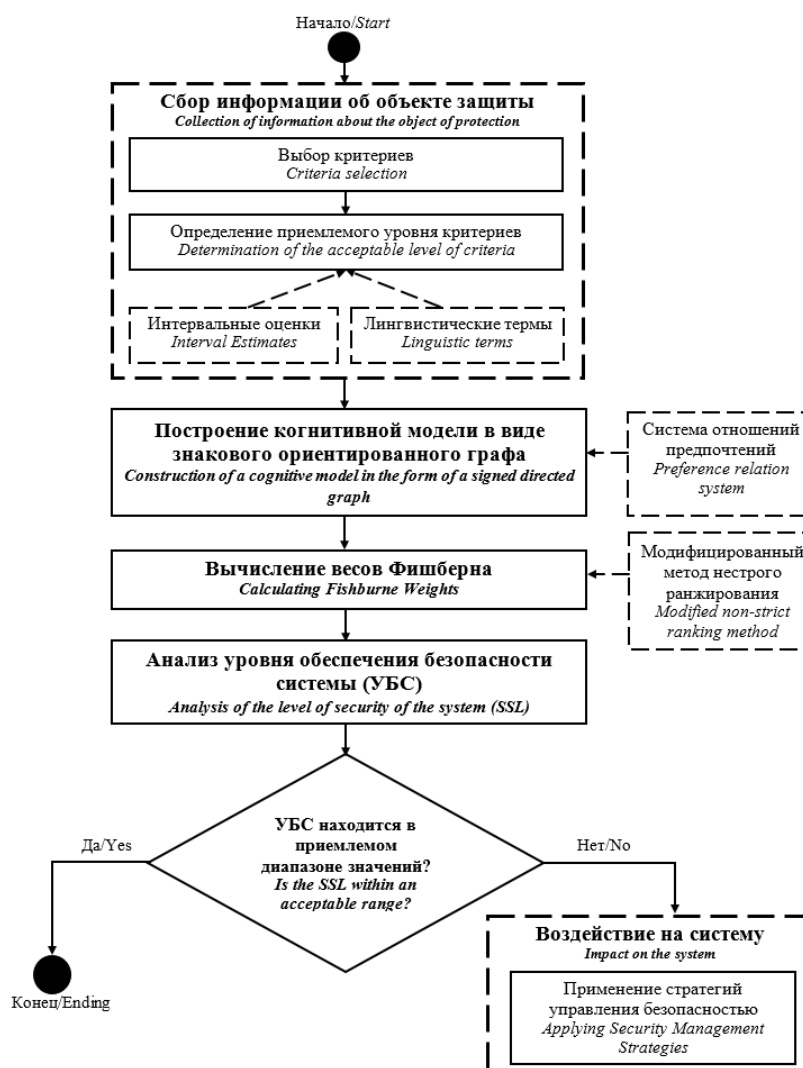
undergraduate student, ORCID: 0000-0002-2472-9248, e-mail: koryakova-01@mail.ru

The purpose of the study is to develop a methodology for a comprehensive assessment of the level of security in the Caspian region, aimed at unifying approaches for any area of integrated security. Based on the proposed methodology, an example of building a model for assessing the level of environmental safety was illustrated. At the first stage, information was collected, then criteria were identified that directly affect the level of environmental safety. Then, an assessment of the level of environmental safety was carried out on the basis of an expert survey. A cognitive model is built, Fishburn weights are calculated based on a modified method of non-strict ranking, a quantitative indicator is calculated for each level using additive convolution. Ensuring the integrated security of the Caspian region using this methodology will help improve the quality of life of people and the well-being of the population of the Greater Caspian, the socio-economic development of the region, and increase stable and mutually beneficial partnerships.

**Keywords:** integrated security; security level; safety criteria, safety level assessment, fuzzy cognitive models

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке гранта фундаментальных научно-исследовательских проектов в рамках реализации стратегических проектов «Программы развития Астраханского государственного университета на 2021–2030» «Методологические основы оценки и управления уровнем комплексной безопасности региона».

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Каспийский регион уникален по своему расположению, богат природными, в том числе нефтегазовыми, ресурсами. Кроме того, Каспийское море стратегически расположено таким образом, что соединяет Центральную Азию и Кавказ со Средиземноморьем. Особенность расположения создала уникальные исторические предпосылки для формирования современного международного транспортного перекрестка, включающего акваторию, воздушное пространство, береговую линию и русла рек. Каспий играет роль осевого региона Евразии и представляет собой историческое мультикультурное пространство, где помимо политического и конфессионального разнообразия, существует еще и многообразие подходов к истории, культуре и религии.

В связи с этим, несмотря на то, что непосредственный выход к Каспийскому морю имеют пять стран – Россия, Азербайджан, Иран, Казахстан, Туркменистан, страны так называемой «второй линии» (Грузия, Армения, Ирак, Афганистан и др.), которые граничат с прикаспийскими государствами, также заинтересованы в обеспечении безопасности Большого Каспия.

Каспийский регион РФ объединяет в себе две особые экономические зоны – портовую и промышленно-производственного типа, созданные для привлечения инвестиций в производственную и транспортно-логистическую деятельность в рамках развития международного транспортного коридора «Север – Юг».

При этом особую группу жизненно важных интересов России в Каспийском бассейне образуют проблемы, связанные с национальной безопасностью входящих в регион и прилегающих к нему российских территорий, а также России в целом в системе региональных и международных отношений. Задача оценки уровня комплексной безопасности в Прикаспийском регионе является одной из важнейших геополитических задач.

Комплексная безопасность региона – это состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз в рамках субъекта (группы субъектов) Российской Федерации.

Комплексная безопасность региона напрямую связана со следующими условиями: географическим положением, климатом, степенью обеспеченности природными ресурсами, численностью населения, развитостью инфраструктуры и т.д. [1]. Поэтому ее обеспечение предусматривает работы по следующим направлениям: экологическая безопасность, экономическая безопасность, информационная безопасность, социальная и криминологическая безопасности и др.

Данные аспекты комплексной безопасности часто взаимосвязаны между собой и оказывают взаимное влияние друг на друга. Изменение уровня безопасности по одному направлению часто приводит к изменению других аспектов комплексной безопасности. Так, например, снижение доходов населения, повышение уровня безработицы, потеря позиций на внутреннем и внешнем рынках могут служить последствиями угроз экономической безопасности. Угрозы социальной безопасности могут привести к снижению уровня и качеству жизни, возникновению социальной нестабильности в регионе и оттоку эмигрантов. Угрозы экологической безопасности создают условия для эскалации негативного воздействия на окружающую среду и, как следствие, снижения продолжительности жизни, ухудшения здоровья населения.

Для оценки каждого аспекта (компонента) комплексной безопасности в той или иной степени разработан свой глоссарий, свой методологический аппарат, имеются свои подходы к обеспечению необходимого уровня безопасности по тому или иному направлению. Часто используемые для каждого направления подходы плохо совместимы между собой, одни и те же термины могут иметь различные значения и содержательное наполнение и т.д.

В работе [2] была предпринята попытка преодолеть некоторые из указанных трудностей путем построения инвариантной онтологической модели (рис. 1).

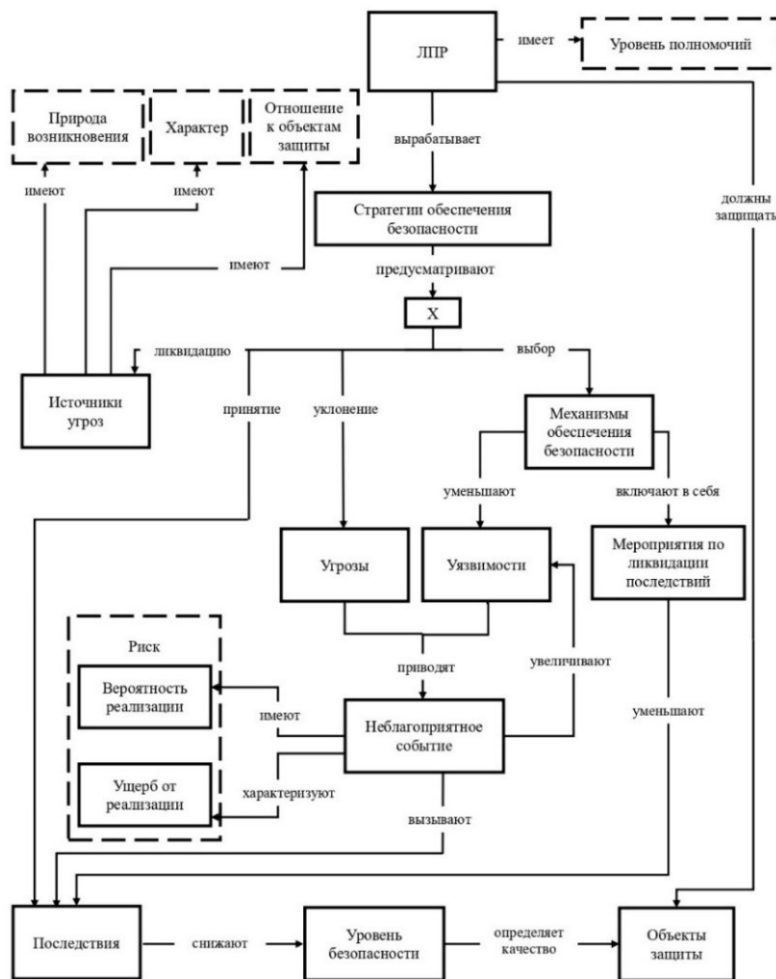


Рисунок 1 – Онтологическая модель процесса обеспечения комплексной безопасности

Наличие такой модели позволяет отражать взаимосвязи между различными понятиями в области обеспечения комплексной безопасности региона.

Построенная таким образом инвариантная (относительно различных направлений обеспечения комплексной безопасности) онтологическая модель позволяет, с одной стороны, унифицировать основные подходы и четко сформулировать цели и методы управления уровнем безопасности региона, с другой стороны, при рассмотрении различных сфер обеспечения комплексной безопасности региона имеется возможность содержательного наполнения концептов разработанной модели смысловым контентом, отражающим специфические особенности того или иного направления обеспечения комплексной безопасности.

Однако сама задача оценки уровня комплексной безопасности остается сложной и трудно формализуемой в связи с тем, что многие критерии затруднительно оценить в численном виде.

Обычно в таких случаях прибегают к экспертным оценкам, получая вербальные (нечисловые) значения. Применение методов экспертных оценок носит субъективный характер, так как оценка уровня производится человеком. При этом достоверность и надежность результатов зависят от компетентности эксперта.

Разработка методологического аппарата, который позволил бы объединить подходы к оценке различных аспектов безопасности в рамках единой модели, и является **целью** данной работы.

**Критерии оценки уровня комплексной безопасности.** Задача обеспечения комплексной безопасности носит разносторонний характер и является многокритериальной, поэтому для оценки ее уровня используется целый ряд различных показателей – критериев:  $K^{d_i}$  – частные критерии, отражающие оценку уровня безопасности по направлению  $d_i$ , где  $d_i \in D = \{\text{«экономическая»}, \text{«информационная»}, \text{«экологическая»}, \text{«криминологическая»}, \text{«социальная»}\}$  – множество направлений обеспечения комплексной безопасности.

Для оценки уровня комплексной безопасности необходимо построить интегральный критерий  $\bar{K}$ :

$$\bar{K} = F(K^{d_i}), \quad (1)$$

где  $F$  – некоторая функция (преобразование), осуществляющая свертку частных критериев обеспечения безопасности по каждому направлению  $d_i$ .

В свою очередь,  $K^{d_i}$  зависит от параметров, влияющих на оценку по каждому направлению:

$$K^{d_i} = K^{d_i}(P_j^i), \quad (2)$$

где  $P_j^i$  – параметр, характерный для каждого направления комплексной безопасности ( $j = 1 \dots N_i$ ).

Наиболее распространенным методом решения многокритериальных задач является построение интегральных показателей на основе метода свертки критериев. Свертка критериев означает построение интегрального показателя на основе частных критериев. Метод свертки часто применяется для решения практических задач, прост в реализации и позволяет найти единственное оптимальное решение [3].

$F(K^{d_i})$  может рассчитываться как взвешенная сумма частных показателей (аддитивная свертка) или как их произведение (мультипликативная свертка):

$$\bar{K} = \sum_i \alpha_i K^{d_i}, \quad (3)$$

$$\bar{K} = \prod_i K^{d_i \alpha_i}, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  – вес для каждого критерия  $K^{d_i}$  ( $i$  – индекс, отражающий направление комплексной безопасности).

Весовые коэффициенты  $\alpha_i$  необходимо выбрать таким образом, чтобы их сумма была равна единице:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1. \quad (5)$$

Задача определения числовых значений для весов является достаточно затруднительной для экспертов. В таком случае можно воспользоваться модифицированным методом нестрогого ранжирования, предложенном в работе [4], позволяющим определить обобщенные на случай предпочтения/безразличия факторов по отношению друг к другу веса Фишберна.

Веса Фишберна подчиняются системе убывающего предпочтения и изменяются по арифметической прогрессии. Весь интервал допустимых критериев нумеруется по степени важности. В случае если эксперт затрудняется различить критерии, он может при ранжировании поместить их рядом в произвольном порядке. Оценка (ранг) критерия определяется его номером. При этом за ранг каждого из неразличимых критериев принимается номер всей группы как целого объекта в упорядочении [5].

Например, пусть эксперт проводит численную оценку значимости следующих критериев, которые характерны для оценки уровня экологической безопасности прикаспийских регионов: истощение ресурсов в результате изменения климата и антропогенного воздействия (опустынивание, степень снижения уровня воды в водоемах, уменьшение видового разнообразия флоры и фауны,

опасные природные явления и т.д.); уровень вредных физических воздействий (шум, температура, влажность, ветра и т.д.); ресурсопотребление и ресурсный баланс; загрязнение окружающей среды (концентрация тяжелых и переходных металлов в воде; среднее содержание тяжелых металлов в почве, уровень загрязнения атмосферного воздуха, качество и загрязненность водопроводной воды, содержание углеводов в воде и т.д.), загрязнение продуктов питания; вывоз отходов и т.д. [6, 7]. При этом эксперт упорядочил критерии следующим образом:

$$K_4, (K_6, K_1), K_2, (K_5, K_3). \quad (6)$$

Критерии, значимость которых эксперт не смог определить однозначно, объединены в круглые скобки. Тогда ранги для каждого из критериев, вычисленные в соответствии с предложенной в работе [4] процедурой, равны:

$$S_4 = 1; S_6 = S_1 = 2; S_2 = 3; S_5 = S_3 = 4, \quad (7)$$

где  $S_i$  – ранг критерия после упорядочения.

Просуммируем все полученные оценки:  $R = \sum_i S_i = 16$ . Далее вес критерия находится путем деления ранга на полученную сумму:

$$\alpha_4 = S_4/R = 1/16; \alpha_6 = \alpha_1 = S_{1,6}/R = 2/16; \alpha_2 = 3/16; S_5 = S_3 = 4/16. \quad (8)$$

Полученные таким образом числовые значения являются весами для каждого критерия.

Умножение значений критериев на весовые коэффициенты позволит придать им разную степень важности – чем больше вес критерия, тем большее влияние он окажет на значение интегральной оценки.

Необходимо отметить, что полученное решение при аддитивной свертке, оптимальное в смысле единого суммарного критерия, может характеризоваться низким качеством по ряду частных критериев. В некоторых случаях это является неприемлемым. Значительные затруднения также могут возникнуть в случае сильной корреляции между критериями. Чтобы исключить неприемлемо низкие значения отдельных критериев, можно наложить дополнительные ограничения на них.

При мультипликативной свертке нет необходимости нормировать значения отдельных критериев, так как при его применении допустимо использовать абсолютные значения. Но нужно учитывать, что если один из критериев равен нулю, то и мультипликативная свертка равна нулю. Для аддитивной же свертки это не актуально. В связи с этим при использовании мультипликативной свертки в отличие от аддитивной большее влияние на значение интегрального критерия оказывают частные критерии, имеющие низкие значения [8].

Для определения значения интегрального критерия, характеризующего уровень комплексной безопасности региона, было принято решение воспользоваться аддитивной сверткой, так как ее использование позволит сравнить разнородные качества, осуществляя перевод из абсолютных значений в относительные; свертка приводит значения критериев к диапазону  $[0; 1]$  абсолютной шкалы, что поможет осуществлять в ней все допустимые алгебраические операции. Указание доли критерия от его максимального значения позволит сопоставлять оценки, полученные в разных шкалах [9].

При этом необходимо отметить следующее. Для решения широкого круга задач управления, планирования производственной деятельности, распределения различного рода ресурсов, конструирования, проектирования и для задач принятия решений в многошаговых (многоэтапных) процессах нередко применяют принцип оптимальности Р. Беллмана. Часто его формулируют следующим образом: «Оптимальная траектория состоит из оптимальных частей». Эта формулировка относится не только к траекторным задачам, но ко всем задачам, решаемым с помощью метода динамического программирования, если под траекторией понимать последовательность переходов из одного состояния в другое в результате решений (управлений), принимаемых на последовательных этапах. В этом случае в упрощенном виде принцип Р. Беллмана формулируется так: «Если в каждом из состояний дальнейшее поведение системы не зависит от того, как она попала в это состояние, то дальнейшая траектория должна быть оптимальной» [10].

Одной из специфических особенностей задачи оценки уровня комплексной безопасности является наличие обратных связей и взаимное влияние факторов друг на друга при нахождении вектора управляющих воздействий. Поэтому принцип оптимальности Р. Беллмана часто не может быть применим при решении данной задачи.

Для ее решения предлагается использовать подход, впервые предложенный для комплексной оценки уровня информационной безопасности в работах [11–13], распространив его на иные аспекты безопасности прикаспийских регионов с учетом их специфических особенностей.

**Когнитивная модель оценки уровня комплексной безопасности.** При исследовании слабоструктурированных систем эффективно применение когнитивного подхода, согласно которому описание таких систем с учетом их неопределенности возможно с помощью комплекса согласованных между собой моделей, отражающих различные стороны ее функционирования. Когнитивное моделирование является универсальным инструментом решения задач управления слабоструктурированными (слабоформализуемыми) системами (ситуациями) [14].

Для разработки нечеткой когнитивной модели объект исследования представляют в виде знакового ориентированного графа, в котором вершинам сопоставляются факторы, а ребрам – веса в той или иной шкале. Поэтому можно принять, что формально общей для всех работ когнитивного подхода является когнитивная карта в виде знакового или взвешенного графа над множеством факторов [15]. Таким образом, можно считать, что структура нечетких когнитивных моделей для оценки уровня комплексной безопасности имеет вид:

$$ISL = \langle G, L, E \rangle, \quad (9)$$

где  $G$  – ориентированный граф, имеющий одну корневую вершину:

$$G = \langle \{F_i\}; \{D_{ij}\} \rangle, \quad (10)$$

где  $\{F_i\}$  – множество вершин графа (факторов или концептов в терминологии НКМ);  $\{D_{ij}\}$  – множество дуг, соединяющих  $i$ -ю и  $j$ -ю вершины (множество причинно-следственных связей между концептами);  $F_0 = K$  – корневая вершина, отвечающая уровню комплексной безопасности в целом (интегральному критерию безопасности – целевому концепту);  $L$  – набор качественных оценок уровней каждого фактора в иерархии:  $L = \{\text{Низкий, Ниже среднего, Средний, Выше среднего, Высокий}\}$ ;  $E$  – система отношений предпочтения одних факторов другим по степени их влияния на заданный элемент следующего уровня иерархии:

Состояние системы с точки зрения безопасности по каждому критерию согласно подходу, предложенному в указанных ранее работах [9–10], можно охарактеризовать следующим кортежем:

$$B = \langle K_i \ F_i \ V_i \ T_i \ S_i \rangle, \quad (11)$$

где  $K_i$  – показатель уровня комплексной безопасности по  $i$ -му критерию;  $F_i$  – тенденция изменения  $i$ -го критерия (возрастает (+1), убывает (–1), нейтрален(0));  $V_i$  – скорость изменения  $i$ -го критерия (например: низкая, ниже среднего, средняя, выше среднего, высокая);  $T_i$  – характерное для  $i$ -го критерия время, которое, в частности, позволяет правильно интерпретировать значения параметра  $V_i$ ;  $S_i$  – степень критичности негативных последствий при реализации рисков, ухудшающих значение  $i$ -го критерия.

Степень критичности  $S_i$ , по сути, является весом для каждого критерия, который определяется путем экспертных оценок и вычисления весов Фишберна для каждого критерия.

Представленный кортеж  $B$  определяется для каждого направления обеспечения безопасности, совокупность таких кортежей, записанных построчно, будет представлять собой матрицу.

Критерии уровня безопасности зависят от последствий возможной реализации угроз, мероприятий по предотвращению и ликвидации этих последствий. При этом угрозы подразделяются на первичные и вторичные. Первичная угроза – это потенциальная опасность, реализация которой может нанести непосредственное негативное воздействие на защищаемую систему с заданной вероятностью появления. Вероятность проявления вторичной угрозы зависит уже непосредственно от возникновения первичной угрозы и состояния системы и внешней среды. Введем и следующие обозначения:

$$\bar{U}_i \text{ и } \tilde{U}_j \ (i, j = 1, 2, 3, \dots), \quad (12)$$

где  $\bar{U}_i$  и  $\tilde{U}_j$  – совокупность первичных и вторичных угроз, возникающих с вероятностями  $\bar{P}\bar{U}_i$  и  $\tilde{P}\tilde{U}_j$ , соответственно, и оказывающих влияние  $\bar{n}_k$  и  $\tilde{n}_k$  на элемент ( $k$ ) кортежа  $B$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ).

Влияние каждой из первичных или вторичных угроз можно описать соответствующими матрицами влияния (МВ)  $\bar{N}_i$  и  $\tilde{N}_i$ , имеющими вид:

$$N_i = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} & n_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{n1} & n_{n2} & n_{n3} & n_{n4} & n_{n5} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Кортеж  $\bar{R}_i = \{\bar{N}_i; \bar{P}\bar{U}_i\}$  можно определить как риск реализации  $i$ -й первичной угрозы.

Данный кортеж отражает появление с вероятностью  $\bar{P}\bar{U}_i$  негативных факторов, которые изменяют состояние системы через соответствующие матрицы влияния  $\bar{N}_i$ .

Вероятности возникновения первичных угроз  $\bar{P}\bar{U}_i$  от нас не зависят. Однако совокупность превентивных мер защиты позволяет ослабить влияние первичных угроз на степень безопасности системы.

Этот факт может быть описан с помощью матриц превентивных мер (МПМ):

$$Z_j = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} & z_{15} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} & z_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1} & z_{n2} & z_{n3} & z_{n4} & z_{n5} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где  $j = \bar{1}, \bar{M}$ ,  $M$  – общее количество превентивных мер.

Элементы матрицы  $Z_i$  назовем *демпфирующими коэффициентами*.

Тогда под *остаточным влиянием* будем подразумевать матрицу  $\hat{N}_i$  (назовем ее матрицей остаточного влияния – МОВ), элементы которой находятся из выражения:



$$\hat{n}_{mn} = n_{mn} \otimes \max_{k=1..M} z_{mn}^k, \quad (15)$$

где  $z_{mn}^k$  – элемент  $(m, n)$  матрицы превентивных мер  $Z_k$ . Символом « $\otimes$ » обозначена некоторым образом определенная для двух матриц операция. В случае числовых значений элементов матриц это может быть, например, операция обычного поэлементного умножения или сложения. В случае лингвистических значений данная операция определяется с помощью принципа расширения обычных (четких) математических функций на нечеткие числа, предложенного Л. Заде [3].

Под *остаточным риском* будем понимать кортеж:

$$\bar{R} = \{\bar{N}_i; \bar{P}\bar{U}_i\}, \quad (16)$$

Если все же, несмотря на превентивные меры защиты, реализация определенного множества первичных угроз привела к возникновению последствий, то необходимо предпринять меры для их локализации и устранения.

Прежде всего необходимо оценить отклонение текущего состояния системы  $\hat{B}$  от безопасного состояния  $B_S$ .

Введем понятие разности между двумя матрицами, определив результат применения операции « $\#$ » к двум элементам матриц аналогично тому, как это было сделано для операции « $\otimes$ »: в случае числовых значений элементов матриц – это операция поэлементного вычитания, в случае лингвистических значений – операция определяется с помощью принципа расширения Л. Заде.

Тогда матрицу  $Q = B_S \# \hat{B}$  назовем *матрицей потерь безопасности* (МПБ) на данном этапе.

Элементы МПБ являются входными данными для блока ликвидации последствий (БЛП).

Реализация мероприятий этого блока может быть формализована с помощью матрицы ликвидации последствий (МЛП):

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} & l_{15} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & l_{24} & l_{25} \\ l_{n1} & l_{n2} & l_{n3} & l_{n4} & l_{n5} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Результат применения БЛП может быть записан следующим образом:

$$\hat{Q} = Q \otimes L = \begin{pmatrix} \hat{q}_{11} & \hat{q}_{12} & \hat{q}_{13} & \hat{q}_{14} & \hat{q}_{15} \\ \hat{q}_{21} & \hat{q}_{22} & \hat{q}_{23} & \hat{q}_{24} & \hat{q}_{25} \\ \hat{q}_{n1} & \hat{q}_{n2} & \hat{q}_{n3} & \hat{q}_{n4} & \hat{q}_{n5} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Матрицу  $\hat{Q}$  назовем матрицей остаточных потерь безопасности (МОПБ).

Если  $\hat{Q} \neq B_S$ , то подобное состояние системы может инициировать появление вторичных угроз с вероятностями  $\bar{P}\bar{U}_i$ .

Таким образом, кроме первичных угроз, в зависимости от текущего состояния системы и ее окружения возможно возникновение вторичных угроз, вероятность появления которых равна  $\bar{P}\bar{U}_i$ .

Кортеж  $\bar{R}_i = \{\bar{N}_i; \bar{P}\bar{U}_i\}$  назовем *риском реализации  $i$ -й вторичной угрозы*.

Заметим, что вероятности появления вторичных угроз не являются безусловными, как для первичных угроз. Они зависят от текущего состояния системы. С первичными угрозами мы начинаем бороться еще до их наступления, т.е. фактически пытаемся свести к минимуму их последствия, не имея возможности повлиять на сам факт их появления. В случае со вторичными угрозами мы должны пытаться вообще не допустить их, т.е. должны бороться с вызывающими их причинами. Это принципиальное различие в блоках мероприятий, воздействие которых формализовано множеством матриц  $Z_j$  и матрицей  $L$ .

На основании вышеизложенного общую схему анализа и управления комплексной безопасностью на основе нечеткого когнитивного моделирования можно представить в следующем виде (рис. 2):

1. Сбор информации об объекте защиты, выбор критериев, характеризующих состояние различных сторон обеспечения безопасности, определение их приемлемого уровня (возможно в виде интервальных оценок или лингвистических термов).
2. Построение когнитивной модели в виде знакового ориентированного графа с наложенной системой отношений предпочтения типа  $E = \{F_i(e) F_j | e \in (>; \approx)\}$ , где  $F_i$  и  $F_j$  – факторы одного уровня иерархии,  $>$  – отношение предпочтения,  $\approx$  – отношение безразличия. Такая система может быть получена, например, изложенным в [1] модифицированным методом нестрогого ранжирования, позволяющим определить обобщенные на случай предпочтения/безразличия факторы по отношению друг к другу веса Фишберна для каждой дуги  $D_{ij}$  (веса связей).
3. Вычисление весов Фишберна на основании модифицированного метода нестрогого ранжирования.
4. Анализ уровня обеспечения безопасности системы (УБС).

5. Если УБС не находится в приемлемом диапазоне значений, то производятся изменения в составе концептов, участвующих в построении когнитивной модели, в составе связей между концептами, изменяются их веса посредством введения защитных мероприятий, влияния которых отражаются МПМ и МЛП. Данные изменения соответствуют различным стратегиям управления безопасностью: уменьшение рисков, уклонение от рисков, принятие рисков [16].

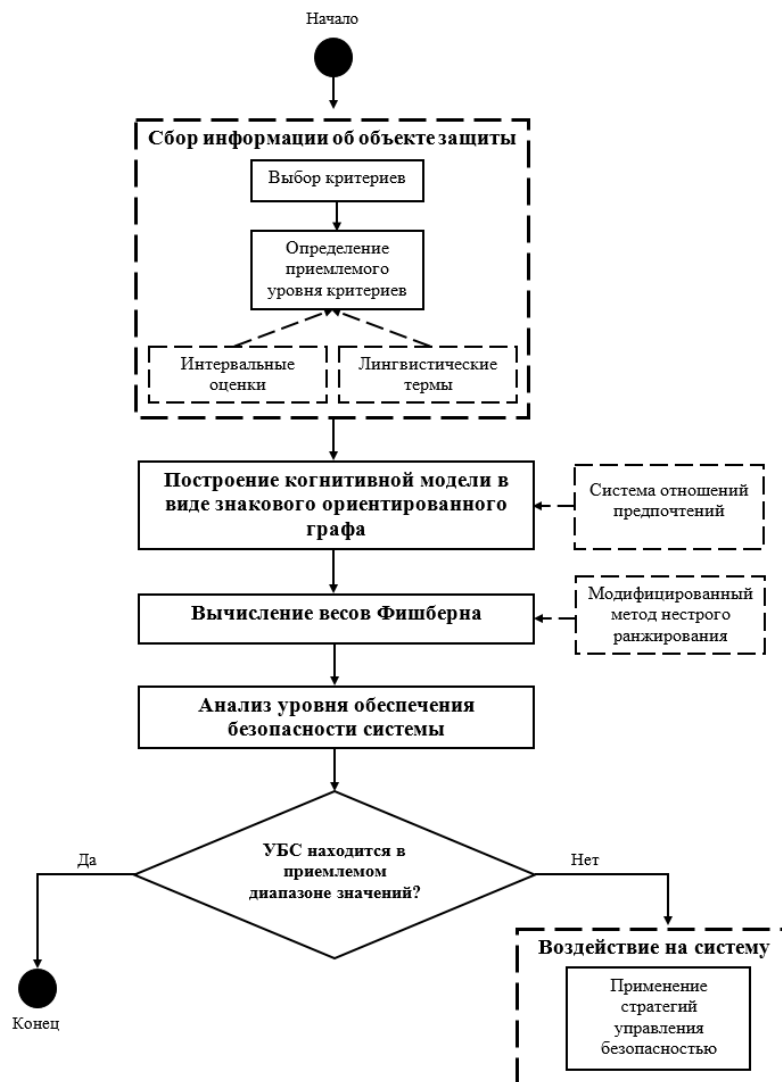


Рисунок 2 – Схема анализа и управления комплексной безопасностью

Таким образом, процесс обеспечения безопасности системы подразумевает решение двух взаимосвязанных задач: прямой (анализ состояния системы) и обратной задачи управления (воздействие на систему). При решении первой задачи требуется определить значения критериев безопасности  $K_i$  и интегрального критерия  $K$  при заданных значениях всех влияющих на них концептов. Если полученные значения находятся вне диапазона приемлемости, то при решении обратной задачи необходимо подобрать такие управляющие воздействия  $Z_i$  и  $L$ , которые обеспечат возвращение целевых критериев в безопасный диапазон.

Если существует не единственный набор необходимых управляющих воздействий, то на этом этапе может возникнуть задача оптимизации, состоящая в нахождении такой комбинации  $Z_i$  и  $L$ , которая обеспечивает максимальное воздействие на негативные факторы при заданных или минимальных затратах на реализацию способов и средств защиты.

**Примеры построения когнитивной модели.** Предложенная методика может быть проиллюстрирована на примере построения модели оценки уровня экологической безопасности.

Экологическая безопасность – состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий [17].

На первом этапе необходимо осуществить сбор информации относительно показателей, характеризующих состояние экологической обстановки, выделить основные критерии, которые непосредственно влияют на уровень экологической безопасности, выделить параметры, от которых эти критерии зависят.

Определение уровня экологической безопасности является многокритериальной задачей. Оценка уровня осуществляется по нескольким критериям.

В первом приближении перечень критериев для иллюстрации применения предлагаемого подхода был определен на основе результатов опроса экспертов в данной области, которые выделили три основных критерия: уровень загрязненности окружающей среды, уровень параметрического загрязнения, уровень загрязненности питьевой воды и продуктов питания.

Уровень загрязненности среды характеризует степень воздействия загрязнения воздуха, воды и почвы на здоровье населения и экосистемы.

Уровень параметрического загрязнения определяет влияние факторов среды обитания, создающее угрозу жизни или здоровью человека в виде физического воздействия температурно-энергетических, электромагнитных, шумовых загрязнений.

Обеспечение продовольственной безопасности и безопасности питания также является одним из факторов, определяющих уровень экологической безопасности. При этом данный критерий зависит от уровня загрязненности продуктов различными химическими веществами, бактериями, паразитами.

Таким образом, модель оценки уровня экологической безопасности можно представить в виде нечеткого графа, в рамках которого указанный уровень определяется тремя факторами (уровнем загрязненности окружающей среды, уровнем параметрического загрязнения, уровнем загрязненности питьевой воды и продуктов питания) (рис. 3).

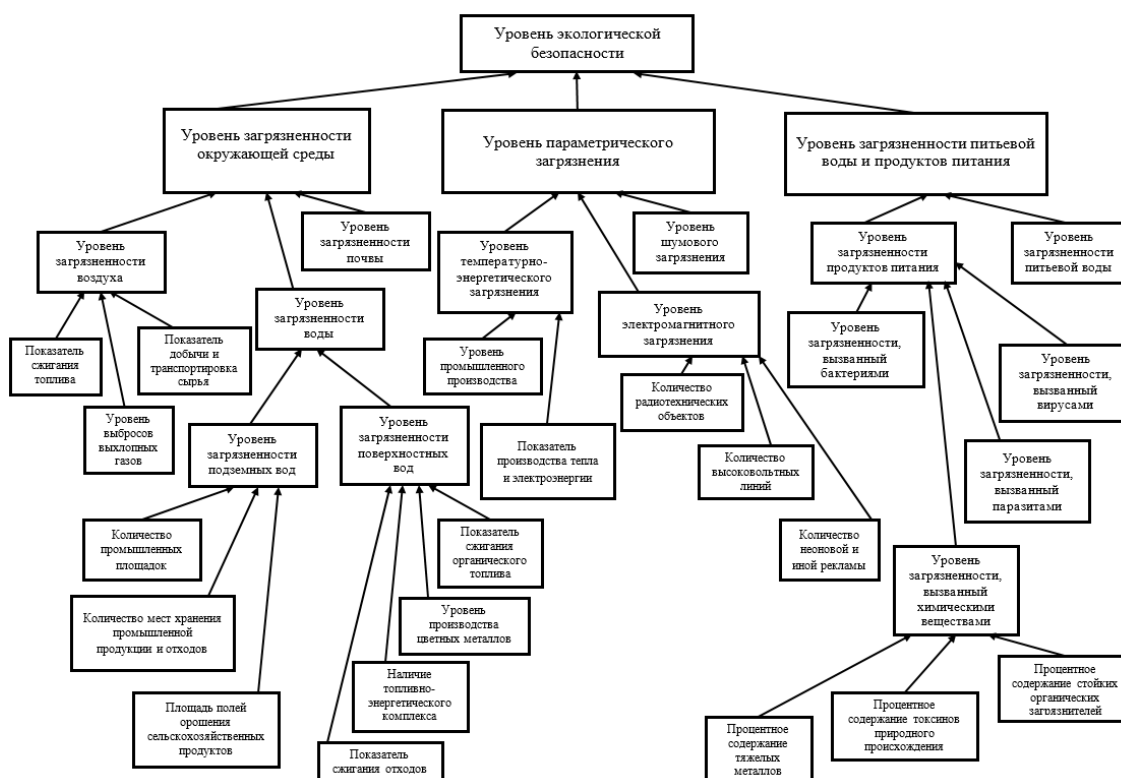


Рисунок 3 – Фрагмент нечеткой когнитивной модели для определения уровня экологической безопасности

Необходимо отметить, что оценка уровня экологической безопасности может быть осуществлена инструментальными методами, путем проведения различных замеров уровней загрязненности окружающей среды, продуктов питания, питьевой воды и т.д.

Полученные значения можно сравнить с показателями предельно допустимых концентраций (ПДК), зафиксированными в нормативных документах. Разница между ПДК и полученными значениями замеров могут в этом случае позволить ЛПП судить об уровне того или иного аспекта экологической безопасности.

Кроме того, они могут быть в дальнейшем использованы для параметрической идентификации нечеткой когнитивной модели: подбора оптимальных в смысле «наименьших квадратов» набора весов влияний концептов с целью обеспечения максимальной адекватности модели.

Однако сама по себе такая оценка не дает возможность ЛПП представить картину в целом, чтобы понять и проанализировать взаимосвязи между концептами, оказывающими влияние на значения того или иного измеренного параметра загрязненности. Как следствие, для ЛПП оказывается затруднительным выбрать управляющие воздействия, улучшающие уровень экологической безопасности в регионе.

Для этого необходимо проанализировать все причинно-следственные связи между концептами данной предметной области. Именно для этого и строится нечеткая когнитивная модель.

При этом на самом низком уровне располагаются параметры, на которые ЛПП может оказывать влияние. Посредством изменения управляемых параметров можно влиять на интегральный показатель уровня экологической безопасности.

После построения нечеткого графа необходимо вычислить веса влияния концептов (веса Фишберна) на основании модифицированного метода нестрого ранжирования.

Предварительно экспертная группа проранжировала критерии (уровень загрязненности окружающей среды, уровень параметрического загрязнения, уровень загрязненности питьевой воды и продуктов питания) по степени их значимости:

$$P_3, (P_1, P_2), \quad (19)$$

где  $P_1$  – уровень загрязненности окружающей среды;  $P_2$  – уровень параметрического загрязнения;  $P_3$  – уровень загрязненности питьевой воды и продуктов питания.

Необходимо отметить, что ранжирование указанных критериев может быть осуществлено не только путем опроса экспертов, но и после обработки результатов социологического опроса населения, проживающего в том или ином регионе.

Для этого необходимо составить репрезентативную выборку и предложить участникам опроса проранжировать параметры, характеризующие уровень экологической безопасности по мере возрастания их важности.

В данном случае в качестве экспертов будут выступать все участники опроса, после обработки мнений которых можно получить ранжированный перечень параметров, аналогичный (19). Такой способ позволяет лучше учесть мнения людей, проживающих в том или ином регионе, однако он является более трудоемким и затратным.

После получения ранжированного списка, согласно описанной выше методике, вычисляются оценки значимости для каждого из критериев:

$$S_3 = 1; S_1 = S_2 = 2, \quad (20)$$

где  $S_i$  – ранг критерия после упорядочения.

Сумма оценок:  $R = \sum_i S_i = 5$ . Далее вес критерия находится путем деления ранга на полученную сумму:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = S_{1,2}/R = 2/5; \alpha_3 = 1/5. \quad (21)$$

Подобная процедура осуществляется на всех последующих уровнях нечеткого графа. Рассмотрим, например, вычисление весов Фишберна для 2 уровня концептов. Эксперты проранжировали критерии по степени значимости их влияния на уровень параметрического загрязнения:

$$P_{2,2}; P_{2,3}; P_{2,1}, \quad (22)$$

где  $P_{2,1}$  – уровень температурно-энергетического загрязнения;  $P_{2,2}$  – уровень электромагнитного загрязнения;  $P_{2,3}$  – уровень шумового загрязнения.

Оценки значимости для каждого из критериев эксперты определили следующие:

$$S_{2,2} = 1; S_{2,3} = 2; S_{2,1} = 3, \quad (23)$$

где  $S_{i,j}$  – ранг критерия после упорядочения.

Сумма оценок:  $R = \sum_i S_{i,j} = 6$ . Далее вес критерия находится путем деления ранга на полученную сумму:

$$\alpha_{2,2} = S_{2,2}/R = 1/6; \alpha_{2,3} = 2/6; \alpha_{2,1} = 3/6. \quad (24)$$

Аналогично находятся веса для других концептов.

Результаты вычисления весов представлены на рисунке 4.

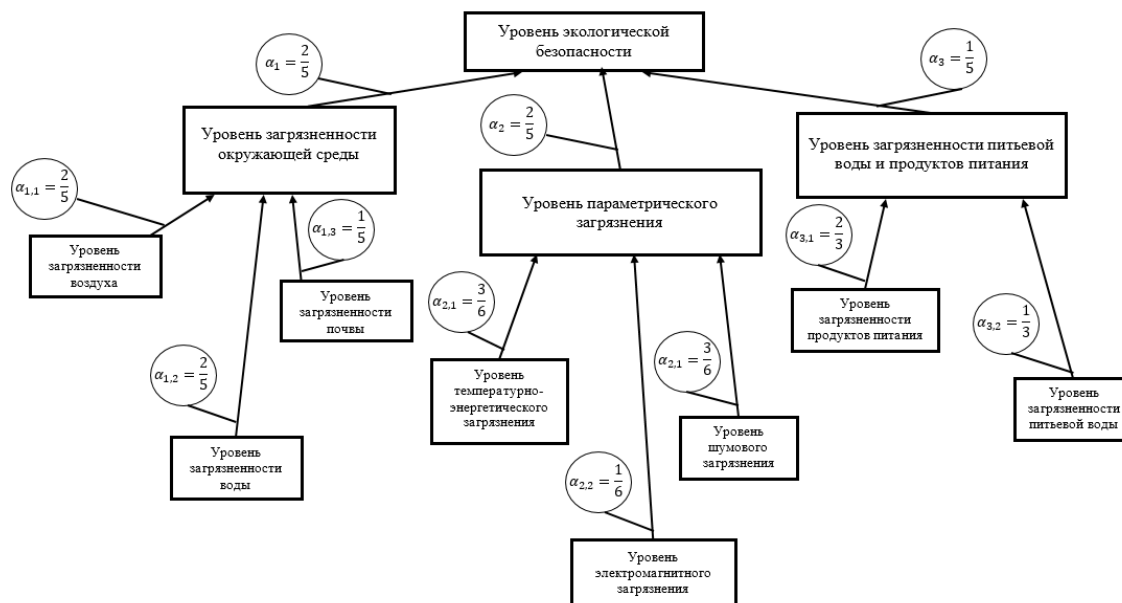


Рисунок 4 – Веса Фишберна для концептов нижних уровней модели

Далее необходимо определить значения концептов, находящихся на нижних уровнях когнитивного графа, для того, чтобы можно было вычислить значения концептов на более высоких уровнях, вплоть до комплексной (интегральной) оценки экологической безопасности региона в целом.

Однако большинству значений концептов трудно дать количественную оценку. В таких случаях обычно прибегают к экспертным оценкам, которые имеют обычно вербальную форму, то есть выражены в виде лингвистических оценок (плохо, удовлетворительно, хорошо, отлично и т.п.).

Для осуществления вычислений, в том числе для применения, например, аддитивной свертки типа (3), необходимо данные лингвистических значений привести к числовому виду, воспользовавшись какой-либо из шкал. В частности, в данной случае представляется целесообразным воспользоваться шкалой Харрингтона.

Шкала Харрингтона – это многоинтервальная дискретная вербально-числовая шкала, состоящая из пяти интервалов единичного отрезка, характеризующих степень приближения к некоторому идеалу: очень высокая (0,8–1,0); высокая (0,63–0,8); средняя (0,37–0,63); низкая (0,2–0,37); очень низкая (0–0,2) [18, 19].

Данная шкала позволяет перевести полученное значение уровня экологической безопасности в единую безразмерную шкалу желательности для получения сводного интегрального показателя.

Так, например, если уровни загрязненности воздуха и воды эксперты оценили как средние, соответственно, за числовое значение данных концептов будет принято 0,6. Уровень загрязненности почвы эксперты отнесли к категории «низкий», поэтому числовое значение концепта будет равно 0,3:

$$K_{1,1} = 0,87; K_{1,2} = 0,75; K_{1,3} = 0,5, \quad (25)$$

где  $K_{1,1}$  – значение концепта «уровень загрязненности воздуха»;  $K_{1,2}$  – значение концепта «уровень загрязненности воды»;  $K_{1,3}$  – значение концепта «уровень загрязненности почвы».

Значения концептов других уровней после преобразования вербальных оценок экспертов в числовые значения шкалы Харрингтона представлены на рисунке 5.

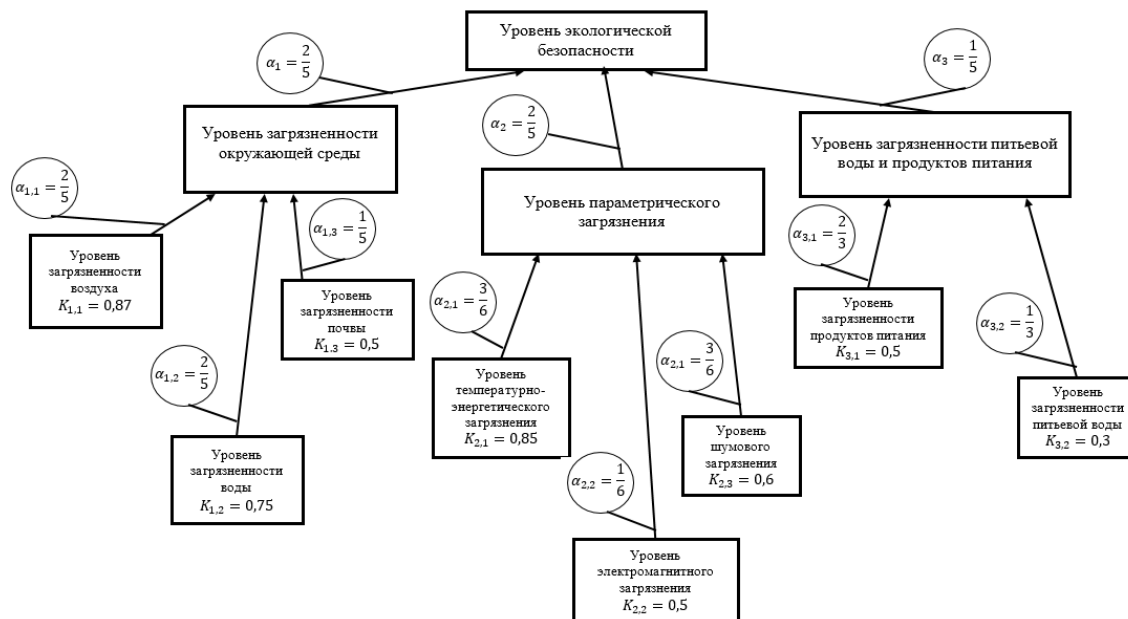


Рисунок 5 – Значения концептов нижних уровней модели

После того как определены веса и значения концептов, можно вычислить количественный показатель для каждого уровня с применением аддитивной свертки.

Уровень загрязненности окружающей среды равен:

$$УЗОС = \sum_i \alpha_{i,j} K_{i,j} = \frac{2}{5} * 0,87 + \frac{2}{5} * 0,75 + \frac{1}{5} * 0,5 = 0,748. \quad (26)$$

Уровень параметрического загрязнения равен:

$$УПЗ = \sum_i \alpha_{i,j} K_{i,j} = \frac{3}{6} * 0,85 + \frac{1}{6} * 0,5 + \frac{2}{6} * 0,6 = 0,705. \quad (27)$$

Уровень загрязненности питьевой воды и продуктов питания равен:

$$УЗПП = \sum_i \alpha_{i,j} K_{i,j} = \frac{2}{3} * 0,5 + \frac{1}{3} * 0,3 = 0,430. \quad (28)$$

В свою очередь, полученные значения позволяют рассчитать уровень экологической безопасности (УЭБ), где  $K_1$  – полученное значение УЗОС;  $K_2$  – полученное значение УПЗ;  $K_3$  – полученное значение УЗПП, а  $\alpha_i$  – рассчитанные ранее веса (см. формулу 21):

$$УЭБ = \sum_i \alpha_i K_i = \frac{2}{5} * 0,748 + \frac{2}{5} * 0,705 + \frac{1}{5} * 0,43 = 0,667 \approx \text{низкий}. \quad (29)$$

Согласно вербально-числовой шкале Харрингтона, значение интегрального критерия уровня экологической безопасности, рассчитанного на основе экспертных данных, характеризуется как низкое.

Для повышения данного уровня необходимо изменить значения управляемых концептов (параметров), а также, возможно, предпринять меры, снижающие степень негативного влияния некоторых концептов на критерии экологической безопасности. Например, уменьшить загрязненность воды можно путем улучшения фильтрации сбрасываемых сточных вод. Кроме того, известно, что основная масса воды, например, на топливно-энергетических предприятиях расходуется для охлаждения технологического оборудования. Если бы удалось осуществить переход от водяного охлаждения к воздушному, это позволило бы значительно сократить расход воды, используемый в технологических процессах и, как следствие, повысить ее качество (уменьшить загрязненность). Все это делает крайне актуальным внедрение новейших технологий, совершенствование имеющегося оборудования, а также разработку новых систем, основанных на более экологически чистых способах производства.

Необходимо отметить, что приведенная в качестве примера нечеткая когнитивная модель является лишь первым приближением в решении поставленной задачи. В дальнейшем она может быть детализирована с целью включения в нее иных влияющих на уровень экологической безопасности концептов. Например, для определения уровня воздействия на загрязненность воздуха количества выхлопных газов можно включить в нечеткий когнитивный граф такие концепты, как: количество автомобилей, эксплуатируемых в регионе, имеющих различный экологический класс транспортного средства (Евро-1, Евро-2, Евро-3, Евро-4, Евро-5).

Подобную нечеткую когнитивную модель также можно разработать, например, для определения уровня социальной стабильности в регионе. Социальная стабильность представляет собой такое сочетание устойчивости и внутреннего равновесия общества, которое обеспечивает максимально благоприятные условия для всестороннего развития человека. Фрагмент возможного варианта структуры нечеткой когнитивной модели для определения уровня социальной стабильности приведен на рисунке 6.

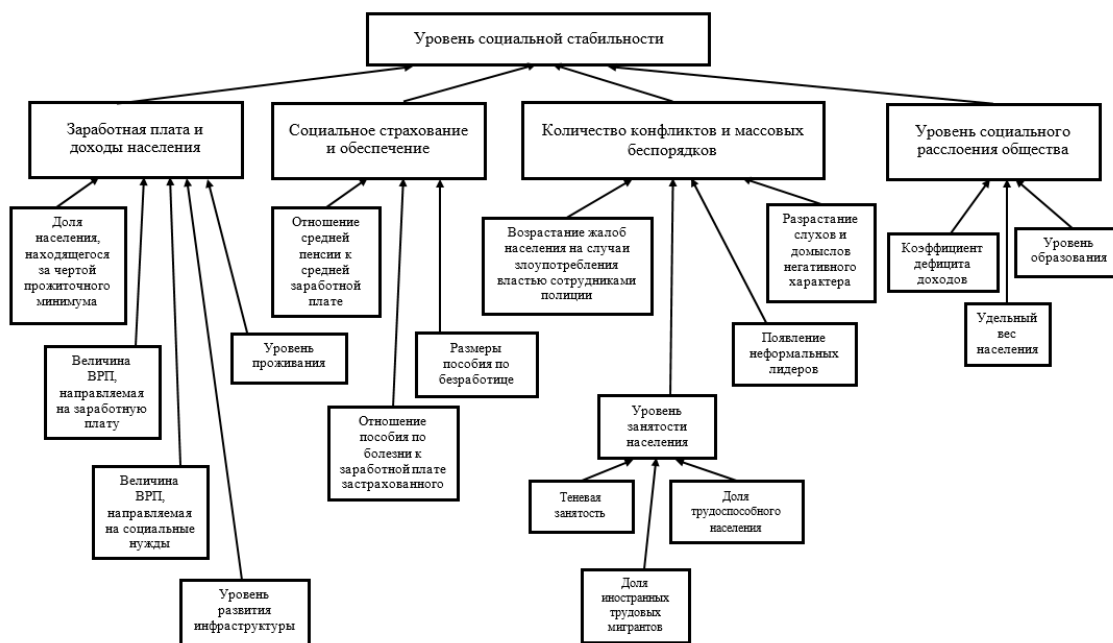


Рисунок 6 – Фрагмент нечеткой когнитивной модели для определения уровня социальной стабильности

Разработка подобных нечетких когнитивных моделей для различных аспектов обеспечения комплексной безопасности региона позволит в дальнейшем учесть их взаимное влияние, а также выделить концепты, через которые такое взаимное влияние реализуется. Например, низкий уровень экологической безопасности, связанный с загрязненностью продуктов питания, может привести к возникновению конфликтов и массовых беспорядков среди населения, а это, в свою очередь, скажется на уровне социальной стабильности.

**Заключение.** Разработка методики, позволяющей объединить подходы к оценке и управлению комплексной безопасностью региона, является актуальной задачей. Различные аспекты обеспечения безопасности региона весьма разнообразны, зависят от большого количества параметров, большую часть из которых затруднительно оценить количественно; различные аспекты взаимосвязаны и могут оказывать сильное влияние друг на друга. Все это приводит к тому, что решение задачи оценки уровня безопасности региона требует комплексного подхода с применением знаний и методов из различных областей науки и техники: системного анализа, теории нечетких множеств, теории графов, теории принятия решений и т.д. Создание и развитие методологических основ оценки и управления уровнем комплексной безопасности региона осуществляется с учетом угроз, которые противостоят соответствующим интересам граждан, социальных групп, региона в целом. Наличие в регионе определенных экологических, экономических, социально-политических, информационных, национальных противоречий порождает хорошо известные угрозы национальной безопасности, имеющие внутреннюю природу.

Цель оценки и управления уровнем комплексной безопасности региона состоит в снижении до приемлемого уровня существующих угроз на основе целенаправленной и согласованной деятельности всех органов управления, сил и средств системы безопасности в ходе функционирования и развития региона, его инфраструктуры и отраслей, реализации социально-экономических и природоохранных программ.

Использование предложенной методики в данной работе позволяет строить модели для различных аспектов обеспечения комплексной безопасности региона. Это позволит в дальнейшем контролировать состояние, организовывать, осуществлять деятельность по обеспечению комплексной безопасности объектов, инфраструктуры, населения Прикаспийского региона в целом.

## Библиографический список

1. Халиуллина, Д. Н. Основные аспекты комплексной безопасности региона / Д. Н. Халиуллина, С. Н. Малигина // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 3 (29). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-aspekty-kompleksnoy-bezopasnosti-regiona>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 10.11.2022).
2. Ажмухамедов, И. М. Инвариантная онтологическая модель процесса обеспечения комплексной безопасности Прикаспийских регионов / И. М. Ажмухамедов, В. А. Корякова // *Caspium Securitatis*: журнал каспийской безопасности. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 11–22.
3. Кузнецов, И. С. О выборе алгоритма и критерия оптимизации для выбора рационального комплекта горных машин в составе экскаваторно-автомобильного комплекса / И. С. Кузнецов, П. И. Николаев // Россия молодая : сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 950301–950308.
4. Ажмухамедов, И. М. Анализ и управление комплексной безопасностью на основе когнитивного моделирования / И. М. Ажмухамедов // УБС. – 2010. – № 29. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-upravlenie-kompleksnoy-bezopasnostyu-na-osnove-kognitivnogo-modelirovaniya>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.11.2022).
5. Ажмухамедов И. М. Моделирование на основе экспертных суждений процесса оценки информационной безопасности / И. М. Ажмухамедов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 2. – С. 101–109.
6. Fedotova, A. V. The environmental problems of the delta areas (on the example of the delta of the Volga) / A. V. Fedotova, L. V. Yakovleva, E. G. Loktionova // *European Geographical Studies*. – 2014. – № 2. – P. 70–74.
7. Fedotova, Anna. Why the area of degraded soils and desertification is increasing in the Volga delta / Anna Fedotova, Lyudmila Yakovleva, Ekaterina Maslova, Arstan Utaliev // *The Caspian in the Digital Age*. – 2022.
8. Свертка критериев. Решение задачи методом аддитивной свертки // кооп. – Режим доступа: <https://koon.ru/svertka-kriteriev-reshenie-zadachi-metodom-additivnoi/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 11.11.2022).
9. Бочков, А. В. О методах качественной оценки состояния безопасности структурно-сложных систем / А. В. Бочков // Надежность. – 2020. – № 3. – С. 34–46.
10. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1960. – 401 с.
11. Ажмухамедов, И. М. Синтез управляющих решений в слабоструктурированных плохоформализуемых социотехнических системах / И. М. Ажмухамедов // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 42. – С. 29–54.
12. Ажмухамедов, И. М. Системный анализ и управление социотехническими системами комплексного обеспечения информационной безопасности / И. М. Ажмухамедов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2013. – № 1. – С. 132–151.
13. Ажмухамедов, И. М. Методология моделирования слабоформализуемых социотехнических систем / И. М. Ажмухамедов, О. М. Проталинский // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 3. – С. 85–91.
14. Щербатов, И. А. Нечеткие когнитивные карты как инструмент представления структур слабоформализуемых систем / И. А. Щербатов // Проблемы управления, обработки и передачи информации : сборник трудов V Международной юбилейной научной конференции. Саратов, 28–30 сентября 2017 года / Саратовский государственный технический университет. – Саратов : ООО СПО «Люди», 2017. – С. 375–378.
15. Авдеева, З. К. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) / З. К. Авдеева, С. В. Коврига, Д. И. Макаренко // Управление большими системами. – 2007. – № 16. – С. 26–39.
16. Хрусталева, Е. Ю. Когнитивные технологии в теории и практике стратегического управления (на примере оборонно-промышленного комплекса) / Е. Ю. Хрусталева, Д. И. Макаренко // Проблемы теории и практики управления. – 2007. – № 4. – С. 25–33.
17. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 14.07.2022).
18. Harrington, E. C. Industr. The desirable function / E. C. Harrington // *Quality Control*. – 1965. – Vol. 1, № 10. – P. 494–498.
19. Белозерова, Р. Х. Разработка методики оценки и сравнения уровня загрязненности городских водоемов с использованием шкалы Харрингтона / Р. Х. Белозерова, А. В. Шабанова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2011. – № 1 (1). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-otsenki-i-sravneniya-urovnya-zagryaznennosti-gorodskih-vodoe-mov-s-ispolzovaniem-shkaly-harringtona>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 10.02.2023).

## References

1. Khaliullina, D. N., Malygina, S. N. Osnovnye aspekty kompleksnoy bezopasnosti regiona [The main aspects of the complex security of the region]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, no. 3 (29). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-aspekty-kompleksnoy-bezopasnosti-regiona> (accessed 11.10.2022).
2. Azhmukhamedov, I. M., Koryakova, V. A. Invariantnaya ontologicheskaya model protsesssa obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti Prikaspiyskikh regionov [Invariant ontological model of the process of ensuring the integrated security of the Caspian regions]. *Caspium Securitatis*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 11–22.



3. Kuznetsov, I. S. Nikolaev, P. I. O vybore algoritma i kriteriya optimizatsii dlya vybora ratsionalnogo komplekta gornyykh mashin v sostave ekskavatorno-avtomobilnogo kompleksa [On the selection algorithm and selection criteria for a natural set of mining machines as part of an excavator-automobile complex]. *Rossiya molodaya : sbornik materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, Kemerovo, 20–23 aprelya 2021 goda* [Young Russia: Collection of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with the participation of RSMSM, Kemerovo, April 20–23, 2021]. Kemerovo, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2021, pp. 950301–950308.
4. Azhmukhamedov, I. M. Analiz i upravleniye kompleksnoy bezopasnostyu na osnove kognitivnogo modelirovaniya [Analysis and management of integrated security based on cognitive modeling]. *Upravlenie bolshimi sistemami* [Large Systems Management], 2010, no. 29. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-upravlenie-kompleksnoy-bezopasnostyu-na-osnove-kognitivnogo-modelirovaniya> (accessed 11/15/2022).
5. Azhmukhamedov, I. M. Modelirovanie na osnove ekspertnykh suzheniy protsessa otsenki informatsionnoy bezopasnosti [Modelling based on the expert judgements of the process of informational safety evaluation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics], 2009, no. 2, pp. 101–109.
6. Fedotova, A. V., Yakovleva, L. V., Loktionova, E. G. The environmental problems of the delta areas (on the example of the delta of the Volga). *European Geographical Studies*, 2014, no. 2, pp. 70–74.
7. Fedotova, Anna, Yakovleva, Lyudmila, Maslova, Ekaterina, Utaliev, Arstan. Why the area of degraded soils and desertification is increasing in the Volga delta. *The Caspian in the Digital Age*, 2022.
8. Svertka kriteriyev. Resheniye zadachi metodom additivnoy svertki [Convolution of criteria. Solving the problem by the additive convolution method]. *koon*. Available at: <https://koon.ru/svertka-kriteriev-reshenie-zadachi-metodom-additivnoi/> (accessed 11.11.2022).
9. Bochkov, A. V. O metodakh kachestvennoy otsenki sostoyaniya bezopasnosti strukturno-slozhnykh sistem [On the methods of qualitative estimation of the safety state of structurally complex systems]. *Nadezhnost [Dependability]*, 2020, no. 20 (3), pp. 34–46.
10. Bellman, R. *Dinamicheskoe programmirovaniye* [Dynamic programming]. Moscow, Foreign Languages Publishing House, 1960. 401 p.
11. Azhmukhamedov, I. M. Sintez upravlyayushchikh resheniy v slabostrukturirovannykh plokhoformalizuyemykh sotsiotekhnicheskikh sistemakh [Synthesis of control decisions in poorly structured poorly formalized sociotechnical systems]. *Upravleniye bolshimi sistemami* [Large Systems Management], 2013, iss. 42, pp. 29–54.
12. Azhmukhamedov, I. M. Sistemnyy analiz i upravleniye sotsiotekhnicheskimi sistemami kompleksnogo obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti [System analysis and management of sociotechnical systems of integrated information security]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternyye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems], 2013, no. 1, pp. 132–151.
13. Azhmukhamedov, I. M., Protalinskiy, O. M. Metodologiya modelirovaniya slaboformalizuyemykh sotsiotekhnicheskikh sistem [Methodology for modeling weakly formalized sociotechnical systems]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy [Artificial Intelligence and Decision Making]*, 2014, no. 3, pp. 85–91.
14. Shcherbatov, I. A. Nechetkie kognitivnye karty kak instrument predstavleniya struktur slaboformalizuyemykh sistem [Fuzzy cognitive maps as a tool for structure representation of poorly formalizable systems]. *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii : sbornik trudov V Mezhdunarodnoy yubileynoy nauchnoy konferentsii. Saratov, 28–30 sentyabrya 2017 goda* [Proceedings of the V International Jubilee Scientific Conference on Problems of Management, Processing and Transmission of Information. Saratov, September, 28–30, 2017], Saratov, 2017, pp. 375–378.
15. Avdeyeva, Z. K., Kovriga, S. V., Makarenko, D. I. Kognitivnoye modelirovaniye dlya resheniya zadach upravleniya slabostrukturirovannymi sistemami (situatsiyami) [Cognitive modeling for solving problems of control of semi-structured systems (situations)]. *Upravleniye bolshimi sistemami* [Large Systems Management], 2007, no. 16, pp. 26–39.
16. Khrustalev, E. Yu., Makarenko, D. I. Kognitivnyye tekhnologii v teorii i praktike strategicheskogo upravleniya (na primere oboronno-promyshlennogo kompleksa) [Cognitive technologies in the theory and practice of strategic management (on the example of the military-industrial complex)]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya* [Problems of theory and practice of management], 2007, no. 4, pp. 25–33.
17. *Federal'nyy zakon «Ob okhrane okruzhayushchey sredy»* [Federal Law “On Environmental Protection”] of January 10, 2002 N 7-FZ (as amended on July 14, 2022).
18. Harrington, E. C. Industr. The desirable function. *Quality Control*, 1965, vol. 21, no. 10, pp. 494–498.
19. Belozerova, R. Kh., Shabanova, A. V. Razrabotka metodiki otsenki i sravneniya urovnya zagryaznennosti gorodskikh vodoyemov s ispolzovaniyem shkaly Kharringtona [Development of a methodology for assessing and comparing the level of pollution of urban water bodies using the Harrington scale]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* [Izvestiya of Universities. Applied chemistry and biotechnology], 2011, no. 1 (1). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-otsenki-i-sravneniya-urovnnya-zagryaznennosti-gorodskih-vodoyemov-s-ispolzovaniem-shkaly-harringtona> (accessed 10.02.2023).

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

DOI 10.54398/20741707\_2023\_1\_112  
УДК 004.001

### **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РЕШАЮЩЕГО ПРАВИЛА И МИНИМИЗАЦИЯ ЧИСЛА ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

*Статья поступила в редакцию 27.12.2022, в окончательном варианте – 11.01.2023.*

**Чернавин Павел Федорович**, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,  
кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-3214-3906, e-mail: chernavin.p.f@gmail.com

**Чернавин Николай Павлович**, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,  
ассистент кафедры, ORCID: 0000-0002-2093-9715, e-mail: ch\_k@mail.ru

**Чернавин Федор Павлович**, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,  
кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-4105-231X, e-mail: chernavin\_fedor@mail.ru

Целью работы является показать возможности применения моделей математического программирования для решения задач классификации на примере метода комитетов. Задачи классификации присутствуют во множестве практических задач, поэтому развитие методов классификации является актуальным направлением исследований. При этом вопрос применения математического программирования в таких задачах является мало изученной темой. В работе приведены ограничения и целевые функции для моделей математического программирования, в рамках которых реализованы различные логики комитетных конструкций. Дано описание критериев качества в моделях классификации и их реализации в рамках моделей математического программирования, а также приведены графические интерпретации комитетных логик. Представлена авторская интерпретация условия снижения размерности задачи за счет выбора наиболее информативных признаков в рамках единой модели математического программирования. Предлагаемый подход позволяет достигать высокого качества классификации, минимизировать число признаков и давать геометрическую интерпретацию найденных решений. Описанные модели были протестированы авторами на задачах из таких сфер, как здравоохранение и металлургия.

**Ключевые слова:** метод комитетов, машинное обучение, математическое программирование, классификация

### **QUALITY CONTROL OF THE DECISION RULES AND MINIMIZATION OF THE NUMBER OF FEATURES IN CLASSIFICATION PROBLEMS BASED ON MATHEMATICAL PROGRAMMING MODELS**

*The article was received by the editorial board on 27.12.2022, in the final version – 11.01.2023.*

**Chernavin Pavel F.**, Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-3214-3906, e-mail: chernavin.p.f@gmail.com

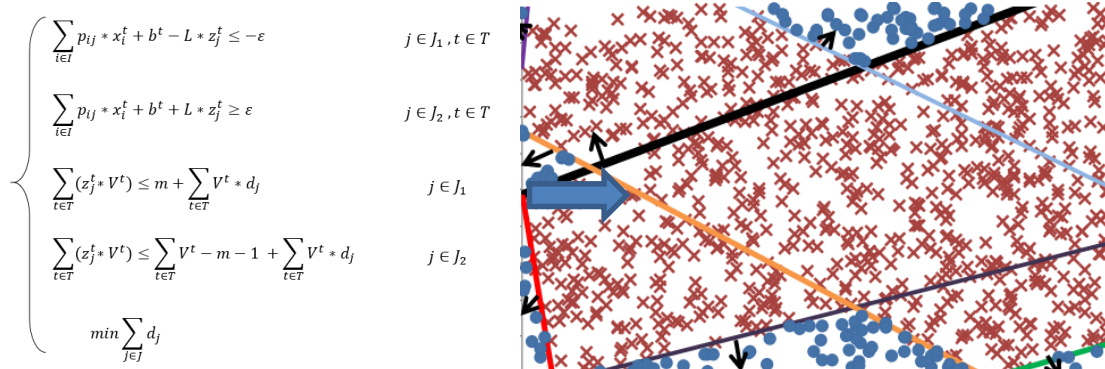
**Chernavin Nikolai P.**, Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, Department Assistant, ORCID: 0000-0002-2093-9715, e-mail: ch\_k@mail.ru

**Chernavin Fedor P.**, Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-4105-231X, e-mail: chernavin\_fedor@mail.ru

The aim of this article is to show the possibilities of using mathematical programming models in classification problems using the committee machine method. Classification problems can be found in many practical problems, so the development of classification methods is an important area of research. At the same time, the application of mathematical programming is a little studied topic. The paper presents restrictions and objective functions for mathematical programming models within which various logics of committee constructions are implemented. A description quality metrics in classification models and their implementation in form of mathematical programming, as well as the graphical interpretations of the committee logics. The author's interpretation of the condition for reducing the dimension of the problem by choosing the most informative features within the framework of a unified model of mathematical programming is presented. The proposed method allows to achieve high classification quality, to minimize the number of features in classification problems and to provide a geometric interpretation of the solutions. The described models were tested by the authors in problems from such areas as: the healthcare, metallurgy, bank scoring and stock exchange market.

**Keywords:** Committee machine method, machine learning, mathematical programming, classification

Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** В настоящий момент времени одна и та же задача классификации может быть решена различными способами. За каждым таким способом стоит определенная научная школа и математический инструментарий, позволяющий получить решающее правило (РП). Причем сказать заранее, какой из подходов даст наилучшее РП, практически невозможно, так как все подходы научны и конкурентно способны, а понятие «наилучшее решение» имеет много составляющих и зависит от специфики конкретной задачи. Поэтому одна и та же задача обычно решается несколькими способами, полученные решения сравниваются, и заказчик исследования выбирает наиболее ему подходящее. Для получения различных решений обычно используются программы из библиотек программного обеспечения для задач машинного обучения (МО). Однако в этом случае специалист по анализу данных зажат жесткими рамками данных программ и имеет достаточно ограниченные возможности по управлению качеством получаемого решения.

В данной статье авторы хотят поделиться опытом решения задач классификации в двух сильно отличающихся друг от друга предметных областях: медицина и металлургия. Естественно, что практические специалисты из этих областей, предоставляя данные для исследования, формулировали свои требования к РП. Зачастую основные пожелания заказчиков исследования были следующие:

1. Качество РП должно быть не ниже уровня, заданного заказчиком.
2. Выполнение качественных показателей должно достигаться при минимальном количестве используемых признаков.
3. РП и признаки должны быть максимально содержательно интерпретируемы.

Причем по ходу нахождения первых приемлемых решений, кроме появления факультативных пожеланий (например: обосновать, что решение, полученное нашим способом, не хуже, чем другими методами), перечисленная выше триада пожеланий только ужесточалась, то есть заказчик входил во вкус, но мыслил всегда в рамках указанной триады, даже если не имел опыта использования результатов машинного обучения (МО) в научной деятельности или их практическом применении. Кстати, такой подход к оценке РП упрощает разработчику модели сравнение своего РП с РП, полученными другими методами, так как большинству заказчиков не важно, каким методом получено РП, а важно, насколько оно соответствует его пожеланиям.

Естественно, что примерно с такой же триадой пожеланий сталкивается любой специалист по анализу данных, и именно поэтому каждый из пунктов активно обсуждается в различных печатных и электронных публикациях. Например, существует достаточно большое количество формализованных критериев оценки качества классификаторов [1, 2]. Необходимость минимизации числа признаков достаточно хорошо обосновывается различными специалистами по МО [3–6]. При этом все большее внимание уделяется интерпретируемости решений [14, 15].

Авторский подход к решению задач классификации на основе моделей математического программирования сложился из взаимодействия с практическими специалистами и с учетом их пожеланий. Данный подход подробно обоснован в [7] и уже многие годы применяется на практике. Отметим, что по отдельным задачам аналогичные точки зрения высказывались другими авторами. Конечно, первым, кто использовал такой подход, был В. Н. Вапник [8]. Его метод опорных векторов (SVM) является, по сути, задачей квадратичного программирования, и решение получается на основе теоремы Куна – Такера. Аналогичный подход развивался в работах П. Брэдли, О. Магдасарян, К. Беннет [12, 13]. Однако в их работах не рассматривались вопросы целенаправленного выполнения пунктов триады, а просто показывалась возможность использования такого подхода к решению задач МО. Крупный российский специалист в области МО К. В. Воронцов [5] отмечал, что для решения задачи минимизации числа признаков может быть использовано квадратичное программирование, но практического применения такого подхода найти не удалось.

В основе авторского метода лежит комитетный подход к решению задач классификации. Наиболее полное развитие данный подход получил в научных школах Ю. И. Журавлева и В. Д. Мазурова [9], в которых развивались теоретические основы метода комитетов и оригинальные алгоритмы для решения таких задач. Авторский подход принципиально отличается от перечисленных выше тем тем, что он сводит задачи классификации к моделям линейного программирования с частично целочисленными переменными (mix integer programming – MIP) и использует для их решения стандартные пакеты программ IBM ILOG CPLEX, PULP или MIP, которые за приемлемое время позволяют решать такие задачи достаточно большой размерности (более 10 000 ограничений и переменных). Сведение задач классификации к MIP и использование стандартных пакетов для их решения позволяет учитывать пожелания заказчика в рамках моделей и решать задачи без написания специальных программ. Поэтому чтобы продемонстрировать сказанное, перейдем к конкретным моделям.

**Базовая модель для построения РП.** Для решения многих задач классификации удобно использовать линейные классификаторы и ансамбли (комитеты) на их основе. Конечно, для разделения можно использовать и нелинейные, желательно сепарабельные функции. Их использование просто приведет к переходу в пространство признаков более высокой размерности, в котором разделение будет все равно осуществляться линейными гиперплоскостями [7, с 83]. Поэтому далее возможность нелинейности разделяющих функций отдельно оговаривать не будем.

Набор классификаторов будем называть комитетом, если РП на его основе правильно позволяет классифицировать объекты обучающей выборки с заданной точностью. Комитеты могут иметь различную логику принятия решения, поэтому существуют комитеты старшинства, большинства и единогласия. Все указанные комитеты могут быть представлены как задачи линейного программирования с частично целочисленными переменными.

Далее будем использовать следующую систему обозначений:

где  $J_1$  и  $J_2$  – разделяемые множества;

$J$  – множество наблюдений  $J = J_1 \cup J_2$ ;

$I$  – множество параметров наблюдений;

$T$  – множество гиперплоскостей (члены комитета);

$i, j, t$  – индексы соответствующих множеств;

$X_{ij}$  – входные параметры наблюдений (константы);

$a_i^t$  – коэффициенты гиперплоскостей (переменные);

$b^t$  – свободные члены гиперплоскостей (переменные);

$L$  – очень большое число;

$E$  – малое число, используемое для строгости ограничений;

$z_j^t$  – булевы переменные, используемые для фиксации нарушений условий разделения множеств;

$V^t$  – веса членов комитета (константы).

Условия разграничения множеств гиперплоскостями могут быть записаны следующим образом:

$$\sum_{i \in I} X_{ij} * a_i^t + b^t + L * z_j^t \geq E \quad j \in J_1, \quad t \in T, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} * a_i^t + b^t - L * z_j^t \leq -E \quad j \in J_2, \quad t \in T. \quad (2)$$

В практических задачах обычно не требуется построение комитета со 100% разделяющей способностью. Более того, слишком высокая точность РП обычно свидетельствует о переобученности. Поэтому сразу в записи условий комитета предусматриваем возможность их корректировки и использования различных критериев для оптимизации числа корректировок условий комитета. Вся совокупность комитетных конструкций в наиболее общем виде может быть представлена следующими условиями:

$$\sum_{t \in T} V^t * z_j^t \leq m + \left( \sum_{t \in T} V^t \right) * d_j \quad j \in J_1, \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} V^t * z_j^t \leq \sum_{t \in T} V^t - m - 1 + \left( \sum_{t \in T} V^t \right) * d_j \quad j \in J_2. \quad (4)$$

$$\text{Целевая функция: } \min \sum_{j \in J} d_j, \quad (5)$$

где  $m$  – квалифицированное меньшинство (переменная  $0 \leq m \leq \sum_{t \in T} V^t - 1$ );  $d_j$  – булевы переменные, фиксирующие нарушения условий комитета.

Обратим внимание на то, что:

1. При  $V^t=2^{t-1} \forall t \in T$  модель является комитетом старшинства, но:
  - если в результате решения  $m = 0$ , то модель де факто превращается в комитет единогласия относительно множества  $J_1$ ;
  - если в результате решения  $m = \sum_{t \in T} V^t - 1$ , то модель де факто превращается в комитет единогласия относительно множества  $J_2$ .
2. При  $V^t=1 \forall t \in T$  обладает следующими свойствами:
  - если в результате решения  $m=0$ , то модель де факто превращается в комитет единогласия относительно множества  $J_1$ ;
  - если в результате решения  $m=n-1$ , то модель де факто превращается в комитет единогласия относительно множества  $J_2$ ;
  - если в результате решения  $0 < m < n-1$ , то модель является комитетом большинства.

Таким образом, можно сказать, что модель способна сама выбирать логику комитета в зависимости от взаимной геометрии множеств и может быть преобразована в любую комитетную конструкцию.

Данная модель была протестирована при решении проблем прогнозирования туберкулезных изменений [5], качества агломерата в металлургии [8].

**Настройка модели.** Существует достаточно большое количество формализованных показателей качества классификаторов. В научной литературе встречаются разные цифры их количества. В монографии [7] авторами было приведено 15 наиболее часто встречающихся. В общем случае выбор критерия качества РП зависит от специфики конкретной задачи. На практике критерий качества РП обычно формулируют в виде нижних границ вероятности правильного определения по каждому классу. В научной литературе этот показатель имеет разные названия: True Positive Rate (TPR), Recall, Sensitivity, Probability of detection. Отметим, что в различного рода конкурсах по МО тоже все чаще используется данный показатель. Например, в конкурсе «Цифровой прорыв» используется средний Recall по 2 классифицируемым множествам. Зачастую заказчики хотят максимизации площади под ROC-кривой (AUC) или коэффициента Джини (Gini coefficient), который вычисляется на основе ROC (не путать его с критерием Джини в методе деревьев). По нашему мнению, модель для построения РП должна быть достаточно гибкой и иметь возможность быстро перестраиваться на любой критерий качества и пожелания заказчика, так как они обычно вытекают из его опыта и практического смысла.

Если решать задачу классификации программами из различного рода стандартных библиотек, то оценка качества решения будет получена после получения решения, то есть постфактум. Это не всегда удобно. Если же для построения РП будет использоваться модель (1)–(5), то изменением целевой функции легко можно управлять качеством решения. Вообще, практически все показатели качества РП для классификации строятся на основе матрицы ошибок. Данная матрица может быть легко заполнена на основе модели (1)–(5). Для дальнейших пояснений воспользуемся стандартной системой обозначений.

Пусть класс Positive состоит из P объектов, а класс Negative – из N объектов. В модели (1)–(4) будем считать, что  $J_1$  – множество Positive и  $J_2$  – множество Negative. Тогда матрица ошибок классификации выглядит следующим образом:

Таблица – Матрица ошибок классификации

	Оценка классификатора Positive	Оценка классификатора Negative	Итого реальных объектов в классе
Реальный класс Positive	True Positive (TP) $P - \sum_{j \in J_1} d_j$	False Negative (FN) $\sum_{j \in J_1} d_j$	TP+FN (P)
Реальный класс Negative	False Positive (FP) $\sum_{j \in J_2} d_j$	True Negative (TN) $N - \sum_{j \in J_2} d_j$	FP+TN (N)

Одним из требований к модели может выступать максимизация доли правильных классификаций в общем количестве наблюдений. Данную метрику по-русски лучше всего так и называть – правильность или использовать английское обозначение Accuracy, потому что если ее называть точность, то возникнет путаница в названиях, так как есть метрика Precision:

$$Accuracy = \frac{\text{сумма правильных классификаций}}{\text{общее число классифицируемых объектов}} = \frac{TP + TN}{P + N} \tag{6}$$

Сформулируем данную метрику в терминах модели (1)–(4). Так как знаменатель – константа, то его можно не рассматривать и необходимо максимизировать числитель:

$$TP + TN = P - \sum_{j \in J_1} d_j + N - \sum_{j \in J_2} d_j \tag{7}$$

Очевидно, что метрика Accuracy соответствует критерию (5). Недостаток данной метрики состоит в том, что в случае сильной несбалансированности классов можно просто всегда предсказывать только класс со значительно большим количеством объектов и иметь хороший показатель Accuracy. Аналогичным недостатком обладает и показатель Recall, если он применяется к отдельному классу, как, впрочем, и все остальные показатели, в знаменателе которых стоят константы (FPR, TNR, FNR).

Средний Recall в значительной мере лишен этого недостатка, поэтому сгенерируем целевую функцию, при которой средний Recall по двум классифицируемым множествам будет максимальным. Обозначим коэффициенты Recall как  $R_1$  и  $R_2$ . Очевидно, что в таком случае:

$$R_1 = \frac{P - \sum_{j \in J_1} d_j}{P} \text{ и } R_2 = \frac{N - \sum_{j \in J_2} d_j}{N} \rightarrow \frac{R_1 + R_2}{2} = 1 - \frac{N * \sum_{j \in J_1} d_j + P * \sum_{j \in J_2} d_j}{2 * P * N}.$$

Таким образом, заменим целевую функцию (5) на:

$$\min (N * \sum_{j \in J_1} d_j + P * \sum_{j \in J_2} d_j). \quad (8)$$

Вообще метрики, используемые для оценки качества классификаторов, можно разбить на 2 большие группы:

1. Вычисляемые только на основе матрицы ошибок.
2. Вычисляемые на основе метрик первой группы.

Из часто встречающихся метрик первой группы максимизация Jaccard index тоже сводится к критерию (5). Некоторые сложности может вызвать максимизация Precision, так как в результате простых преобразований можно сделать вывод, что это эквивалентно критерию:  $\min \frac{\sum_{j \in J_2} d_j}{\sum_{j \in J_1} d_j}$ , и, хотя возможности пакета IBM ILOC CPLEX позволяют решать такие задачи, делать этого не следует, так как максимизация Precision тоже сводится к критерию (5).

Из метрик второй группы наиболее часто встречающимися являются AUC и коэффициент Джини. В монографии [7] авторами уже было показано, что их максимизация сводится к критерию (6). В несколько арифметических действий можно доказать, что максимум индекса Юдента тоже сводится к этому критерию.

Все множество метрик не сводится только к критериям (5) или (6). На практике есть более простой и эффективный способ достигать желаемого качества или убеждаться в его недостижимости. Да и не всегда пожелания заказчика можно сразу формализовать конкретной метрикой, потому что сам заказчик в начале исследований либо не может четко сформулировать целевые показатели, либо формулирует что-то нереальное. Поэтому хорошее решение обычно получается в результате постоянного диалога и многих вычислений для учета пожеланий заказчика. Приведем конкретный пример из практики.

При малых туберкулезных изменениях у пациента нет ярко выраженных признаков, свидетельствующих о том, что заболевание перешло в активную форму [15]. Среди пациентов с подозрениями на туберкулез примерно у 20–25 % его в действительности нет. Процедура лечения длительная, дорогостоящая, а главное – тяжело переносимая всеми пациентами, и особенно детьми. Поэтому подход лечить всех при малейшем подозрении не подходит. С другой стороны, невыявление действительно больного гораздо опасней для общества, чем назначение лечения здоровому. Для решения этой задачи использовался следующий прием: система ограничений (1)–(4) дополнялась одним из условий:

$$\min \sum_{j \in J_2} d_j \text{ при ограничении } \sum_{j \in J_1} d_j \leq \beta_1, \quad (9)$$

$$\min \sum_{j \in J_1} d_j \text{ при ограничении } \sum_{j \in J_2} d_j \leq \beta_2, \quad (10)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – верхние границы суммы нарушений условий комитета для соответствующих множеств (задавались заказчиком).

**Минимизация числа признаков.** Существуют различные методы анализа информативности признаков. Обычно их разделяют на 3 большие группы: оберточные, фильтровочные и встроенные в модели [4]. Конечно, в работе с практическими задачами используются все группы, но в данной статье акцент будет сделан на методе, который относится к встроенным в модель. Будем считать, что предварительная обработка данных проведена и сильно некачественные признаки (дублирующие, мультиколлинеарные, малодисперсные и т.п.) уже удалены. Далее задача решается в 3 этапа:

1. На основе модели (1)–(4) с различными целевыми функциями (5), (8)–(10) добиваемся максимально возможного выполнения критериев качества РП, сформулированных заказчиком исследования, и фиксируем их в модели в виде дополнительных ограничений к системе (1)–(4). Например, просто дополняем систему ограничений ограничениями на сумму нарушений условий комитета для каждого множества:

$$\sum_{j \in J_1} d_j \leq \beta_1, \tag{11}$$

$$\sum_{j \in J_2} d_j \leq \beta_2. \tag{12}$$

2. Дополняем модель новыми переменными, ограничениями и целевой функцией:

$$-L * w_i \leq a_i^t \leq L * w_i \quad i \in I \quad t \in T, \tag{13}$$

$$\min \sum_{i \in I} w_i, \tag{14}$$

где  $w_i$  – булева переменная ( $w_i = 1$  – признак информативен,  $w_i = 0$  – признак неинформативен).

3. Решаем задачу МПР на основе модели (1)–(4), (11)–(14).

Данный подход был протестирован при решении практических задач. Приведем результаты некоторых из них:

1. Определение активности специфического воспаления при минимальных туберкулезных изменениях у детей и подростков. Из 48 признаков выбрано 7 наиболее информативных [10]. Результаты запатентованы.

2. Подбор технологических параметров для получения агломерата с высокими потребительскими свойствами. Из 320 признаков выбрано 43 наиболее информативных [11].

**Интерпретация полученных результатов.** К сожалению, развитие ИИ движется в сторону неинтерпретируемых методов, и это вызывает серьезную озабоченность как в научном сообществе, так и у практиков [14, 15]. В рамках раздела небольшой статьи сложно рассмотреть различные аспекты данного вопроса. Поэтому начнем с простого замечания, что окончательную интерпретацию решения должен давать специалист в конкретной предметной области. Задача специалиста по анализу данных – создать для этого хорошую базу, обязательной составляющей которой должно быть высокое качество РП при минимальном количестве признаков.

Причем если есть наборы, одинаковые по числу признаков и качеству РП, но разные по составу признаков, то на рассмотрение должны быть представлены все такие наборы. Например, в результате решения задачи определения активности специфического воспаления при минимальных туберкулезных изменениях у детей и подростков были получены два РП из 7 признаков, которые совпадали по 6 признакам и отличались по 1-му. В одном РП информативным признаком было содержание в крови лейкоцитов, в другом – тромбоцитов. Специалистом был сделан содержательный выбор в пользу лейкоцитов и дана содержательная интерпретация каждому признаку [10]. Аналогичные ситуации возникали при решении всех вышеуказанных задач. Более того, на наш взгляд, необходимо сознательно искать и предоставлять практическому специалисту набор вариантов, близких по качеству и количеству признаков, но отличающихся по составу признаков.

Еще одним достоинством нашего подхода является его четкая геометрическая интерпретация РП в пространстве признаков. Человек не может видеть в многомерном пространстве, но может его мысленно представлять. Приведем геометрические интерпретации комитетных конструкций в 2-мерном пространстве и дадим к ним пояснения. На всех рисунках комитеты построены относительно «синих» точек, стрелками указано направление голосования.

Комитет единогласия – это всегда некоторая выпуклая область, окруженная точками другого множества, как показано на рисунке 1.

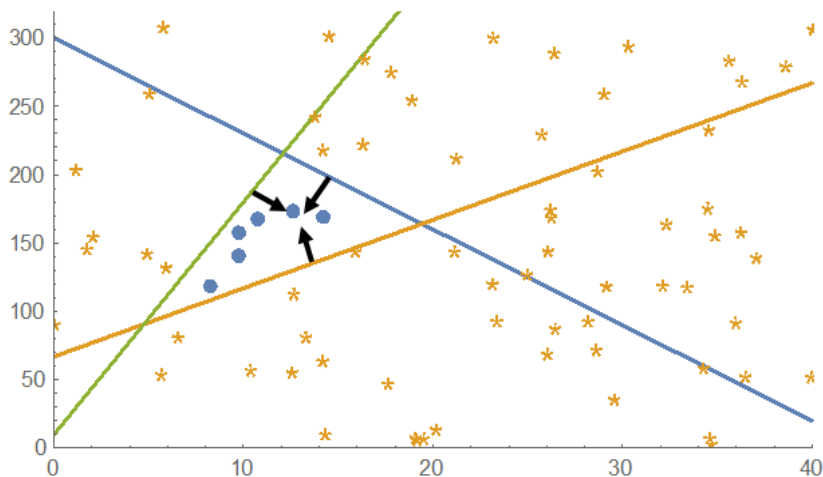


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация комитета единогласия в 2-мерном пространстве



В случае комитета старшинства выпуклых областей несколько, как на рисунке 2.

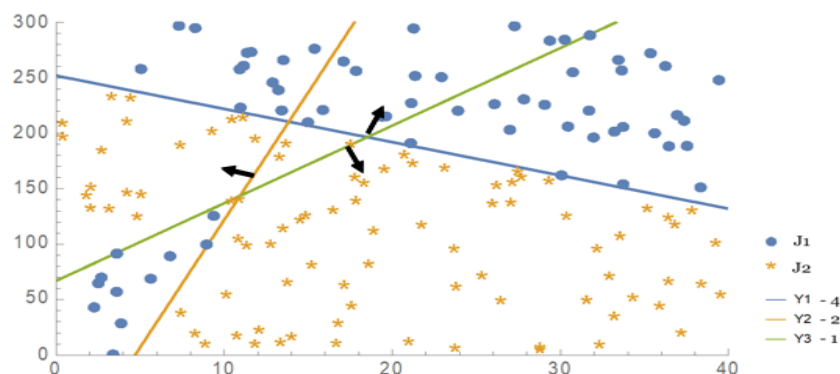


Рисунок 2 – Геометрическая интерпретация комитета старшинства в 2-мерном пространстве

В случае комитета большинства, тоже несколько выпуклых областей, но для интерпретации обычно удобней оперировать кусочно-линейной разделяющей поверхностью. Геометрические интерпретации очень удобны для практических специалистов, так как позволяют им представить структуру множеств, и они достаточно быстро осваивают этот инструментарий вне зависимости от размерности пространства. Например, при решении задачи подбора технологических параметров для получения высококачественного агломерата были локализованы две достаточно удаленные друг от друга выпуклые области. Заказчики тут же сообразили и потребовали указать центры этих областей в качестве некоторых эталонных состояний, по одной области достаточно быстро дали содержательную интерпретацию признаков [11], по другой – сказали, что задумались, почему это происходит, и нужно собрать дополнительные данные.

**Выводы.** Предлагаемый авторами подход обладает следующими достоинствами:

1. Позволяет достигать качественных характеристик РП, сформулированных заказчиком, если это возможно, и предлагает оптимальную коррекцию пожеланий в противном случае.
2. Минимизировать число признаков, необходимых для выполнения 1-го пункта.
3. Давать геометрическую интерпретацию найденных решений, на основе которой практические специалисты могут переходить к содержательной интерпретации.
4. Математические модели достаточно простые, хорошо воспринимаются практическими специалистами, не требуют знания методов МП и навыков программирования на языках высокого уровня.

Считается, что задачи МРП долго решаются, так как они относятся к NP-полным задачам. Конечно, алгоритм с полиномиальной сходимостью для решения NP-полных задач до сих пор не найден, но из этого не следует, что не надо решать задачи МРП. С момента появления пакета MPSX-360, а это начало 80-х прошлого века, задачи МРП большой размерности успешно решаются современными пакетами. При этом, несмотря на то, что время счета задач с сотнями переменных и десятками тысяч наблюдений может составлять несколько часов, можно получить качественное решение.

#### Библиографический список

1. Брюс, П. Практическая статистика для специалистов Data Science / П. Брюс, Э. Брюс, П. Гедек. – Санкт-Петербург : БХП-Петербург, 2021. – 352 с.
2. Дудченко, П. В. Метрики оценки классификаторов в задачах медицинской диагностики / П. В. Дудченко. – Томск : Изд-во ТПУ, 2019. – С. 164–165.
3. Дятченко, Д. Отбор признаков в машинном обучении. – Режим доступа: <https://tproger.ru/translations/feature-engineering-in-machine-learning/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.12.2022).
4. Бурнаков, А. Методические заметки об отборе информативных признаков (feature selection) / А. Бурнаков. – Режим доступа: <https://habr.com/en/company/aligntechnology/blog/303750/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.12.2022).
5. Воронцов, К. В. Лекции по методам оценивания и выбора моделей / К. В. Воронцов. – Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/2d/Voron-Ml-Modeling.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.12.2022)
6. Федин, Ф. О. Анализ данных / Ф. О. Федин. – Москва : Московский городской педагогический университет, 2012. – 204 с.
7. Чернавин, П. Ф. Машинное обучение на основе задач математического программирования / П. Ф. Чернавин, Д. Н. Гайнанов, В. Н. Панкрасченко, Ф. П. Чернавин, Н. П. Чернавин. – Москва : Наука, 2021. – 128 с.
8. Вапник, В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В. Н. Вапник. – Москва : Наука, 1979. – 447 с.



9. Мазуров, В. Д. Экзистенциальные вопросы комитетных конструкций / В. Д. Мазуров, Е. Ю. Полякова // Часть II. Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 114–120.
10. Тюлькова, Т. Е. Практическое применение методов машинного обучения на примере определения активности туберкулезного процесса у лиц с минимальными туберкулезными изменениями, выявленными на рентгенограмме органов грудной клетки / Т. Е. Тюлькова, П. Ф. Чернавин, Н. П. Чернавин // Клинический вестник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. – 2022. – № 2. – С. 64–73.
11. Чернавин, П. Ф. Имитационная модель подбора технологических параметров для получения агломерата с высокими потребительскими свойствами на основе метода комитетов / П. Ф. Чернавин, А. Ф. Малыгин, Т. В. Деткова, В. Ю. Кучин // Черные металлы. – 2022. – № 3. – С. 10–14.
12. Bennett, K. Linear Programming Boosting via Column Generation / K. Bennett, A. Demiriz, J. Taylor // Proceedings of Seventeenth Conference on Machine Learning. – 2000. – P. 65–72.
13. Bradley, P. Mathematical Programming for Data Mining Formulation and Challenges / P. Bradley, U. Fayyad, O. Mangasarian // Journal on Computing. – 1999. – № 11. – P. 217–238.
14. Miller, T. Explanation in Artificial Intelligence Insights from the Social Science / T. Miller // Artificial Intelligence. – 2019. – Vol. 267. – P. 1–38.
15. Roscher, R. Explainable Machine Learning for Scientific Insights and Discoveries / R. Roscher, B. Bohn, M. Duarte // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 42200–42216.

### References

1. Bryus, P., Bryus, E., Gedek, P. *Prakticheskaya statistika dlya spetsialistov Data Science* [Practical statistics for specialists Data Science]. Saint Petersburg, BHP-Petersburg, 2021. 352 p.
2. Dudchenko, P. V. *Metriki otsenki klassifikatorov v zadachakh meditsinskoj diagnostiki* [Evaluation metrics for classifiers in medical diagnostic problems]. Tomsk, TPU Publishing House, 2019, pp. 164–165.
3. Dyatchetko, D. *Otbor priznakov v mashinnom obuchenii* [Selection of characteristics in machine learning]. Available at: <https://tproger.ru/translations/feature-engineering-in-machine-learning/> (accessed 01.12.2022).
4. Burnakov, A. *Metodicheskiye zametki ob otbore informativnykh priznakov (feature selection)* [Methodological notes on the selection of informative features. (feature selection)]. Available at: <https://habr.com/en/company/aligntechnology/blog/303750/> (accessed 01.12.2022).
5. Vorontsov, K. V. *Leksii po metodam otsenivaniya i vybora modeley* [Lectures on estimation methods and model selection]. Available at: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/2d/Voron-MI-Modeling.pdf> (accessed 01.12.2022).
6. Fedin, F. O. *Analiz dannykh* [Data analysis]. Moscow: Moscow City Pedagogical University, 2012, 204 p.
7. Vapnik, V. N. *Vosstanovlenie zavisimostey po empiricheskim dannym* [Recovery of dependences on empirical data]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 447 p.
8. Chernavin, P. F., Gaynanov, D. N., Pankrashchenko, V. N., Chernavin, F. P., Chernavin, N. P. *Mashinnoe obuchenie na osnove zadach matematicheskogo programmirovaniya* [Machine learning based on mathematical programming problems]. Moscow, Nauka Publ., 2021. 128 p.
9. Mazurov, V. D., Polyakova, E. Yu. Ekzistentsialnye voprosy komitetnykh konstruksiy [Existential questions of committee constructions]. *Chast II. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Part II. Bulletin of the South Ural State University], 2019, vol. 19, no. 1, p. 114–120.
10. Tyulkova, T. E., Chernavin, P. F., Chernavin, N. P. Prakticheskoe primeneniye metodov mashinnogo obucheniya na primere opredeleniya aktivnosti tuberkuleznogo protsessu u lits s minimalnymi tuberkuleznymi izmeneniyami, vyyavlennymi na rentgenogramme organov grudnoy kletki [Practical application of machine learning methods on the example of determining the activity of the tuberculous process in individuals with minimal tuberculous changes detected on chest X-ray]. *Klinicheskii vestnik FMBC imeni A. I. Burnazyana* [Clinical Bulletin of the FMBC named after A. I. Burnazyana], 2022, no. 2, pp. 64–73.
11. Chernavin, P. F., Malygin, A. F., Detkova, T. V., Kuchin, V. Yu. Imitatsionnaya model podbora tekhnologicheskikh parametrov dlya polucheniya aglomerata s vysokimi potrebitelskimi svoystvami na osnove metoda komitetov [Simulation model for selecting technological parameters for obtaining sinter with high consumer properties based on the committee method]. *Chernye metally* [Black metals], no. 3, 2022, pp. 10–14.
12. Bennett, K., Demiriz, A., Taylor, J. Linear Programming Boosting via Column Generation. *Proceedings of Seventeenth Conference on Machine Learning*, 2000, pp. 65–72.
13. Bradley, P., Fayyad, U., Mangasarian, O. Mathematical Programming for Data Mining Formulation and Challenges. *Journal on Computing*, 1999, no. 11, pp. 217–238.
14. Miller, T. Explanation in Artificial Intelligence Insights from the Social Science. *Artificial Intelligence*, 2019, vol. 267, pp. 1–38.
15. Roscher, R., Bohn, B., Duarte, M. Explainable Machine Learning for Scientific Insights and Discoveries. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 42200–42216.

DOI 10.54398/20741707\_2023\_1\_120

УДК 519.87

**УКРУПНЕННАЯ ПОЛУМАРКОВСКАЯ И СКРЫТАЯ МАРКОВСКАЯ МОДЕЛИ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ ОТ ПОДСИСТЕМ<sup>1</sup>**

*Статья поступила в редакцию 16.12.2022, в окончательном варианте – 19.12.2022.*

**Обжерин Юрий Евгеньевич**, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1180-1084, e-mail: objsev@mail.ru

**Сидоров Станислав Михайлович**, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,

кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-9785-9182, e-mail: xaevec@mail.ru

**Никитин Михаил Михайлович**, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,

старший преподаватель, ORCID: 0000-0001-7411-0737, e-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

**Федоренко Сергей Николаевич**, Севастопольский государственный университет, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,

старший преподаватель, ORCID: 0000-0003-3080-7668, e-mail: sergey.fedor@mail.ru

Современные технические системы характеризуются большим числом элементов и сложностью функционирования. Зачастую во время функционирования таких систем отсутствует возможность получения полной информации о смене состояний конкретного элемента в отдельности. Следует отметить, что группы элементов, объединенные в подсистемы, наблюдать значительно легче. В данном исследовании предлагается к рассмотрению скрытая марковская модель суперпозиции независимых процессов восстановления, разработанная на основе сигналов, получаемых от группы элементов (подсистемы) построенной укрупненной полумарковской модели. В этом случае состояния укрупненной полумарковской модели считаются скрытыми (ненаблюдаемыми). Решение задачи выполнено с использованием методов математического моделирования, теории полумарковских процессов и скрытых марковских моделей. Элементом научной новизны является сама разработанная скрытая марковская модель на основе укрупненной модели суперпозиции независимых процессов восстановления, расширяющая возможности математического моделирования технических систем. Разработанная модель объединяет в себе преимущества теории полумарковских процессов с фазовым пространством состояний общего вида и теории скрытых марковских моделей для оценки функционирования технических систем. Сначала в работе, применяя стационарное фазовое укрупнение, строится укрупненная полумарковская модель суперпозиции независимых процессов восстановления. Затем, используя полученные результаты, определяются параметры скрытой марковской модели. По заданному вектору сигналов от подсистем определяются наиболее вероятные состояния, соответствующие ему, прогнозируются последующие состояния элементов моделируемой системы и сигналы от подсистем. Представленное решение рассматриваемых задач программно реализовано в Maple 19 и может быть использовано для моделирования технических систем различного назначения.

**Ключевые слова:** техническая система, полумарковская модель, подсистема элементов, скрытая марковская модель, суперпозиция процессов восстановления, укрупненная полумарковская модель, вектор сигналов, анализ динамики, прогнозирование

**MERGED SEMI-MARKOV AND HIDDEN MARKOV MODELS  
OF A TECHNICAL SYSTEM BASED ON SIGNALS FROM SUBSYSTEMS**

*The article was received by the editorial board on 16.12.2022, in the final version – 19.12.2022.*

**Obzherin Yuriy E.**, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1180-1084, e-mail: objsev@mail.ru

**Sidorov Stanislav M.**, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0002-9785-9182, e-mail: xaevec@mail.ru

**Nikitin Mikhail M.**, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation,

Senior Lecturer, ORCID: 0000-0001-7411-0737, e-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

**Fedorenko Sergey N.**, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation,

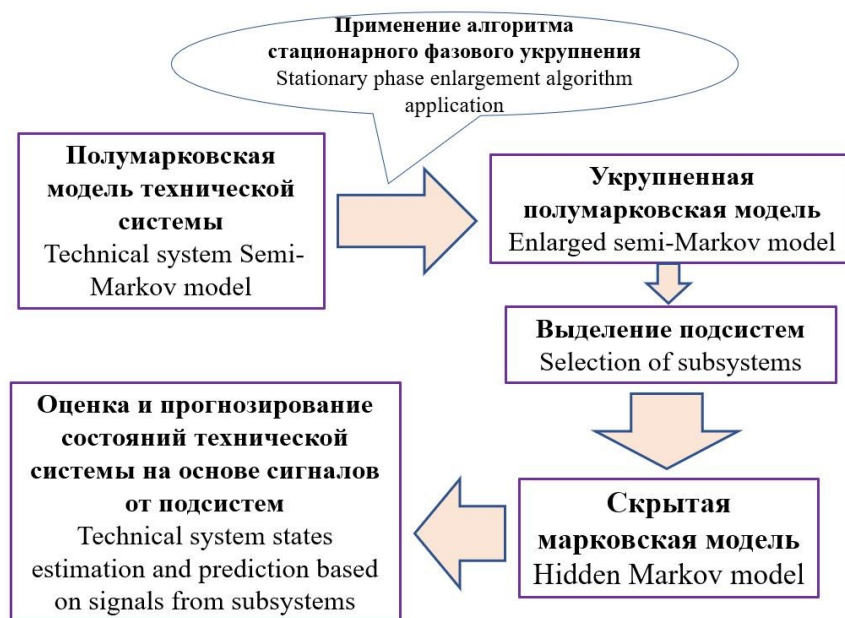
Senior Lecturer, ORCID: 0000-0003-3080-7668, e-mail: sergey.fedor@mail.ru

<sup>1</sup>Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-329.2022.4.

A large number of elements and complexity of functioning are characteristics of modern technical systems. Often, during the operation of such systems, it is not possible to obtain complete information about the change of states of a particular element separately. It should be noted that groups of elements combined into subsystems are much easier to observe. Consequently, obtaining a signal (information) in which of the subsystems of the unified system a state change has occurred is an urgent task. In this study, a hidden Markov model of the superposition of independent recovery processes is proposed for consideration, developed on the basis of signals received from a group of elements (subsystem) of the constructed enlarged semi-Markov model. In this case, the states of the enlarged semi-Markov model are hidden (unobservable). The problem solved, using mathematical modeling methods of theory of semi-Markov processes and hidden Markov models. The developed hidden Markov model based on the enlarged independent recovery processes superposition model, which expands the possibilities of mathematical modeling of technical systems, is an element of scientific novelty. The developed model combines the advantages of the theory of semi-Markov processes with a phase space of general states and the theory of hidden Markov models for evaluating the functioning of technical systems. First in this work, using stationary phase enlargement, it constructed an enlarged semi-Markov model of the superposition of independent recovery processes. Then, using the obtained results, we determine the parameters of the hidden Markov model. According to a given vector of signals from subsystems, it determined the most probable states corresponding to it, the subsequent states of the elements of the simulated system and signals from subsystems are predicted. The presented solution of the problems under consideration implemented programmatically in Maple 19 and can be used for modeling technical systems for various purposes.

**Keywords:** technical system, semi-Markov model, subsystem of elements, hidden Markov model, superposition of recovery processes, merged semi-Markov model, vector of signals, dynamics analysis, forecasting

**Graphical annotation (Графическая аннотация)**



**Введение.** Несмотря на уровень современного развития технологий, вопросам моделирования технических систем все еще уделяется огромное внимание. Качество математического описания сложных систем растет. Однако до сих пор остаются нерешенными задачи уточнения параметров математической модели технической системы и прогнозирования ее динамики на основе получаемых от нее сигналов. Такие задачи актуальны, например, для систем, управляемых дистанционно. В них оператор получает информацию о функционировании системы через сигналы, которые могут быть ошибочны, при этом не наблюдая саму систему.

Полумарковские модели хорошо зарекомендовали себя как мощный инструмент математического описания и моделирования работы технических систем [1–7]. Они позволяют уйти от ряда ограничений марковских моделей, тем самым повышая степень адекватности моделирования.

Зачастую на практике мы заинтересованы в адекватном описании и моделировании наблюдаемых явлений, при этом ненаблюдаемые факторы нас интересуют в меньшей степени. Однако в большинстве случаев включение в модель этих ненаблюдаемых факторов позволяет получать результаты, более точно отражающие статистические свойства наблюдаемых явлений. Такими моделями являются скрытые марковские [8–10, 16, 17] и скрытые полумарковские модели [11–12, 18], получившие особую популярность в последние десятилетия.

Применение теории скрытых марковских моделей (СММ) к различным системам, для которых построены полумарковские модели [13–15], позволило:

- уточнить параметры модели в процессе функционирования системы (обучить модель);
- спрогнозировать состояния системы и сигналы на основе полученного в процессе функционирования вектора сигналов.

В монографиях [1, 2] приведена суперпозиция независимых процессов восстановления. В данной работе разрабатывается СММ суперпозиции независимых процессов восстановления на основе сигналов от подсистем. Для этого с помощью алгоритма стационарного фазового укрупнения (АФУ) [1, 2] дискретизируется пространство фазовых состояний модели. Затем на основе сигналов, получаемых от подсистем укрупненной полумарковской модели (ПММ), строится СММ. Полученная СММ технической системы на основе сигналов от подсистем решает задачи анализа динамики системы и прогнозирования ее состояний.

**Модель исходной системы.** Рассмотрим суперпозицию  $N$  независимых процессов восстановления (ПВ), построенную в [1, 2]. Система  $S$  состоит из  $N$  элементов  $\mathcal{E}_1\text{--}\mathcal{E}_N$ , функционирование каждого элемента описывается ПВ [1, 2]. Время восстановления  $\mathcal{E}_i$  – случайная величина  $\alpha_i$  с функцией распределения  $F_i(t)$  и плотностью распределения  $f_i(t)$ ,  $i = \overline{1, N}$ . Предположим, что  $\alpha_i$  независимы в совокупности и имеют конечные  $M\alpha_i$ .

В работах [1, 2] для построения ПММ системы  $S$  используется полумарковский процесс  $\xi(t)$  с общим фазовым пространством состояний (ФПС):

$$E = \{ \bar{x} : \bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N), \quad x_k \geq 0, \quad k = \overline{1, N} \}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер элемента, который восстановился;  $x_k$  – время, оставшееся до восстановления  $k$ -го элемента;  $x_i = 0$ .

Выпишем возможные переходы вложенной цепи Маркова (ВЦМ) процесса  $\xi(t)$  [1, 2]:

а)  $\bar{x} \rightarrow \bar{y}, j \neq i$  при условиях  $x_j = x = \bigwedge_{l \neq i} x_l$ ,  $y_i = t$ ,  $0 < t < \infty$ ,  $y_l = x_l - x$ ,  $l \neq i, j$  с плотностью вероятности перехода:

$$p_{\bar{x}\bar{y}}^j = f_i(x+t), \quad (2)$$

б)  $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$  при условиях  $x_j = x = \bigwedge_{l \neq i} x_l$ ,  $y_j = t$ ,  $0 < t < x_j$ ,  $y_l = x_l - x + t$ ,  $l \neq i, j$  с плотностью вероятности перехода:

$$p_{\bar{x}\bar{y}}^j = f_i(x-t), \quad (3)$$

где  $\wedge$  – знак минимума.

В [1, 2] показано, что стационарное распределение ВЦМ суперпозиции ПВ имеет вид:

$$\rho(\bar{x}) = \rho_0 \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^N \bar{F}_k(x_k), \quad i = \overline{1, N}, \quad \bar{F}_k(x) = 1 - F_k(x), \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – нормирующая константа.

**Построение укрупненной ПММ.** С целью упрощения модели системы  $S$ , построим ее укрупненную полумарковскую модель, используя АФУ. Фазовое пространство  $E$  исходной модели разобьем на  $N$  классов:

$$E_i = \{ \bar{x} : \bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N) \}, \quad i = \overline{1, N},$$

каждый из которых «склеивается» в одно состояние  $i$  укрупненной модели. ФПС  $\hat{E}$  укрупненной модели имеет вид:

$$\hat{E} = \{ \bar{1}, 1, 2, \dots, N \}. \quad (5)$$

Состояния (5) имеют следующий физический смысл:

- $\bar{1}$  – все элементы восстановлены, начальное состояние;
- $i$  – восстановился элемент с номером  $i$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Определим вероятности перехода  $\hat{p}_{kr}$  между состояниями укрупненной модели, используя формулы [1, 2]:

$$\hat{p}_{kr} = \frac{\int_{E_k} \rho(de)P(e, E_r)}{\rho(E_k)}, \quad k, r = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где  $\rho(de)$  – стационарное распределение ВЦМ;  $P(e, E_r)$  – вероятности перехода ВЦМ укрупняемой модели.

Найдем знаменатель (6), используя (4). Следовательно,

$$\rho(E_k) = \rho_0 \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^N \bar{F}_i(x_i) d\bar{x}^{(k)} = \rho_0 \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^N M\alpha_i. \quad (7)$$

1. Вероятности  $\hat{p}_{1r}$ ,  $r = \overline{1, N}$  имеют вид

$$\hat{p}_{1r} = P\left(\bigwedge_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^N \alpha_k > \alpha_r\right) = \int_0^\infty \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^N \bar{F}_k(t) f_r(t) dt. \quad (8)$$

2. Используя формулы (2)–(4), (7), определим вероятности  $\hat{p}_{kr}$  в случае  $k = \overline{1, N}$ ,  $k = \overline{1, N}$ ,  $r \neq k$ :

$$\begin{aligned} \hat{p}_{kr} &= \frac{\int_0^\infty dx_r \int_{x_r}^\infty \dots \int_{x_r}^\infty \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^N \bar{F}_i(x_i) f_k(x_r + t) d\bar{x}^{(k)} dt}{\left( \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^N M\alpha_i \right)} = \frac{\int_0^\infty \bar{F}_k(x_r) \bar{F}_r(x_r) \left( \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k, r}}^N \int_{x_r}^\infty \bar{F}_i(x_i) dx_i \right) dx_r}{\prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^N M\alpha_i} = \\ &= \frac{\int_0^\infty \bar{F}_k(t) \bar{F}_r(t) \left( \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k, r}}^N \int_t^\infty \bar{F}_i(x_i) dx_i \right) dt}{\prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^N M\alpha_i}. \end{aligned} \quad (9)$$

В случае  $r = k$

$$\hat{p}_{kk} = 1 - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq k}}^N \hat{p}_{kr}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (10)$$

Рассмотрим случай, когда все случайные величины  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  имеют экспоненциальное распределение:  $F_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$ ,  $\bar{F}_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ .

Используя формулы (8)–(10), получаем, что в этом случае

$$\begin{aligned} \hat{p}_{1r} &= \frac{\lambda_r}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad r = \overline{1, N}, \\ \hat{p}_{kr} &= \frac{\lambda_r}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{M\alpha_i}}, \quad k, r = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (11)$$

Найденные значения  $\hat{p}_{kr}$  будут использоваться при построении СММ.

**СММ укрупненной ПММ на основе сигналов от подсистем.** Предположим, что вероятности переходов ВЦМ укрупненной модели определяются формулами (11). Пусть в момент времени  $t = 0$  укрупненная модель находится в состоянии  $\bar{1}$ . Предполагается, что состояния (5) разделены на непересекающиеся подсистемы.

При функционировании системы  $S$  скрытыми являются состояния ВЦМ укрупненной модели. Наблюдается номер подсистемы, в котором произошло восстановление элемента.

Для определенности предположим, что  $N = 6$  и состояния разделены на две подсистемы  $a$  и  $b$ :

$$a = \{1, 2, 3\}, b = \{4, 5, 6\}.$$

Следовательно, множество сигналов имеет вид:

$$J = \{n, a, b\},$$

где  $n$  – сигнал, поступающий на первом шаге;  $a$  – сигнал, поступающий при восстановлении элемента из подсистемы  $a$ ;  $b$  – сигнал, поступающий при восстановлении элемента из подсистемы  $b$ .

Функция связи  $R(s | x)$  между состояниями ВЦМ укрупненной модели и сигналами [8, 10]:

$$R(s | x) = P(S_n = s | X_n = x), \quad x \in \hat{E}, \quad s \in J, \quad \sum_{s \in J} R(s | x) = 1, \quad (12)$$

где  $S_n$  –  $n$ -й сигнал.

Отметим, что  $R(s | x)$  можно задавать различным образом, например учитывая ошибку получения сигнала и т.п. В данной работе для простоты изложения сигналы выбраны без ошибок, и функция  $R(s | x)$  представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Функция  $R(s | x)$

Сигнал, $s$ \ Состояние, $x$	$\bar{1}$	1	2	3	4	5	6
$s = n$	1	0	0	0	0	0	0
$s = a$	0	1	1	1	0	0	0
$s = b$	0	0	0	0	1	1	1

**Прогноз и оценка состояний укрупненной ПММ на основе сигналов от подсистем.** Пусть  $\bar{S}^n = (S_1, S_2, \dots, S_n)$  – случайный вектор первых  $n$  сигналов. Требуется оценить характеристики ВЦМ укрупненной (скрытой) модели на основе полученного вектора сигналов  $\bar{s}_n = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , для которого  $\bar{s}_k = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ ,  $k \leq n$ . Пусть в момент времени  $t = 0$  модель находится в  $\bar{1}$ .

Будем использовать рекуррентные формулы для функций  $F_k(i)$ ,  $B_k(i)$  [8, 10]:

$$F_k(i) = R(s_k | i) \sum_j F_{k-1}(j) P_j^i, \quad F_1(i) = R(s_1 | i) p_i, \quad (13)$$

$$B_k(i) = \sum_j R(s_{k+1} | j) B_{k+1}(j) P_j^i, \quad B_{n-1}(i) = \sum_j P_j^i R(s_n | j), \quad (14)$$

где  $P_j^i$  – вероятности перехода ВЦМ укрупненной модели, определенные формулами (11);  $(p_i)$  – распределение начального состояния ВЦМ.

Перейдем к анализу динамики укрупненной ПММ на основе построенной СММ.

В качестве иллюстративного примера рассмотрим систему  $S$ :  $Ma_1 = 15,0$  ч,  $Ma_2 = 2,0$  ч,  $Ma_3 = 14,0$  ч,  $Ma_4 = 19,0$  ч,  $Ma_5 = 23,0$  ч,  $Ma_6 = 12,0$  ч.

Предположим, что в результате функционирования системы  $S$  получен следующий вектор сигналов:

$$\bar{s}_{30} = (n, a, a, b, b, b, a, b, a, a, b, a, b, a, a, a, b, b, a, b, a, b, a, a, a, b, b, a, a, a, b, b, a), \quad n = 30.$$

Найдем с учетом введенных параметров оценки характеристик состояний СММ:

1. В момент испускания 30-го сигнала требуется определить вероятности состояний скрытой модели.

На 30-м шаге укрупненная модель с вероятностью 0,10448 находилась в состоянии 1, с вероятностью 0,78358 – в состоянии 2, с вероятностью 0,11194 – в состоянии 3.

2. Найдем вероятности перехода в состояния на следующем шаге.

Вероятности перехода скрытой модели на 31-м шаге:

в состояние 1 – 0,08155; в состояние 2 – 0,61159; в состояние 3 – 0,08737;

в состояние 4 – 0,06438; в состояние 5 – 0,05318; в состояние 6 – 0,10193.

3. Определим вероятности появления сигналов на следующем шаге.

На 31-м шаге испускается сигнал  $a$  с вероятностью 0,78051, сигнал  $b$  – 0,21949.

4. Требуется определить вероятность полученного вектора сигналов  $\bar{s}_{30}$ .

Вероятность появления  $\bar{s}_{30}$  равна  $1,4639 \cdot 10^{-11}$ .

5. Для  $\bar{s}_{30}$  необходимо найти наиболее вероятные состояния СММ на переходах. В таблице 2 представлены наиболее вероятные состояния СММ на переходах.

Таблица 2– Наиболее вероятные состояния скрытой модели на переходах

<b>Переход</b>	1	7	11	17	22	26	29
<b>Состояние</b>	$\bar{1}$	2	6	2	2	2	6
<b>Вероятность</b>	1,000	0,784	0,464	0,784	0,784	0,784	0,464

Отметим, что расчет характеристик СММ выполнялся в написанной авторами программе в Maple 19.

**Заключение.** В данной статье построена СММ на основе укрупненной суперпозиции независимых ПВ. Продемонстрированы возможности применения СММ для оценки характеристик и прогнозирования состояний технических систем на основе сигналов, получаемых от подсистем. Средства теории СММ позволили для рассматриваемой системы (случай неполной или недостаточной информации о функционировании системы) прогнозировать состояния и последующие сигналы, на основе полученного в результате функционирования вектора сигналов определять наиболее вероятные последовательности состояний, соответствующие наблюдаемым сигналам.

В дальнейшем предполагается построение СММ и анализ функционирования многокомпонентных систем на основе сигналов с учетом различных факторов: восстановления, контроля, технического обслуживания, наличия резерва времени.

#### Библиографический список

1. Королук, В. С. Процессы марковского восстановления в задачах надёжности систем / В. С. Королук, А. Ф. Турбин. – Киев : Наук. думка, 1982. – 236 с.
2. Korolyuk, V. S. Stochastic Models of Systems / V. S. Korolyuk, V. V. Korolyk. – Dordrecht : Springer Science+Business Media, 1999. – 185 p.
3. Obzherin, Yu. E. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures / Yu. E. Obzherin, E. G. Boyko. – London : Elsevier Academic Press, 2015. – 212 p.
4. Grabski, F. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance / F. Grabski. – Amsterdam : Elsevier Science, 2014. – 270 p.
5. Песчанский, А. И. Полумарковские модели профилактики ненадежной одноканальной системы обслуживания с потерями / А. И. Песчанский. – Москва : ИНФРА-М, 2022. – 267 с.
6. Obzherin, Yu. E. Semi-Markov model and phase-merging scheme of a multi-component system with the group instantly replenished time reserve / Yu. E. Obzherin, S. M. Sidorov // Int. J. Reliab. Quality Safety Eng. – 2019. – Vol. 26, № 3. – Article ID 1950014.
7. Obzherin, Y. E. Reliability of the information system with intermediate storage devices / Y. E. Obzherin, S. M., Sidorov, M. M. Nikitin // CCIS. – 2018. – Vol. 919. – P. 432–444.
8. Rabiner, L. R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition // Proc. of the IEEE. – 1989. – Vol. 77, № 2. – P. 257–286.
9. Cappe', O. Inference in Hidden Markov Models / O. Cappe', E. Moulines, T. Ryde'n. – New York : Springer Science+Business Media, 2005. – 670 p.
10. Ross, S. M. Introduction to Probability Models. Ninth Edition / S. M. Ross. – USA : Elsevier Academic Press, 2006. – 800 p.
11. Van der Hoek, J. Introduction to Hidden Semi-Markov Models / J. Van der Hoek, R. Elliott. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 184 p.
12. Yu, S.-Z. Hidden Semi-Markov Models: Theory, Algorithms and Applications / S.-Z. Yu. – Elsevier Science, 2015. – 208 p.
13. Obzherin, Y. E. Hidden Markov model of information system with component-wise storage devices / Y. E. Obzherin, S. M., Sidorov, M. M. Nikitin. // Lect. Notes Comput. Sci. – 2019. – Vol. 11965. – P. 354–364.
14. Obzherin, Y. E. A Hidden Markov Model Based on Superposition of Two Restoration Processes / Y. E. Obzherin, S. M., Sidorov, M. M. Nikitin, S. G. Glech. // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82. – P. 995–1012.
15. Sidorov, S. M. Hidden Markov Model of Two-Component System with Group Instantly Replenished Time Reserve / S. M. Sidorov // Information Technologies. – 2021. – Vol. 27, № 2. – P. 64–71.
16. Gámiz, M. L. Hidden Markov Models in Reliability and Maintenance / M. L. Gámiz, N. Limnios, M. C. Segovia-García // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 304, iss. 3. – P. 1242–1255.
17. Morteza, Soleimani. Integration of Hidden Markov Modelling and Bayesian Network for fault detection and prediction of complex engineered systems / Morteza Soleimani, Felician Campean, Daniel Neagu // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 215. – Article ID 107808.
18. Yang, W. Machine condition recognition via hidden semi-Markov model / Wenhui Yang, Lu Chen // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Vol. 158. – Article ID 107430.

## References

1. Korolyuk, V. S., Turbin, A. F. *Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadjozhnosti system* [Markov Recovery Processes in Systems Reliability Problems]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1982. 236 p.
2. Korolyuk, V. S., Korolyuk, V. V. *Stochastic Models of Systems*. Dordrecht, Springer Science+Business Media, 1999. 185 p.
3. Obzherin, Yu. E., Boyko, E. G. *Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures*. London, Elsevier Academic Press, 2015. 212 p.
4. Grabski, F. *Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance*. Amsterdam: Elsevier Science, 2014. 270 p.
5. Peschanskiy, A.I. *Polumarkovskie modeli profilaktiki nenadezhnoy odnokanalnoy sistemy obsluzhivaniya s poteryami* [Semi-Markov prevention models for an unreliable single-channel queuing system with losses]. Moscow, INFRA-M Publ., 2022. 267 p.
6. Obzherin, Yu. E., Sidorov, S. M. Semi-Markov model and phase-merging scheme of a multi-component system with the group instantly replenished time reserve. *Int. J. Reliab. Quality Safety Eng*, 2019, vol. 26, no. 3, article ID 1950014.
7. Obzherin, Y. E., Sidorov, S. M., Nikitin, M. M. Reliability of the information system with intermediate storage devices. *CCIS*, 2018, vol. 919, pp. 432–444.
8. Rabiner, L. R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition. *Proc. of the IEEE*, 1989, vol. 77, no. 2, pp. 257–286.
9. Cappe', O., Moulines, E., Ryde'n, T. *Inference in Hidden Markov Models*. New York, Springer Science+Business Media, 2005. 670 p.
10. Ross, S. M. *Introduction to Probability Models*. Ninth Edition. USA, Elsevier Academic Press, 2006. 800 p.
11. Van der Hoek, J., Elliott, R. *Introduction to Hidden Semi-Markov Models*. Cambridge, Cambridge University Press, 2018. 184 p.
12. Yu, S.-Z. *Hidden Semi-Markov Models: Theory, Algorithms and Applications*. Elsevier Science, 2015. 208 p.
13. Obzherin, Y. E., Sidorov, S. M., Nikitin, M. M. Hidden Markov model of information system with component-wise storage devices. *Lect. Notes Comput. Sci*, 2019, vol. 11965, pp. 354–364.
14. Obzherin, Y. E., Sidorov, S. M., Nikitin, M. M., Glech S. G. A Hidden Markov Model Based on Superposition of Two Restoration Processes. *Automation and Remote Control*, 2021, vol. 82, pp. 995–1012.
15. Sidorov, S. M. Hidden Markov Model of Two-Component System with Group Instantly Replenished Time Reserve. *Information Technologies*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 64–71.
16. Gámiz, M. L., Limnios, N., Segovia-García, M. C. Hidden Markov models in reliability and maintenance. *European Journal of Operational Research*, 2022, vol. 304, iss. 3, pp. 1242–1255.
17. Morteza Soleimani, Felician Campean, Daniel Neagu, Integration of Hidden Markov Modelling and Bayesian Network for fault detection and prediction of complex engineered systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, vol. 215, article ID 107808.
18. Yang, W. Chen, L. Machine condition recognition via hidden semi-Markov model. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, vol. 158, article ID 107430.



DOI 10.54398/20741707\_2023\_1\_127  
УДК 004.932

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВОК НАВЕДЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НА БАЗЕ ВИДЕОКАМЕР ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Статья поступила в редакцию 10.01.2023, в окончательном варианте – 23.01.2023.*

**Волотов Евгений Михайлович**, филиал «Взлет» Московского авиационного института (национальный университет), 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры А11, ORCID: 0000-0001-6978-2379, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

**Волотова Татьяна Александровна**, Ахтубинская кадетская школа-интернат им. П.О. Сухого, 416504, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Шоссе Авиаторов, 7, учитель физики и информатики, ORCID: 0000-0001-5096-3495, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

**Митрофанов Игорь Викторович**, войсковая часть 15650, 416507, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск-7,

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-5551-7427, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

**Митрофанов Евгений Игоревич**, ЗАО «Технологический Парк Космонавтики «Линкос», 142172, Российская Федерация, г. Москва, г. Щербинка, ул. Дорожная, 5, инженер-программист, ORCID: 0000-0002-3646-1509, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

Определение истинных угловых направлений на объект наблюдения, полученных с помощью системы регистрации на базе видеокамер общего назначения, не требует учета всех поправок, которые необходимо учитывать при использовании оптических средств траекторных измерений. На первый план при обработке материалов регистрации параметров траектории движения объекта наблюдения выходят погрешности, важнейшей из которых является поправка наведения. Поэтому задача определения поправок наведения при обработке материалов системы регистрации на базе видеокамер общего назначения становится актуальной. Для решения этой задачи были использованы методы теории рядов геометрической оптики и геометрии, в результате чего был разработан метод определения поправок наведения. Для оценки достоверности разработанного метода определения поправок наведения использовались данные, полученные от штатных оптических средств траекторных измерений. Анализ абсолютной погрешности определения поправок наведения позволяет сделать вывод об адекватности разработанного метода и возможности его применения.

**Ключевые слова:** системы регистрации на базе видеокамер общего назначения, оптические средства траекторных измерений, объект наблюдения, поправка наведения

## **THE METHOD OF DETERMINING THE CORRECTION OF THE GUIDANCE IN THE PROCESSING OF MATERIALS SYSTEM OF REGISTRATION ON THE BASIS OF VIDEO CAMERAS OF GENERAL PURPOSE**

*The article was received by the editorial board on 10.01.2023, in the final version – 23.01.2023.*

**Volotov Evgenij M.**, branch «Vzlet» of Moscow Aviation Institute, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Department 11, ORCID: 0000-0001-6978-2379, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

**Volotova Tatyana A.**, Akhtubinskaya cadet boarding school named after P.O. Sukhoi, 7 Shosse Aviatorov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416504, Russian Federation

teacher of Physics and Computer Science, ORCID: 0000-0001-5096-3495, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

**Mitrofanov Igor V.**, military unit 15650, Akhtubinsk-7, Astrakhan region, 416507, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, ORCID: 0000-0001-5551-7427, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

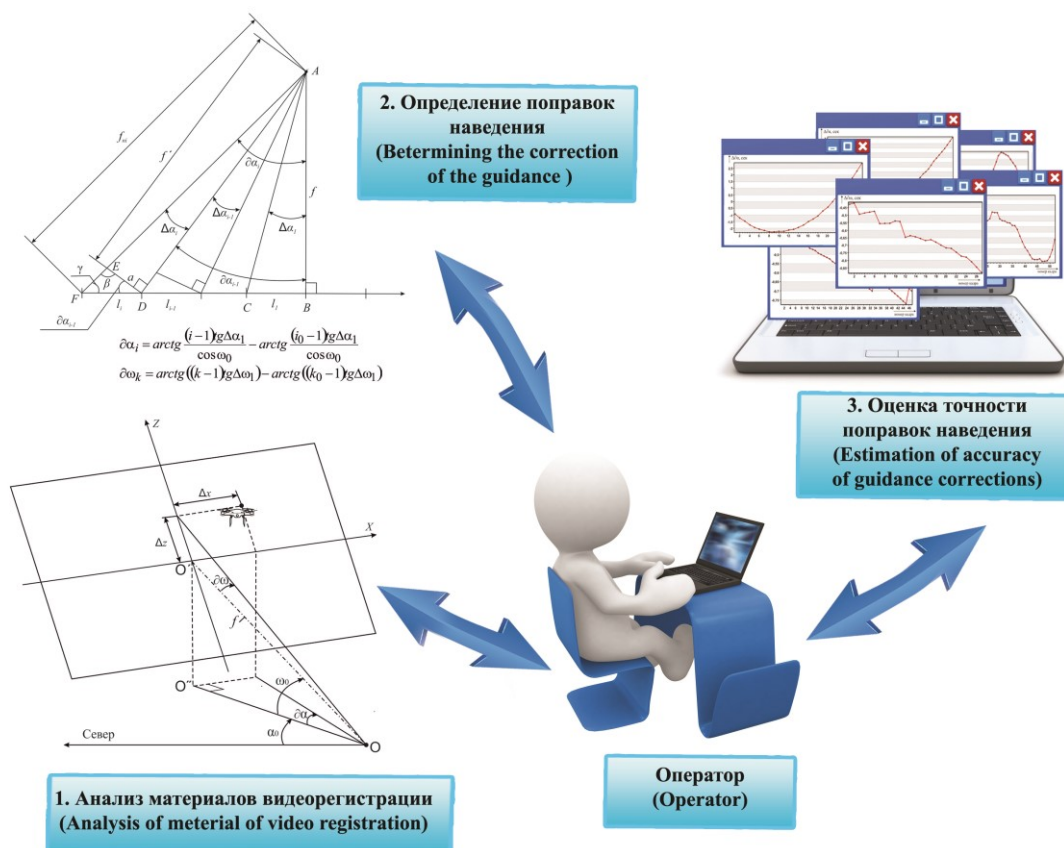
**Mitrofanov Evgenij I.**, close corporation «Technological Park of Astronautics «Linkos», 5 Dorozhnaya St., Shcherbinka, Moscow, 142172, Russian Federation, software engineer, ORCID: 0000-0002-3646-1509, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

The determination of the true angular directions to the object of observation, obtained with the help of the registration system based on General-purpose video cameras, does not require taking into account all the corrections that need to be taken into account when using optical means of trajectory measurements. The errors, the most important

of which is the correction of guidance, come to the fore in the processing of materials for registering the parameters of the trajectory of the object of observation. Therefore, the task of determining the correction of guidance in the processing of materials of the registration system on the basis of General-purpose video cameras becomes relevant. To solve this task, the methods of the theory of series of geometric optics and geometry were used, as a result of which a method for determining the correction of guidance was developed. For assessment of reliability of the developed method of definition the correction of guidance the data obtained from regular the certified means of trajectory measurements were used. The analysis of the absolute error in determining the correction of the guidance allows to conclude about the adequacy of the developed method and the possibility of its application.

**Keywords:** registration systems based on general purpose video cameras, optical means of trajectory measurements, subject of observation, correction of the guidance

#### Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Одной из главных задач при испытаниях летательных аппаратов является определение их координат с целью построения траектории движения в пространстве, а также для определения положения объектов относительно друг друга при их взаимодействии [1, 6, 9, 10, 12, 17, 20, 21, 24]. В настоящее время существуют различные технические средства и системы для решения этой задачи [13, 18, 22]. Наиболее точными из них являются оптические средства траекторных измерений, погрешность которых составляет в основном от 5 до 30 угловых секунд, в зависимости от класса измерительного средства [5]. Такая точность достигается за счет учета в процессе обработки информации оптических средств траекторных измерений различных поправок [7, 16], которые компенсируют как инструментальные погрешности самого средства измерений, так и погрешности обработки материалов измерений [2, 8, 19, 21]. К основным инструментальным погрешностям относятся поправки на ориентир, коллимационная поправка, поправка на неперпендикулярность осей вращения, поправки на горизонтирование прибора, поправки на уклонение отвесных линий, а также поправка на нагрев вилки. Учет в процессе обработки материалов измерений оптических средств траекторных измерений указанных поправок позволяет устранить из результата обработки систематическую составляющую погрешности измерений, которая является доминирующей в структуре общей погрешности измерений.

В настоящее время все более широкое применение в практике построения траектории движения в пространстве, а также определения положения объектов относительно друг друга при их взаимодействии получают системы регистрации на базе видеокамер общего назначения [3, 13].

Определение истинных угловых направлений на объект, полученных с помощью такой системы регистрации, не требует учета всех перечисленных выше поправок. Поскольку система регистрации на базе видеокамер общего назначения не является системой измерений, то в ней отсутствуют датчики, измеряющие угловые направления по азимуту и углу места, и определение и учет поправки на ориентир теряет всякий смысл. Так как видеокамеры устанавливаются в заранее намеченной точке и неподвижно направлены в определенный сектор пространства, то коллимационная поправка и поправка на неперпендикулярность осей вращения отсутствуют. Поправки на горизонтирование прибора и поправки на уклонение отвесных линий можно исключить точной установкой видеокамер. Поправка на нагрев вилки в системе регистрации отсутствует. Поэтому на первый план при оценке точности полученных с помощью системы регистрации на базе видеокамер общего назначения параметров траектории движения объекта выходят погрешности обработки материалов регистрации [11, 15, 23], важнейшей из которых является поправка наведения.

Поправки наведения на объект по азимуту  $\partial\alpha$  и углу места  $\partial\omega$  – это угловые отклонения объекта от оптической оси оптического средства (рис. 1). При использовании в качестве измерительных средств оптических средств траекторных измерений, поправки наведения определяются следующим образом [4, 14]:

$$\begin{cases} \partial\alpha = \arctg \frac{\Delta x}{f \cos \omega_0}, \\ \partial\omega = \arctg \frac{\Delta z}{f} \end{cases}$$

где  $\Delta x = x - x_0$ ,  $\Delta z = z - z_0$ ;  $x, z$  – координаты изображения на оптической матрице средства;  $x_0, z_0$  – координаты точки пересечения оптической оси с оптической матрицей;  $f$  – фокусное расстояние оптического средства;  $\omega_0$  – угол места оптической оси средства.

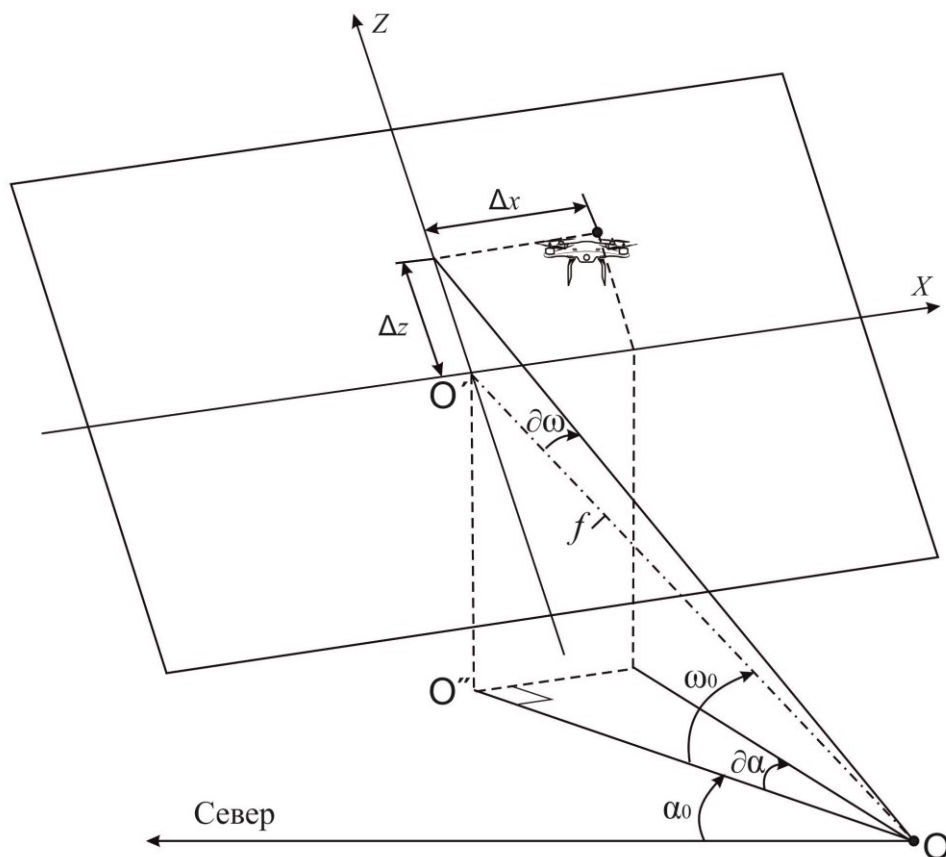


Рисунок 1 – Поправки наведения:  $OO'$  – оптическая ось,  $OO''$  – проекция оптической оси на горизонтальную плоскость,  $X, Z$  – координатные оси плоскости изображения;  $\Delta x, \Delta z$  – отклонение объекта наблюдения от центра кадра по осям  $X$  и  $Z$  соответственно;  $f$  – фокусное расстояние оптического средства;  $\omega_0$  – угол места оптической оси средства;  $\alpha_0$  – азимут оптической оси средства;  $\partial\alpha$  – поправка наведения по азимуту;  $\partial\omega$  – поправка наведения по углу места

При определении поправки наведения во время обработки материалов регистрации системы, построенной на базе видеокамер общего назначения, сделаем два допущения:

- рассматриваем случай, когда угол места оптической оси равен нулю;
- говоря о поправках наведения, не будем разделять их на поправку наведения по азимуту и поправку наведения по углу места, а будем говорить просто о поправке наведения.

В общем случае, поправку наведения при использовании видеокамер можно определить как произведение углового размера пикселя на количество пикселей:

$$\delta\alpha = i\Delta\alpha,$$

где  $i$  – количество пикселей от центра оптической матрицы до объекта;  $\Delta\alpha$  – угловой размер пикселя.

При этом угловой размер пикселя можно определить несколькими способами:

1. Зная угол поля зрения видеокамеры и размер матрицы в пикселях:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta\alpha_{пз}}{n},$$

где  $\Delta\alpha_{пз}$  – угол поля зрения;  $n$  – количество пикселей в матрице.

2. Зная размер пикселя и фокусное расстояние:

$$\Delta\alpha = \arctg \frac{l}{f},$$

где  $l$  – линейный размер пикселя матрицы;  $f$  – фокусное расстояние.

3. Зная угол между двумя объектами в пространстве и количество пикселей, необходимых для изображения расстояния между этими объектами:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta\alpha_{12}}{m},$$

где  $\Delta\alpha_{12}$  – угол между двумя объектами в пространстве;  $m$  – расстояние между объектами в пикселях.

Определим угловой размер пикселя по горизонтали каждым из описанных способов для предполагаемой видеокамеры из системы регистрации и представим полученные данные в таблице. В расчетах использовались следующие характеристики видеокамеры: матрица 12×9 мм, 1600×1200 пк, фокусные расстояния 300, 150 и 75 мм.

Таблица – Угловой размер пикселя

Фокусное расстояние, мм	Линейный размер пикселя матрицы, мм	Угол поля зрения, град.	Угловой размер пикселя		
			1 способ, с	2 способ, с	3 способ, с
300	0,0075	2,292	5,16	5,16	5,16
150	0,0075	4,581	10,31	10,31	10,32
75	0,0075	9,148	20,58	20,63	20,61

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать вывод о том, что угловой размер пикселя не является постоянной величиной. При этом, чем меньше значение фокусного расстояния, использованного для проведения измерений оптического средства траекторных измерений, тем более заметна разница в значениях углового размера пикселя, вычисленного различными способами. Это происходит потому, что каждый пиксель отклонения изображения объекта от оптической оси вносит неодинаковый вклад в итоговую поправку наведения. Поэтому при разработке методов определения поправки наведения необходимо учитывать различный угловой размер пикселей, находящихся на разных расстояниях от центра кадра.

Из рисунка 2 видно, что чем дальше пиксель находится от центра матрицы, тем меньший вклад при одинаковом линейном размере он вносит в общее угловое отклонение от оптической оси, т.е. чем больше  $i$ , тем  $\Delta\alpha_i$  меньше, чем  $\Delta\alpha_0$ .

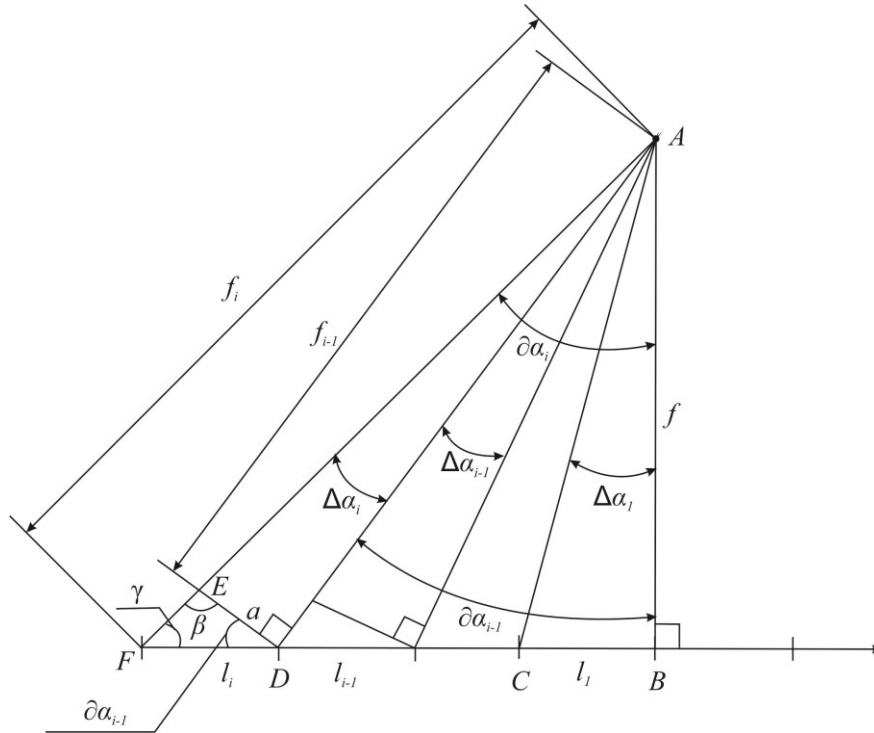


Рисунок 2 – Зависимость углового размера пикселя от расстояния от центра кадра:  $f$  – фокусное расстояние;  $f_i, f_{i-1}$  – побочное фокусное расстояние;  $l_1, l_{i-1}, l_i$  – линейный размер 1,  $i-1$ ,  $i$ -го пикселя;  $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_{i-1}, \Delta\alpha_i$  – угловой размер 1,  $i-1$ ,  $i$ -го пикселя;  $\partial\alpha_i, \partial\alpha_{i-1}$  – 1,  $i-1$  поправка наведения на объект по азимуту при изображении объекта;  $\alpha, \beta, \gamma$  – углы треугольника  $FED$

Определим зависимость  $\Delta\alpha_i$  от  $i$ .

Из треугольника  $ADE$ :

$$a = f' \operatorname{tg} \Delta\alpha_i,$$

где

$$f' = \frac{f}{\cos \partial\alpha_{i-1}},$$

таким образом:

$$a = f \frac{\operatorname{tg} \Delta\alpha_i}{\cos \partial\alpha_{i-1}}. \quad (1)$$

Рассмотрим треугольник  $FED$ .

Угол  $FED$  соответствует  $\beta$ , а угол  $EFD$  –  $\gamma$  (рис. 2):

$$\beta = 180^\circ - (90^\circ - \Delta\alpha_i) = 90^\circ + \Delta\alpha_i,$$

$$\gamma = 90^\circ - \partial\alpha_i.$$

По теореме синусов:

$$\frac{l_i}{\sin \beta} = \frac{a}{\sin \gamma}.$$

Подставляя  $\beta$  и  $\gamma$ , получаем:

$$\frac{l_i}{\sin(90^\circ + \Delta\alpha_i)} = \frac{a}{\sin(90^\circ - \partial\alpha_i)},$$

откуда

$$\frac{l_i}{\cos \Delta\alpha_i} = \frac{a}{\cos \partial\alpha_i}.$$

Так как  $\cos \partial\alpha_i = \cos(\partial\alpha_{i-1} + \Delta\alpha_i)$ , получаем:

$$\frac{a}{\cos(\partial\alpha_{i-1} + \Delta\alpha_i)} = \frac{a}{\cos\partial\alpha_{i-1} \cos\Delta\alpha_i - \sin\partial\alpha_{i-1} \sin\Delta\alpha_i}.$$

Соответственно

$$\frac{l_i}{\cos\Delta\alpha_i} = \frac{a}{\cos\partial\alpha_{i-1} \cos\Delta\alpha_i - \sin\partial\alpha_{i-1} \sin\Delta\alpha_i},$$

откуда

$$l_i = \frac{a \cos\Delta\alpha_i}{\cos\Delta\alpha_i (\cos\partial\alpha_{i-1} - \sin\partial\alpha_{i-1} \operatorname{tg}\Delta\alpha_i)} = \frac{a}{(\cos\partial\alpha_{i-1} - \sin\partial\alpha_{i-1} \operatorname{tg}\Delta\alpha_i)}. \quad (2)$$

Из треугольника  $ABC$ :

$$l_1 = f \operatorname{tg}\Delta\alpha_1. \quad (3)$$

Линейный размер пикселя на матрице одинаков, т.е.:

$$l_1 = l_{i-1} = l_i = l.$$

Подставляя (1) и (3) в (2), получим:

$$f \operatorname{tg}\Delta\alpha_1 = \frac{f \operatorname{tg}\Delta\alpha_i}{\cos\Delta\alpha_{i-1} (\cos\partial\alpha_{i-1} - \sin\partial\alpha_{i-1} \operatorname{tg}\Delta\alpha_i)},$$

$$\operatorname{tg}\Delta\alpha_i = \operatorname{tg}\Delta\alpha_1 \cos^2 \partial\alpha_{i-1} - \frac{\operatorname{tg}\Delta\alpha_1}{2} \sin(2\partial\alpha_{i-1}) \operatorname{tg}\Delta\alpha_i,$$

$$\operatorname{tg}\Delta\alpha_i \left( 1 + \frac{\operatorname{tg}\Delta\alpha_1}{2} \sin(2\partial\alpha_{i-1}) \right) = \operatorname{tg}\Delta\alpha_1 \cos^2 \partial\alpha_{i-1},$$

$$\frac{\operatorname{tg}\Delta\alpha_i}{\operatorname{tg}\Delta\alpha_1} = \frac{\cos^2 \partial\alpha_{i-1}}{1 + \frac{l}{2f} \sin(2\partial\alpha_{i-1})},$$

$$\operatorname{tg}\Delta\alpha_i = \operatorname{tg}\Delta\alpha_1 \frac{\cos^2 \partial\alpha_{i-1}}{1 + \frac{l}{2f} \sin(2\partial\alpha_{i-1})}. \quad (4)$$

Проанализируем формулу (4). Рассмотрим выражение:

$$\frac{l}{2f} \sin(2\partial\alpha_{i-1}). \quad (5)$$

Свое максимальное значение оно принимает при максимальных  $l$  и  $\partial\alpha_{i-1}$  и минимальном  $f$ .

Опыт использования систем регистрации на базе видеокамер общего назначения показывает, что угол поля зрения используемых видеокамер составляет не более  $25^\circ$ , а фокусное расстояние – не менее 35 мм. Кроме того, учитывая, что у современных цифровых фотоматриц линейный размер пикселя варьируется в пределах от 0,0025 до 0,0080 мм, а у большинства он равен 0,0060 мм, максимальное значение выражения (5) будет составлять 0,0000483. Это значение мало, и им можно пренебречь.

Найдем  $\Delta\alpha_1$ . Свое максимальное значение  $\Delta\alpha_1$  принимает при максимальном  $l = 0,008$  мм и минимальном  $f = 35$  мм. Максимальное  $\Delta\alpha_1$  равно 0,000229 рад, а  $\operatorname{tg}0,000229 = 0,000229$ . Так как  $\Delta\alpha_i < \Delta\alpha_1$ , формула (4) примет вид:

$$\Delta\alpha_i = \Delta\alpha_1 \cos^2 \partial\alpha_{i-1}.$$

С другой стороны, из треугольника  $ABD$ :

$$\cos\partial\alpha_{i-1} = \frac{f}{f'},$$

а

$$f'^2 = f^2 + [(i-1)l]^2 = f^2 + l^2(i-1)^2,$$

тогда

$$\cos^2 \partial\alpha_{i-1} = \frac{f^2}{f^2 + l^2(i-1)^2} = \frac{1}{1 + \frac{l^2}{f^2}(i-1)^2}$$

и

$$\Delta\alpha_i = \Delta\alpha_1 \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \Delta\alpha_1 (i-1)^2}. \quad (6)$$

Преобразуем это выражение:

$$\Delta\alpha_i = \Delta\alpha_1 \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \Delta\alpha_1 (i-1)^2} = \frac{\Delta\alpha_1}{\text{tg}^2 \Delta\alpha_1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\text{tg}^2 \Delta\alpha_1} + (i-1)^2}.$$

Обозначим  $\frac{\Delta\alpha_1}{\text{tg}^2 \Delta\alpha_1} = a$ , тогда  $\frac{1}{\text{tg}^2 \Delta\alpha_1} = a$  и (6) примет вид:

$$\Delta\alpha_i = \frac{a}{a^2 + (i-1)^2}.$$

Для того чтобы определить поправку наведения, необходимо просуммировать угловые размеры всех пикселей от пикселя, определяющего выбранный в качестве начала отсчета объект, до пикселя, определяющего объект:

$$\partial\alpha_i = \sum_{j=i_0}^i \Delta\alpha_j. \quad (7)$$

Изобразим графически зависимость  $\Delta\alpha_j$  от  $j$  (рис. 3).

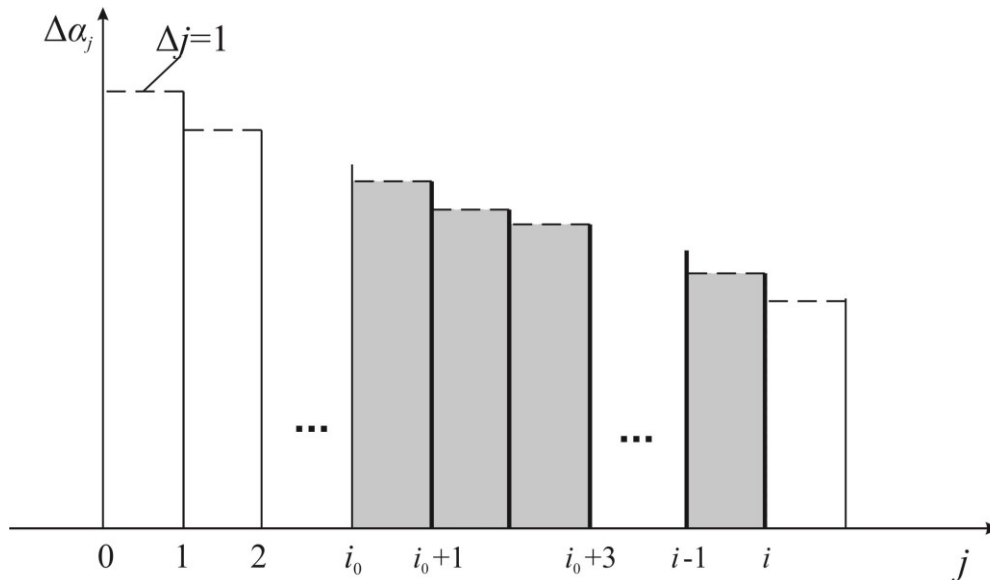


Рисунок 3 – Зависимость  $\Delta\alpha_j$  от  $j$

Построим прямоугольники, одной из сторон которых является  $\Delta\alpha_j$ , а другой стороной –  $\Delta j = 1$ . Если оптическая ось определяется пикселем  $i_0$ , объект – пикселем  $i$ , то искомая сумма (7) будет численно равна сумме площадей заштрихованных прямоугольников (рис. 3):

$$\partial\alpha_i = \sum_{j=i_0}^i \Delta\alpha_j \Delta j = \sum_{j=i_0}^i \left( \frac{a}{a^2 + (j-1)^2} \right) \Delta j = \sum_{j=i_0}^i S_j.$$

Площадь каждого из построенных прямоугольников можно найти следующим образом:

$$\begin{aligned} S_j &= \int_{i_n}^{i_k} \frac{a}{a^2 + (j-1)^2} dj = \frac{a}{a} \arctg \frac{(j-1)}{a} \Big|_{i_n}^{i_k} = \arctg \frac{(i_k-1)}{a} - \arctg \frac{(i_n-1)}{a} = \\ &= \arctg((i_k-1)\text{tg}\Delta\alpha_1) - \arctg((i_n-1)\text{tg}\Delta\alpha_1), \end{aligned}$$

где  $i_n, i_k$  – начальная и конечная граница прямоугольника по оси  $j$ .

Тогда

$$\begin{aligned} \partial\alpha_i &= \arctg(i_0 \operatorname{tg}\Delta\alpha_1) - \arctg((i_0 - 1)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1) + \arctg((i_0 + 1)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1) - \\ &\quad - \arctg(i_0 \operatorname{tg}\Delta\alpha_1) + \dots + \arctg((i - 1)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1) - \arctg((i - 2)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1) = \\ &= \arctg((i - 1)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1) - \arctg((i - 1)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1). \end{aligned}$$

С учетом сделанных допущений окончательно получаем:

- поправка наведения по азимуту:

$$\partial\alpha_i = \arctg \frac{(i - 1)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1}{\cos\omega_0} - \arctg \frac{(i_0 - 1)\operatorname{tg}\Delta\alpha_1}{\cos\omega_0}, \quad (8)$$

где  $i$  – номер пикселя по горизонтали, определяющего объект испытаний;  $i_0$  – номер пикселя по горизонтали, определяющего выбранный в качестве начала отсчета объект;  $\Delta\alpha_1$  – угловой размер первого от центра пикселя по горизонтали;  $\omega_0$  – угол места оптической оси видеосредства;

- поправка наведения по углу места:

$$\partial\omega_k = \arctg((k - 1)\operatorname{tg}\Delta\omega_1) - \arctg((k_0 - 1)\operatorname{tg}\Delta\omega_1), \quad (9)$$

где  $k$  – номер пикселя по вертикали, определяющего объект испытаний;  $k_0$  – номер пикселя по вертикали, определяющего выбранный в качестве начала отсчета объект;  $\Delta\omega_1$  – угловой размер первого от центра пикселя по вертикали.

Для оценки достоверности метода определения поправок наведения использовались поправки наведения, полученные от штатных оптических средств траекторных измерений мобильной оптико-электронной станции (МОЭС) «Вереск» и мобильного видеорегистрирующего комплекса (МВРК) «Кратность» во время проведения обработки данных сеансов измерений, которые были взяты в качестве эталонных значений. Погрешности определения поправок наведения по формулам (8), (9) представлены на рисунках 4–9.

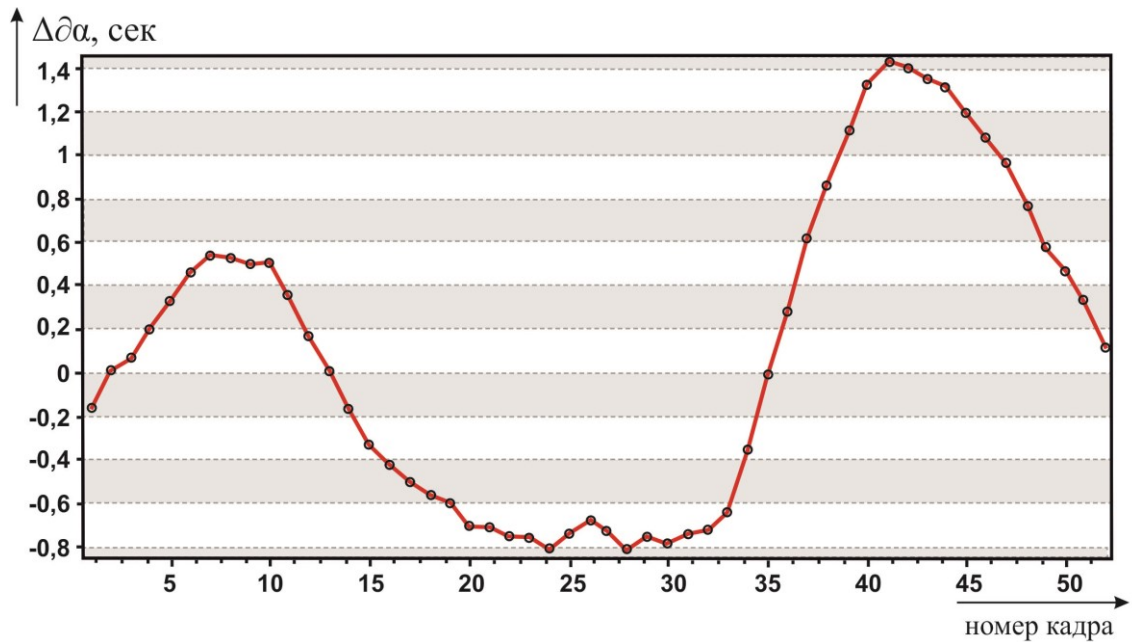


Рисунок 4 – Абсолютная погрешность определения поправки наведения МОЭС «Вереск» по азимуту



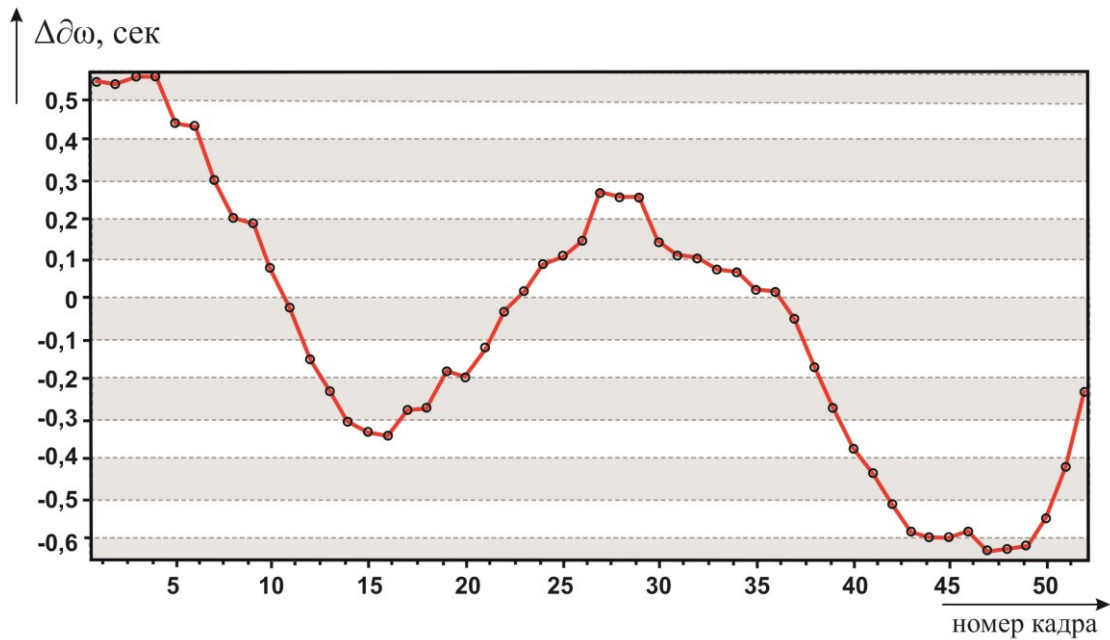


Рисунок 5 – Абсолютная погрешность определения поправки наведения МОЭС «Вереск» по углу места

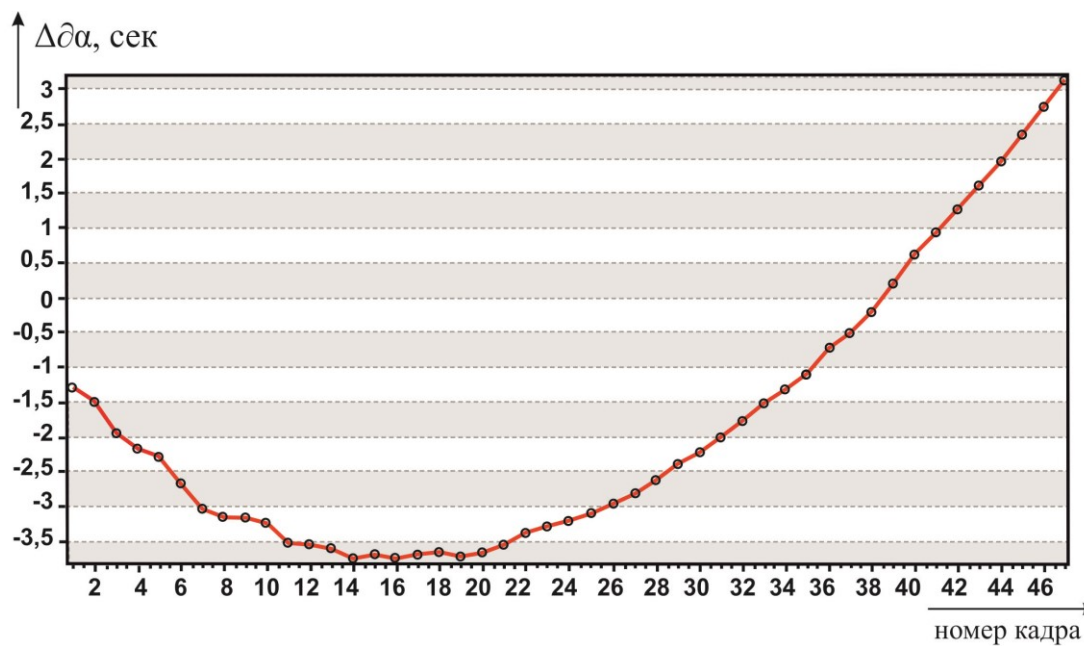


Рисунок 6 – Абсолютная погрешность определения поправки наведения МВРК «Кратность» по азимуту, фокусное расстояние 75 мм

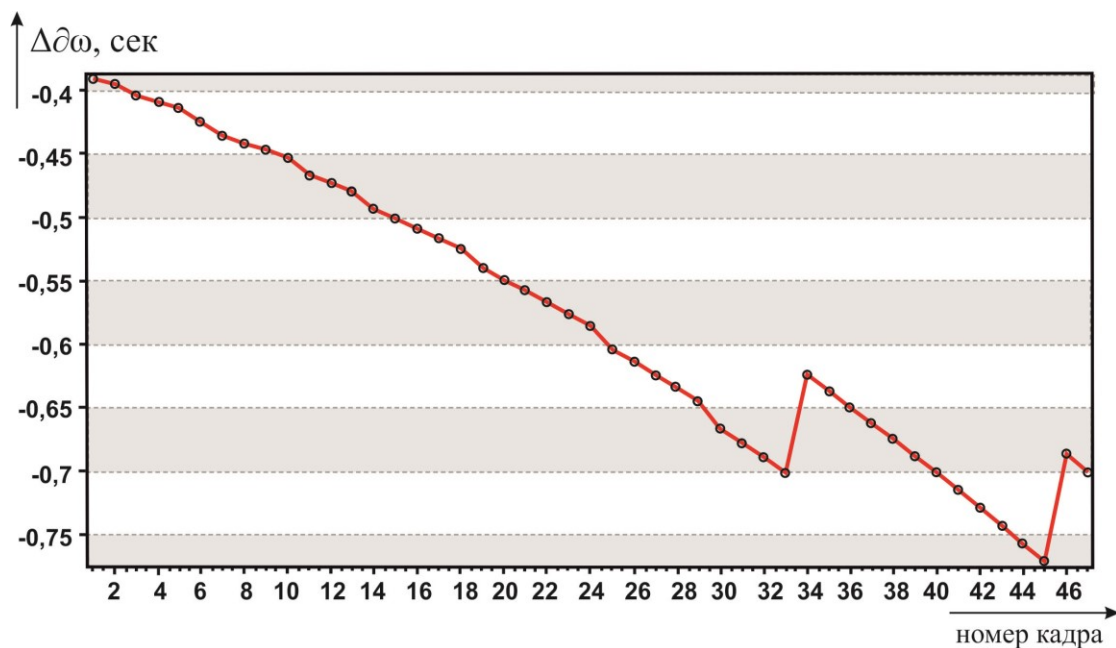


Рисунок 7 – Абсолютная погрешность определения поправки наведения МВРК «Кратность» по углу места, фокусное расстояние 75 мм

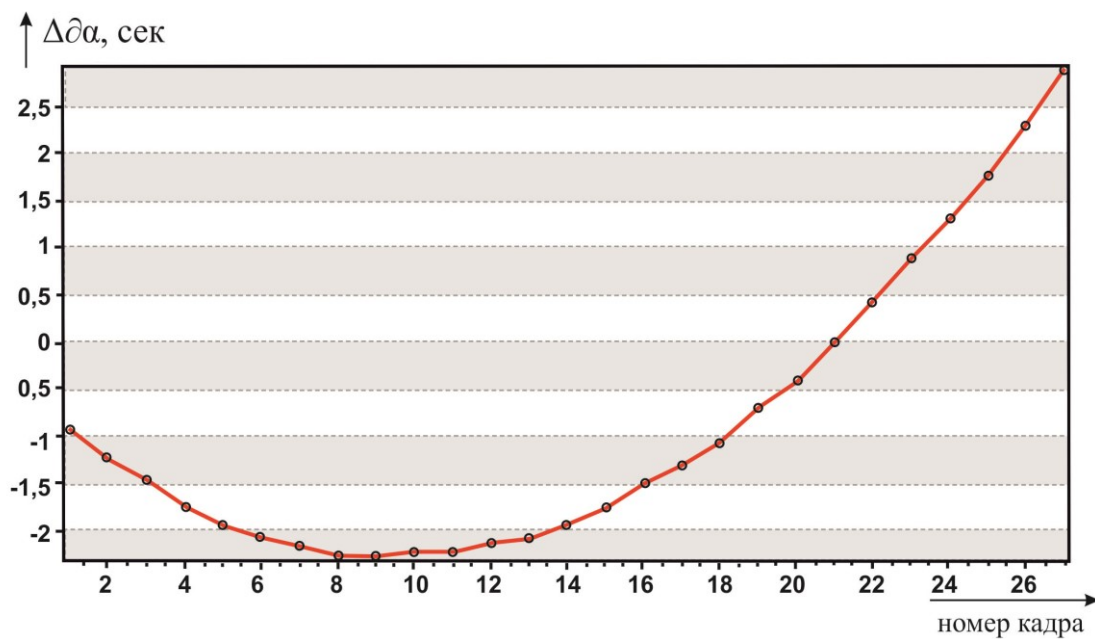


Рисунок 8 – Абсолютная погрешность определения поправки наведения МВРК «Кратность» по азимуту, фокусное расстояние 150 мм

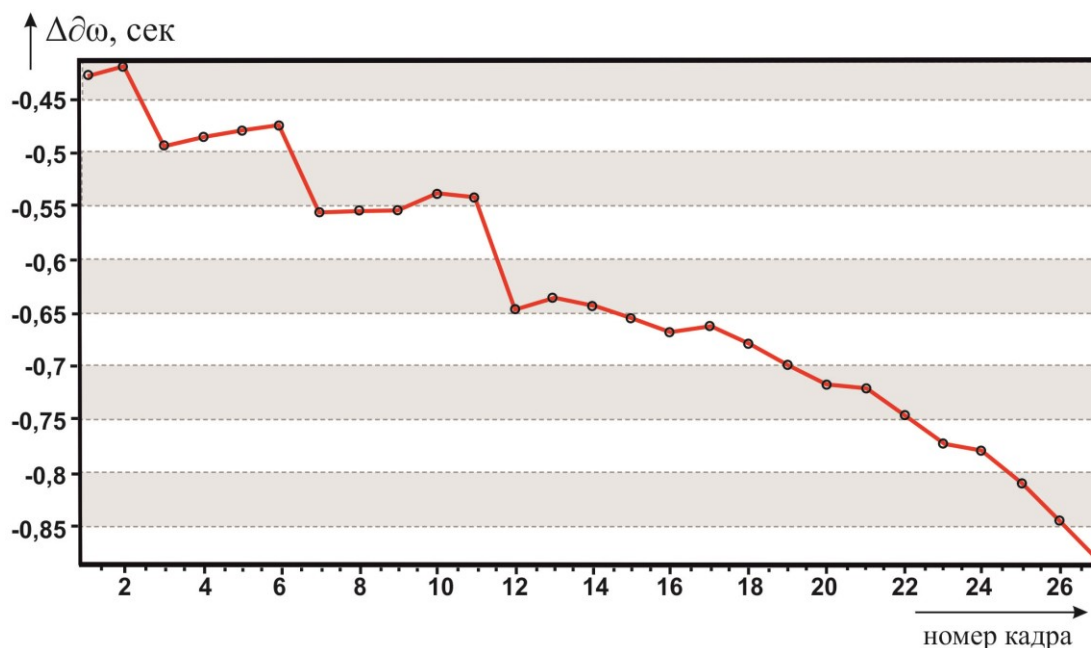


Рисунок 9 – Абсолютная погрешность определения поправки наведения МВРК «Кратность» по углу места, фокусное расстояние 150 мм

**Заключение.** Таким образом, предложенный метод позволяет определить поправки наведения при обработке материалов системы регистрации на базе видеокамер общего назначения. Полученные результаты показывают, что абсолютная погрешность определения поправки наведения по азимуту для МОЭС «Вереск» не превышает 1,5 с, для МВРК «Кратность» – 3,8 с и 2,9 с для фокусных расстояний 75,00 мм и 149,21 мм соответственно, а по углу места для МОЭС «Вереск» – не превышает 0,7 с, для МВРК «Кратность» – 0,8 с и 0,9 с для фокусных расстояний 75,00 мм и 149,21 мм соответственно. Анализ абсолютной погрешности определения поправок наведения позволяет сделать вывод об адекватности полученных соотношений (8), (9) и возможности их использования для определения поправок наведения при проведении обработки материалов, полученных от системы регистрации на базе видеокамер общего назначения.

#### Библиографический список

1. Арканов, А. В. Метод оценки показателей качества испытываемых сложных технических систем с использованием априорной информации / А. В. Арканов, В. И. Лобейко, А. В. Старусев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 2 (18). – С. 39–43.
2. Бабаев, А. А. Стабилизация оптических приборов / А. А. Бабаев. – Ленинград : Машиностроение, 1975. – 190 с.
3. Волотов, Е. М. Аттестация оптических средств траекторных измерений следящего типа / Е. М. Волотов, А. В. Тишлиев, Е. И. Митрофанов, И. В. Митрофанов // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 12. – С. 25–29.
4. Додонов, А. Г. Наземные оптические, оптико-электронные и лазерно-телевизионные средства траекторных измерений / А. Г. Додонов, В. Г. Пуятин // Математичні машини і системи. – 2017. – № 4. – С. 30–56.
5. Есев, А. А. Технология рационального управления ресурсами при летных испытаниях авиационной техники / А. А. Есев, А. Н. Мережко, А. С. Солдатов [и др.] // Проблемы безопасности полетов. – 2010. – № 3. – С. 40–44.
6. Жданюк, Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений / Б. Ф. Жданюк. – Москва : Советское радио, 1978. – 384 с.
7. Кожеуров, М. А. Влияние динамики гороскопа и электропривода на погрешность стабилизации систем наведения / М. А. Кожеуров, В. И. Родионов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – Вып. 5, ч. 2. – С. 320–329.
8. Коломиец, Л. В. Метод поддержки принятия решений по управлению ресурсами при испытаниях авиационной техники / Л. В. Коломиец, М. В. Федоров, А. В. Богомолов [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – Т. 8, № 5. – С. 38–40.
9. Лобейко, В. И. Современные подходы к организации испытаний сложных систем : моногр. / В. И. Лобейко. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский государственный университет», 2006. – 332 с.
10. Луцков, Ю. И. Погрешности видеоаппаратуры при проведении траекторных измерений / Ю. И. Луцков, А. П. Чупахин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 9–1. – С. 120–126.

11. Мацыкин, С. В. Применение концепции виртуальных систем для решения задач оптических траекторных измерений / С. В. Мацыкин, В. В. Осипов, С. Б. Савилкин // *Авиационная промышленность*. – 2012. – № 3. – С. 1.
12. Митрофанов, Е. И. Система обработки информации материалов видеорегистрации при испытаниях образцов авиационной техники и вооружения / Е. И. Митрофанов, Е. М. Волотов, Н. А. Ефимов, И. В. Митрофанов // *Надежность и качество : труды Международного симпозиума*. – Пенза : Пензенский государственный университет, 2014. – Т. 2 – С. 10–15.
13. Митрофанов, И. В. Модель и методика определения погрешности оптического средства траекторных измерений / И. В. Митрофанов, Е. М. Волотов, С. Б. Кокорина [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2019. – № 2 – С. 53–63.
14. Николаева, А. П. Особенности оценки погрешности измерительных систем при испытаниях авиационной техники при летных испытаниях / А. П. Николаева // *Метрология в XXI веке : доклады научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов*. – 2013. – С. 118–124.
15. Огороднийчук, Н. Д. Обработка траекторной информации. Часть I: Методы реализации пространственной (структурной, параметрической) избыточности измерений при решении нелинейных задач контроля недетерминированных траекторий / Н. Д. Огороднийчук. – Киев : КВВАИУ, 1981. – 141 с.
16. Рудаков, И. С. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем / И. С. Рудаков, С. В. Рудаков, А. В. Богомоллов // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2007. – Т. 5, № 1. – С. 66–72.
17. Середа, Н. В. Определение параметров углового движения мины по результатам видеосъемки начального участка траектории / Н. В. Середа, Н. В. Могильников // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2014. – № 12–1. – С. 33–40.
18. Смирнов, В. А. Система стабилизации и наведения линии визирования с увеличенными углами обзора / В. А. Смирнов, В. С. Захариков // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2013. – № 11. – С. 68–73.
19. Старусев, А. В. Метод оценки и обеспечения качества испытаний автоматизированных систем / А. В. Старусев // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2014. – № 4 (28). – С. 197–204.
20. Чернуха, В. Н. Основы испытаний авиационной техники. Часть вторая / В. Н. Чернуха, Ю. В. Новокшенов, С. И. Пляскота – Москва : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1994. – 334 с.
21. Чупахин, А. П. Оценка скорости полета малых летательных аппаратов с помощью видеоаппаратуры / А. П. Чупахин, М. Л. Савин // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2014. – № 9–1. – С. 126–130.
22. Чупахин, А. П. Погрешности видеоаппаратуры при проведении траекторных измерений / А. П. Чупахин, Ю. И. Луцков // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2014. – № 9–1. – С. 120–126.
23. Шибанов, Г. П. Испытания авиационной техники / Г. П. Шибанов // *Проблемы безопасности полетов*. – 2008. – № 4. – С. 36–44.

#### References

1. Arkanov, A. V., Lobeyko, V. I., Starusev, A. V. Metod otsenki pokazateley kachestva ispytyvaemykh slozhnykh tekhnicheskikh sistem s ispolzovaniem apriornoj informatsii [Method of assessment of indicators of quality of the tested complex technical systems with use of prior information]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2012, no. 2 (18), pp. 39–43.
2. Babaev, A. A. *Stabilizatsiya opticheskikh priborov* [Stabilization of optical devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1975. 190 p.
3. Volotov E. M., Tishliev A. V., Mitrofanov E. I., Mitrofanov I. V. Attestatsiya opticheskikh sredstv traektornykh izmereniy sledyashchego tipa [Certification of optical means of trajectory measurements of the watching type]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2016, no. 12, pp. 25–29.
- Volotov, E. M., Nesterov, S. V., Mitrofanov, I. V., Kokorina, S. B., Mitrofanov, E. I. Avtomatizirovannaya obrabotka traektornoy informatsii sistemy registratsii na baze videokamer obshchego naznacheniya [Automated processing of trajectory data of system of registration based on general purpose cameras]. *Nauchnye vedomosti. Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika*. [Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information Technologies], 2018, vol. 45, no. 4, pp. 786–792.
4. Dodonov, A. G., Putyatin, V. G. Nazemnye opticheskie, optiko-elektronnye i lazerno-televizionnye sredstva traektornykh izmereniy [Land optical, optical-electronic and laser and television means of trajectory measurements]. *Matematichni mashini i sistemi* [Mathematical Cars and Systems], 2017, no. 4. pp. 30–56.
5. Esev, A. A., Merezhko, A. N., Soldatov, A. S., Shevchuk, L. V., Ivanika, V. N. Tekhnologiya ratsionalnogo upravleniya resursami pri letnykh ispytaniyakh aviatsionnoy tekhniki [Technology of rational resource management during flight tests of aviation equipment]. *Problemy bezopasnosti poletov* [Flight safety issues], 2010, no. 3, pp. 40–44.
6. Zhdanyuk, B. F. *Osnovy statisticheskoy obrabotki traektornykh izmereniy* [Fundamentals of statistical processing of trajectory measurements]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 384 p.
7. Kozheurov, M. A., Rodionov, V. I. Vliyanie dinamiki goroskopa i elektroprivoda na pogreshnost stabilizatsii sistem navedeniya [Influence of dynamics of gyroscope and electric drive on the stabilization error of induction systems]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2015, no. 5 (2), pp. 320–329.

8. Kolomiets, L. V., Fedorov, M. V., Bogomolov, A. V., Merezhko, A. N., Soldatov, A. S., Esev, A. A. Metod podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu resursami pri ispytaniyakh aviatsionnoy tekhniki [Method of support of decision-making on resource management at tests of aviation technicians]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and Control Systems], 2010, vol. 8, no. 5, pp. 38–40.

9. Lobeyko, V. I. *Sovremennyye podkhody k organizatsii ispytaniy slozhnykh sistem : monografiya* [Modern approaches to the organization of tests of complex systems : monograph]. Astrakhan, Astrakhan State University Publ. House, 2006. 332 p.

10. Lutskov, Yu. I., Chupakhin, A. P. Pogreshnosti videoapparatury pri provedenii traektornykh izmereniy [Video equipment errors when carrying out trajectory measurements]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2014, no. 9–1, pp. 120–126.

11. Matsykin, S. V., Osipov, V. V., Savilkin, S. B. Primenenie kontseptsii virtualnykh sistem dlya resheniya zadach opticheskikh traektornykh izmereniy [Application of the concept of virtual systems for the solution of problems of optical trajectory measurements]. *Aviatsionnaya promyshlennost* [Aviation Industry], 2012, no. 3, p. 1.

12. Mitrofanov, E. I., Volotov, E. M., Efimov, N. A., Mitrofanov, I. V. Sistema obrabotki informatsii materialov videoregistratsii pri ispytaniyakh obraztsov aviatsionnoy tekhniki i vooruzheniya [The system of information processing of materials of video registration when testing samples of the aircraft equipment and arms]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality : proceedings of the International symposium], 2014, no. 2, pp. 10–15.

13. Mitrofanov, I. V., Volotov, E. M., Kokorina, S. B., Mitrofanov, E. I., Volotova, T. A., Timoshenko, I. V. Model i metodika opredeleniya pogreshnosti opticheskogo sredstva traektornykh izmereniy [Model of an error of optical means of trajectory measurements and technique of its definition]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2019, no. 2, pp. 53–63.

14. Nikolaeva, A. P. Osobennosti otsenki pogreshnosti izmeritelnykh sistem pri ispytaniyakh aviatsionnoy tekhniki pri letnykh ispytaniyakh [Features of error estimation of measuring systems during tests of aviation equipment during flight tests]. *Metrologiya v XXI veke : doklady nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i specialistov* [Metrology in the 21st century : proceedings of the scientific-practical conference of young scientists, graduate students and specialists], 2013, pp. 118–124.

15. Ogorodniy chuk, N. D. *Obrabotka traektornoy informatsii. Chast I: Metody realizatsii prostranstvennoy (strukturnoy, parametricheskoy) izbytochnosti izmereniy pri reshenii nelineynykh zadach kontrolya nedeterminirovannykh traektoriy* [Processing of trajectory information. Part I: Methods for implementing spatial (structural, parametric) measurement redundancy in solving nonlinear control problems of non-deterministic trajectories]. Kiev, 1981. 141 p.

16. Rudakov, I. S., Rudakov, S. V., Bogomolov, A. V. Metodika identifikatsii vida zakona raspredeleniya parametrov pri provedenii kontrolya sostoyaniya slozhnykh sistem [Technique of identification of a kind of the law of distribution of parameters at realization of the control of a condition of difficult systems]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2007, vol. 5, no. 1, pp. 66–72.

17. Sereida, N. V., Mogilnikov, N. V. Opredelenie parametrov uglovogo dvizheniya miny po rezul'tatam videoseмки nachalnogo uchastka traektorii [Determination of parameters of the angular movement of a mine by results of video filming of the initial site of a trajectory]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2014, no. 12–1, pp. 33–40.

18. Smirnov, V. A., Zakhariykov, V. S. Sistema stabilizatsii i navedeniya linii vizirovaniya s uvelichennymi uglami obzora [System of stabilization and guidance a line of sight which extended field of view]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2013, no. 11, pp. 68–73.

19. Starusev, A. V. Metod otsenki i obespecheniya kachestva ispytaniy avtomatizirovannykh sistem [Method of assessment and ensuring quality of tests of the automated systems]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2014, no. 4 (28), pp. 197–204.

20. Chernukha, V. N., Novokshonov, Yu. V., Plyaskota, S. I. *Osnovy ispytaniy aviatsionnoy tekhniki. Chast vtoraya* [Basics of aeronautical engineering testing. Part two]. Moscow, VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 1994. 334 p.

21. Chupakhin, A. P., Savin, M. L. Otsenka skorosti poleta malykh letatelnykh apparatov s pomoshchyu videoapparatury [Assessment of the speed of flight small flying devices by means of a videoapparatus]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2014, no. 9–1, pp. 126–130.

22. Chupakhin, A. P., Lutskov, Yu. I. Pogreshnosti videoapparatury pri provedenii traektornykh izmereniy [Video equipment errors when carrying out trajectory measurements]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2014, no. 9–1, pp. 120–126.

23. Shibanov, G. P. Ispytaniya aviatsionnoy tekhniki [Tests of aviation technology]. *Problemy bezopasnosti poletov* [Problems of Flight Safety], 2008, no. 4, pp. 36–44.

УДК 004.2

**ОНТОЛОГИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
В ОБЛАСТИ АРХИТЕКТУРНОЙ АКУСТИКИ***Статья поступила в редакцию 01.02.2023, в окончательном варианте – 08.02.2023.*

**Чусова Алина Евгеньевна**, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, аспирант, ORCID: 0002-8263-2559, e-mail: alinachusova95@gmail.com

В статье описывается разработанная онтология методов, используемая для автоматизированной поддержки компьютерного моделирования акустических полей в замкнутых помещениях в целях принятия решения о математической модели, которую следует использовать для достижения эффективности, заданной желаемой точностью моделирования в противоречии с допустимыми вычислительными затратами. Основной проблемой при этом является слабая степень формализации данной предметной области и отсутствие четких инструкций и рекомендаций по оформлению помещений. Описанные проблемы настолько остры, что зачастую экспертам предметной области приходится подбирать материалы на основе эмпирически полученных знаний и ощущений. В связи с этим возникает необходимость формализации знаний об архитектурной акустике. В данной работе представлены результаты онтологического анализа предметной области – основные факторы, влияющие на выбор одной из существующих теорий описания акустических процессов (статистической и геометрической) и методов применения каждой из них. Результаты этого анализа формализованы в виде созданных и представленных в настоящей работе алгоритмов поддержки принятия решения об используемых математической модели поля, методе имитационного компьютерного моделирования и параметризации модели в условиях требований к эффективности.

**Ключевые слова:** архитектурная акустика, онтология, моделирование, компьютерные системы поддержки принятия решений

**ONTOLOGY OF MODELING METHODS  
IN THE FIELD OF ARCHITECTURAL ACOUSTICS***The article was received by the editorial board on 01.02.2023, in the final version – 08.02.2023.*

**Chusova Alina E.**, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation, post-graduate student, ORCID: 0002-8263-2559, e-mail: alinachusova95@gmail.com

The paper describes a developed ontology used to support computer-aided simulation of acoustical fields in enclosed spaces in order to assist in making a decision about a mathematical model to use for achieving efficiency based on a desired accuracy of the simulation in contradiction to available computational costs. The main challenges for that include a weak degree of formalization of this subject area as well as the lack of clear instructions or recommendations for design of premises with respect to their acoustical properties. The problems described in the paper are so acute that knowledge domain experts often parameterize their calculations and make design decisions solely based on empirical experience and feelings rather than formally described knowledge. In this regard, there is a need to create and formally describe the knowledge about architectural acoustics and, since application of modern theory of acoustics can be cumbersome, provide tools to automate decision making when it comes to acoustic designs. This report presents the results of ontological analysis of the subject area including the main factors influencing the choice of existing statistical and geometric theories for describing acoustic processes as well as methods used for simulation of acoustical field based on those theories.

**Keywords:** architectural acoustics, ontology, modelling, decision-making system

**Введение.** Задачей создания оптимального акустического оформления помещений занимались с древнейших времен. Несмотря на то, что архитектурная акустика является одной из старейших дисциплин, до сих пор не решены некоторые фундаментальные проблемы, в числе которых отсутствие единой теории, которая описывает все акустические процессы в помещении в полной мере. На данный момент существуют три теории описания акустических процессов: статистическая, геометрическая, волновая.

Исследования [1–3] выделяют следующие проблемы этой области знаний и применения теорий в науке и технике:

- слабая степень формализации акустики осложняет создание подходящих моделей и методов для решения проблем, оценку степени их адекватности;
- отсутствие единой точки зрения на области применения теорий описания акустических процессов и их методов;
- нечеткие рекомендации по акустическому проектированию в действующих нормативных документах;
- формальное применение программного обеспечения для акустического проектирования помещений различного назначения без учёта специфики и ограничений, налагаемых используемыми методами математического и компьютерного моделирования.

Одним из перспективных направлений в решении проблемы является применение интеллектуальных систем поддержки принятия решений, то есть систем, в которых используются методы искусственного интеллекта. Основным преимуществом данного подхода являются логически выведенные решения на основе полученных данных, а также возможность получить ответ в условиях недостатка информации или нечетких требованиях. Использование интеллектуальных систем получило широкое распространение во многих областях [4], поскольку это позволяет снизить общую неопределённость решений, а полученные выводы согласуются с экспертными заключениями.

Исследования в области создания интеллектуальных систем для подбора оптимальных вычислительных моделей в акустике остаются актуальными и по сей день. Одна из первых попыток формализовать акустические правила и получить акустические и фонетические знания, которые будут использоваться в акустико-фонетической расшифровке, была предпринята в [5].

С точки зрения архитектурной акустики создание многоцелевых помещений с адаптивной акустикой вызывает большие трудности, поскольку рекомендации по акустическому проектированию помещений с различными назначениями могут противоречить друг другу. Попытки создать интеллектуальное решение, которое позволит решить проблему нахождения оптимального времени реверберации, описаны в [6, 7]. В статье предлагается использование акустических параметров помещения, извлеченных из полученных речи или музыки, для определения количества добавочной реверберации. Данный параметр необходим для достижения нужных акустических параметров, поскольку оптимальное время реверберации для помещений с разными параметрами и назначением различно.

Но наиболее распространено применение методов искусственного интеллекта с целью повышения точности расчетов за счет учета нелинейных зависимостей, что особенно актуально для сложных сред [8].

Таким образом, можно говорить о том, что процесс прогнозного и аналитического исследования акустического поля сопряжен с большим числом сложностей и неопределенностей еще на этапе выбора основополагающей теории описания акустических процессов и методов их моделирования. В данный момент разработано множество вычислительных моделей, однако на практике возникают противоречия в рекомендациях по использованию моделей на различных частотах. Причины предпочтения одной модели другой настолько взаимосвязаны и разнообразны, что опираться на один критерий не представляется целесообразным. Поэтому создание системы поддержки принятия решения, позволяющей облегчить этот выбор, является актуальной задачей.

Для этого необходимо решить ряд подзадач: анализ предметной области для составления глоссария терминов и отношений между ними; выявление факторов, влияющих на выбор акустической теории; запись их в виде аксиом – утверждений в логической форме, которые постулируют взаимосвязь между понятиями и отношениями.

**Факторы выбора теории описания акустических процессов.** Для решения современных задач акустического оформления наиболее часто используются статическая и геометрическая теории, поскольку использование волновой теории связано с решением дифференциальных уравнений состояния звукового поля [9] в помещении, что является вычислительно трудоемким процессом. Также отсутствие четких принципов теории и единого представления об области применения заметно осложняют процесс внедрения. Поэтому были выделены факторы, влияющие на выбор теории описания акустических процессов – статистической и геометрической. Основными определяющими факторами, влияющими на выбор теории описания акустических процессов, являются:

- характеристики помещения: форма, размер, назначение, используемые материалы;
- характеристики источника: положение, его характеристика направленности и амплитудно-частотная характеристика;
- анализируемые процессы.

**Характеристики помещения.** В статистической теории помещение рассматривается в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами, близкими к золотому сечению. Для помещения более сложной формы результаты расчетов могут оказаться неточными [10]. Под сложной формой помещения подразумевается вогнутый многоугольник, а также формы, имеющие закругления, поскольку подобные поверхности могут как рассеивать, так и концентрировать звук, что создает области с неравномерным распределением энергии. Таким образом, статистическая теория подходит для небольших помещений, чьи размеры не превышают длины волны [11, 12]. На практике используют следующее соотношение (1):

$$\sqrt[3]{V} = \lambda. \quad (1)$$

В противном же случае стоит рассмотреть методы геометрической акустики.

Для помещений, где имеет значение четкость звучания речи, существенную роль играют ранние отражения, которые усиливают прямой звук, если приходят в течение определенного времени. Данные отражения не учитывает статистическая теория, которая уделяет большее внимание стационарному процессу (процессу установившихся колебаний).

Материалы поверхностей помещения определяющим образом влияют на его акустические характеристики, поскольку от свойств материала зависит коэффициент поглощения – отношение звуковой энергии, поглощенной единицей площади поверхности, к энергии звуковых волн, падающих на эту единичную площадь [13]. Если используются материалы с высоким коэффициентом, то звук затухает сравнительно быстро, уменьшается доля эха. Поскольку в помещении могут использоваться различные материалы, могут создаваться области неравномерного распределения звуковой энергии.

Для статистической теории диффузность поля является необходимым условием их применимости. Если это условие не соблюдается, то для анализа необходимо использовать методы геометрической теории.

**Характеристики источника.** В статистической теории предполагается, что все направления, в которых излучает случайно расположенный источник и в которых распространяются волны, отраженные от произвольно выбранной преграды, равновероятны. Если расстояние от источника до преграды меньше половины длины волны, то возникают сложности анализа, обусловленные ближней зоной поля: поскольку звук на этом участке не установлен, соотношение сил и полей имеют сложную для измерения и предсказания зависимость [14]. Таким образом, для более точного анализа в ближней зоне целесообразно использовать методы геометрической акустики.

Одним из недостатков статистической теории акустических процессов является невозможность ее применения для анализа звука на низких частотах (16–125 Гц). Длина волны на низких частотах большая по сравнению с размерами плоскостей, и весь объем помещения может находиться в ближней зоне. Таким образом, для анализа низкочастотного излучения выбор геометрической теории является более предпочтительным.

**Анализируемые процессы.** В зависимости от целей построения модели могут использоваться разные методы. Если пользователя модели интересует распространение давления в простом помещении и точность не играет большой роли, то целесообразней использовать статистическую теорию для описания процессов. Однако если пользователя интересуют явления дифракции, интерференции и структура ранних отражений, которые напрямую влияют на четкость речи, а также необходимо проанализировать переходные процессы, тогда предпочтительны методы геометрической акустики.

Описанные факторы были ранжированы по степени влияния на выбор теории и представлены в виде алгоритма (рис. 1). Наиболее значимыми факторами стали размеры помещения, его форма, а также частота звука, поскольку при большой по сравнению с размерами помещения длиной волны сложно предсказать распределение энергии.

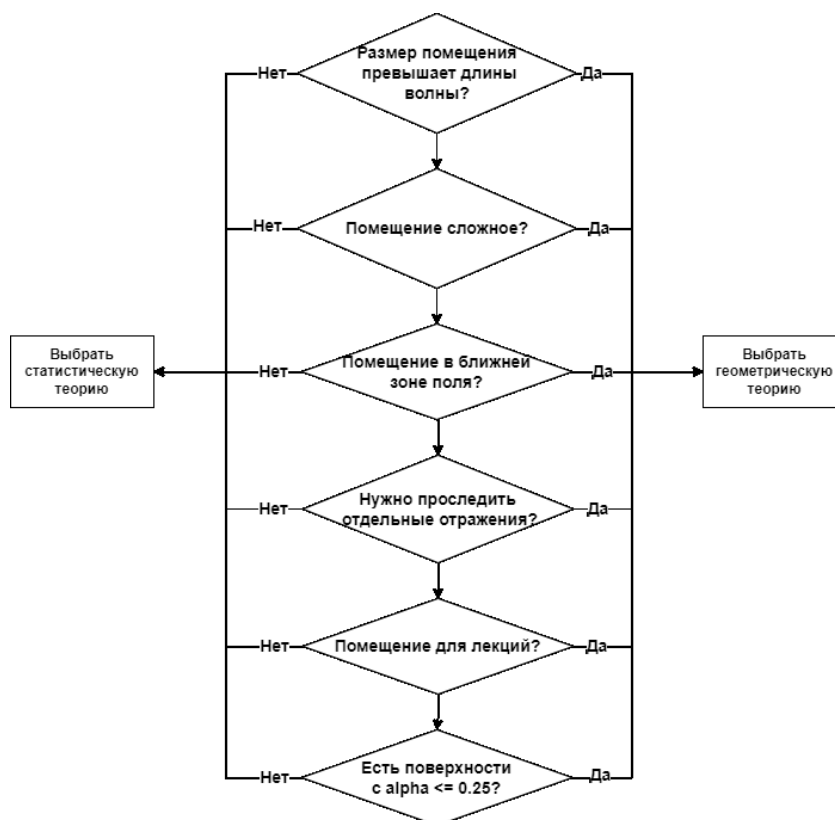


Рисунок 1 – Классификация методов моделирования



Прежде чем приступить к выбору теории описания акустических процессов, данные о помещении проходят предварительную обработку: вычисляется длина волны, ближняя и дальняя зоны поля. Помимо этого, анализируется форма помещения – помещение считается сложным, если его форма отлична от прямоугольника или имеются фокусирующие и дефокусирующие поверхности.

При прохождении каждого условия предлагается использовать либо статистическую теорию, либо геометрическую, после чего аккумулируется количество факторов в пользу каждой модели. Если в результате работы алгоритма можно выбрать более одной теории, наиболее предпочтительной считается та, сумма факторов которой больше. В дальнейшем пользователь может уточнить параметры модели помещения, например, уточнив назначение строения.

**Факторы выбора группы методов.** Для выбора метода нужно составить их классификацию для каждой теории описания акустических процессов. Классификация представлена на рисунке 2.

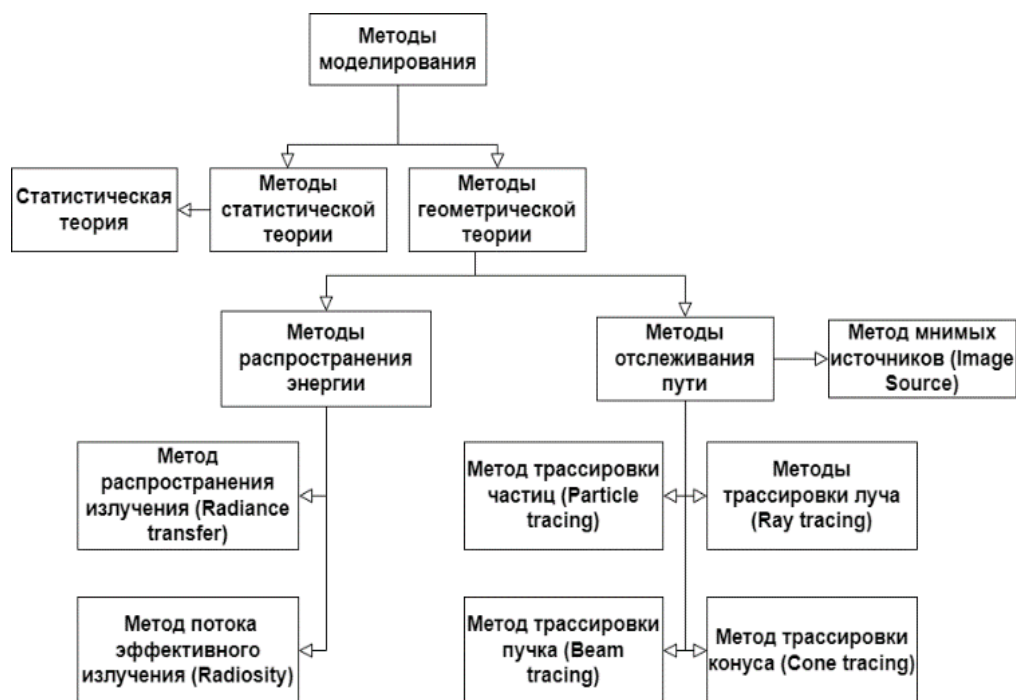


Рисунок 2 – Классификация методов моделирования

Группы методов выделялись по принципу действия. Таким образом, для геометрической теории удалось выделить 2 группы: методы отслеживания пути и методы распространения энергии. Поскольку в статистической теории не выделяются присущие только ей методы, группы не были выделены.

Факторы, влияющие на выбор группы методов:

- характеристики поверхностей: сложность помещения, наличие (де-)фокусирующих и рельефных поверхностей;
- характеристики аппаратного обеспечения: возможность параллельного выполнения алгоритма, объем оперативной памяти;
- потребности моделирования: необходимость отслеживания структуры ранних и поздних отражений, потребность в высокой точности результатов, учет волновых эффектов, потребность в быстром моделировании.

**Характеристики поверхностей.** Сложность помещения может повлиять на скорость вычислений. Наличие большого количества углов может создавать слепые зоны, что отрицательно сказывается на результативности моделирования. К сложности помещения чувствительны методы трассировки луча и пучка [15]. Наличие (де-)фокусирующих поверхностей создают области неравномерного распределения энергии, которые оказывают значительное влияние на картину распространения. При использовании методов трассировки луча и пучка изогнутые поверхности могут представлять проблему, так как существует вероятность «застревания» луча или пучка в вогнутой поверхности, что снижает эффективность моделирования. Также имеет значение фактура поверхностей. Так, метод трассировки конуса может быть неточным в ситуациях наличия неровностей, длина которых сравнима или равна длине сегмента, поскольку в таких случаях могут случаться самопересечения.

Наличие (де-)фокусирующих поверхностей создают области неравномерного распределения энергии, которые оказывают значительное влияние на картину распространения. При использовании методов трассировки луча и пучка изогнутые поверхности могут представлять проблему, так как существует вероятность «застревания» луча или пучка в вогнутой поверхности, что снижает эффективность моделирования. Также имеет значение фактура поверхностей. Так метод трассировки конуса [16] может быть неточным в ситуациях наличия неровностей, длина которых сравнима или равна длине сегмента конуса, поскольку в таких случаях могут случаться самопересечения.

**Характеристики аппаратного обеспечения.** Группа методов, основанных на распространении энергии, отличается высокой требовательностью к вычислительным ресурсам. Так, в методе распространения излучения строится матрица взаимодействия элементов поверхностей. Каждый элемент матрицы описывает, какая часть энергии, покидая один участок, достигает другого [17]. Таким образом, если размер элементов мал и моделируется достаточно большое помещение, то матрица быстро разрастается до объемов, требующих высокопроизводительных вычислений.

В методе обмена излучения для каждого элемента необходимо использовать десятки направлений, чтобы сохранить свойства направленности при отражениях. Зависящие от времени энергетические отклики требуют временного разрешения, то есть тысяч отсчетов. Таким образом, потребление памяти приближается к сотням мегабайт [18].

Не все алгоритмы моделирования имеют хороший потенциал для распараллеливания. Алгоритмами, которые легко поддаются распараллеливанию, являются трассировка луча, пучка, частиц, метод мнимых источников и методы группы распространения энергии.

**Потребности моделирования.** Иногда необходимо осуществить моделирование быстро, пренебрегая потерями в точности. Быстрыми методами считаются группа трассировок. С другой стороны, бывают случаи, когда точность является критически важна, например, при моделировании звука в помещениях с живым звуком.

Структура ранних отражений является исключительно важным фактором, влияющим на качество звучания в помещении. В больших объемах ранние отражения приходят друг за другом через сравнительно большие интервалы и образуют структуру последовательно приходящих отражений с различными амплитудами звуковой энергии. Отследить картину отражений позволяют методы мнимых источников [19] и группа методов распространения энергии. Учет волновых эффектов, таких как дифракция и интерференция, важен при наличии в помещении препятствий, что, безусловно, влияет на картину распространения. Методы моделирования распространения звуковой энергии не позволяют учесть особенности волнового распространения.

Алгоритм выбора семейств методов и их отдельных методов представлен на рисунке 3.

Наиболее значимыми факторами являются учет волновых эффектов, форма помещения и наличие изогнутых поверхностей. Как и в вышеописанном алгоритме выбора теории описания акустических процессов, каждый метод имеет вес, который увеличивается при выполнении перехода по определенным ветвям условия. Если предлагается выбрать семейство, то увеличивается вес каждого метода, входящего в эту группу.

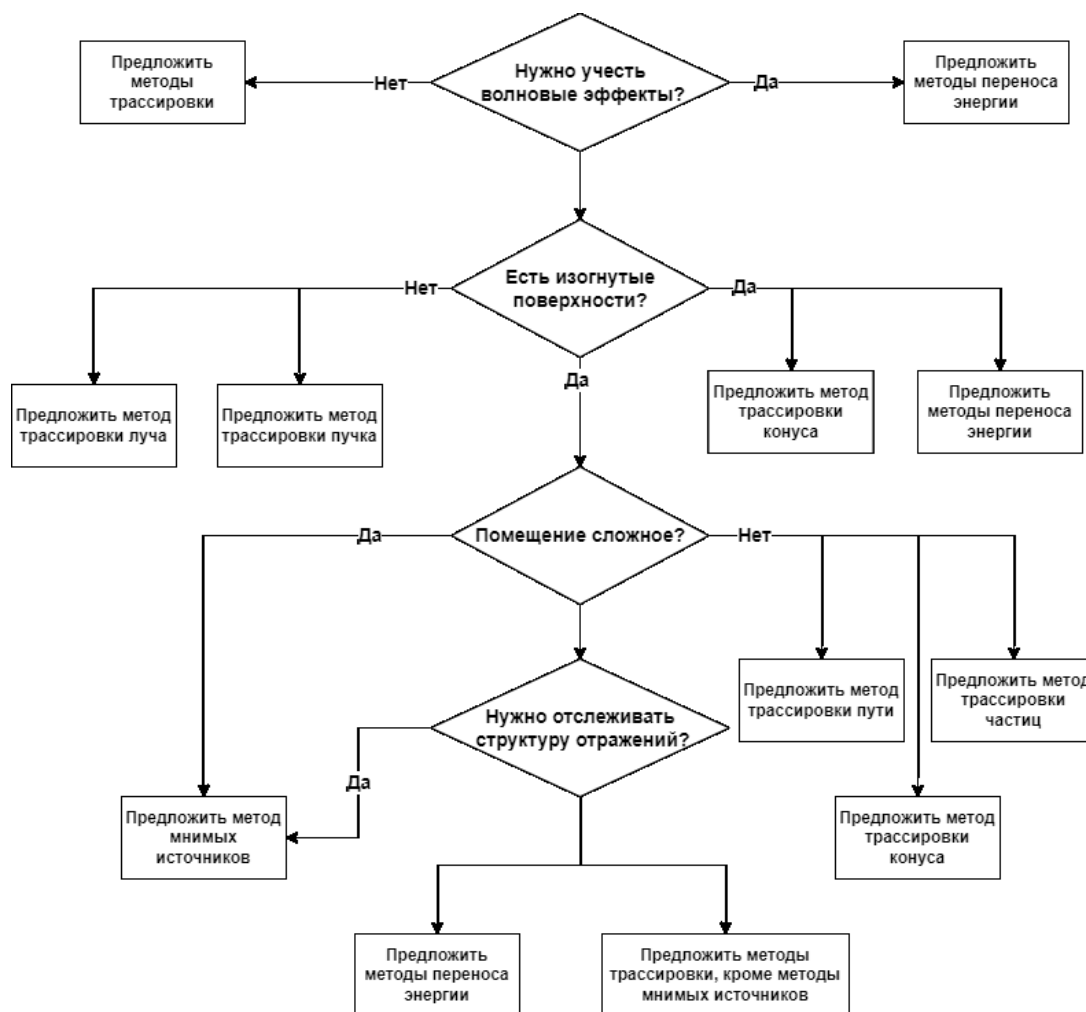


Рисунок 3 – Классификация методов моделирования

**Экспериментальная верификация.** В процессе анализа были выделены термины предметной области и условия выбора теории описания акустических процессов и ее методов. Полученные знания были реализованы в виде онтологии AcousticsMethods, разработанной в среде Protege 5.5.0.

Для проверки аксиом была создана модель зала «Средний» Дальневосточного федерального университета (рис. 4). В статьях [20, 21] был описан алгоритм моделирования распространения звука, основанный на геометрической теории.

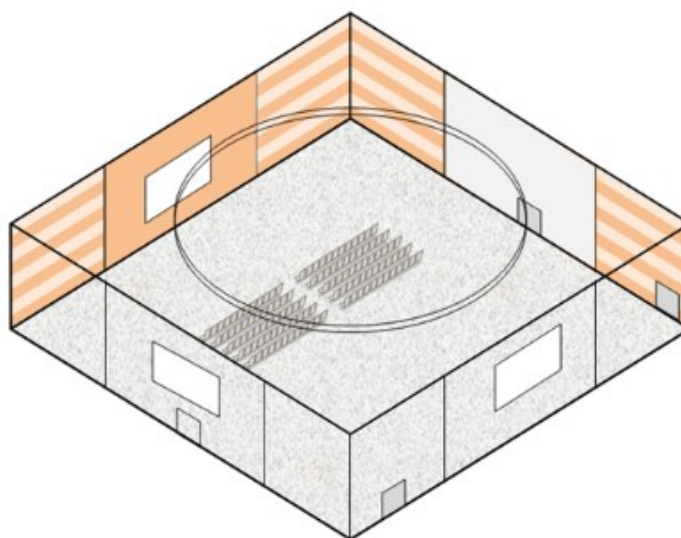


Рисунок 4 – Модель зала «Средний»

Характеристики помещения:

- размеры помещения  $30 \times 30 \times 7,5$  м (объём помещения составляет  $6750 \text{ м}^3$ );
- зал используется для встреч и выступлений;
- помещение и потолок отделаны штукатуркой и панелями с коэффициентами поглощения 0,06 и 0,15 соответственно, на полу имеется ковровое покрытие с коэффициентом поглощения 0,39.

Поскольку представленный зал имеет прямоугольную форму без искривленных поверхностей (что описывается параметрами `Is_complex_building` и `Curvature`), предназначен для встреч и выступлений (параметр `Purpose`), а размеры помещения больше длин волн (параметр `Has_big_room_linear_size`), целесообразно использовать методы геометрической теории, что подтверждают выводы машины логического вывода (рис. 5).

При моделировании распространения звука использовался гибридный метод, основанный на трассировке лучей, что совпадает с логическим выводом (рис. 6). Также система предложила использовать другие методы трассировки: трассировку пучка, поскольку области применения методов группы трассировки по большей части совпадают, а именно наиболее эффективно могут использоваться для несложных помещений, в которых нет изогнутых поверхностей.

**Explanation 1**  Display laconic explanation

Explanation for: Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Type Geometric

- 1) Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Has\_big\_room\_linear\_size true
- 2) Geometric EquivalentTo Has\_big\_room\_linear\_size value true

---

**Explanation 2**  Display laconic explanation

Explanation for: Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Type Geometric

- 1) Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Purpose "Meeting"
- 2) Geometric EquivalentTo (Purpose value "Lecture") or (Purpose value "Meeting")

Рисунок 5 – Логический вывод выбора теории описания акустических процессов

**Explanation 1**  Display laconic explanation

Explanation for: Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Type Ray\_tracing

- Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Is\_complex\_building false
- Ray\_tracing EquivalentTo Is\_complex\_building value false

---

**Explanation 1**  Display laconic explanation

Explanation for: Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Type Beam\_tracing

- Middle\_Hall\_FEFU\_Chars Is\_complex\_building false
- Ray\_tracing EquivalentTo Curvature value "0.0"^^xsd:double
- Ray\_tracing EquivalentTo Is\_complex\_building value false
- Beam\_tracing EquivalentTo (Curvature value "0.0"^^xsd:double) and (Is\_complex\_building value false)

Рисунок 6 – Логический вывод выбора методов моделирования

**Заключение.** Анализ публикаций, посвященных методам моделирования распространения звуковых волн и использованию интеллектуальных систем в области акустики, показал, что в настоящее время внедрение методов искусственного интеллекта хоть и улучшает точность методов и моделей, но не позволяет применять их повсеместно. Таким образом, перед специалистами предметной области все еще стоят задачи выбора теории описания акустических процессов и методов в рамках этих теорий с учётом специфики помещения.

Поскольку количество факторов, влияющих на выбор акустической теории и методов внутри нее, достаточно велико, создание систем поддержки принятия решений оправдано, так как это позволит освободить специалистов от некоторых рутинных, но трудоемких задач. Также подобная система позволит увеличить точность принимаемых решений о выборе стратегии моделирования, поскольку логические выводы строятся на основе обобщенных знаний о предметной области и опыте экспертов.

В статье описаны созданные алгоритмы принятия решения об используемых математической модели и методах моделирования распространения акустического поля с учетом параметров модели помещения и требований к эффективности. Экспериментально показана адекватность построенных онтологических моделей ожидаемым в предметной области «Архитектурная акустика». Представленные в статье алгоритмы принятия решений также могут быть использованы в других областях акустики, таких как гидроакустика, и в смежных областях, например распространение радиоволн.

В рамках выполняемого автором диссертационного исследования осуществляется уточнение описанной в статье модели знаний, а также выделение факторов, влияющих на выбор методов в рамках волновой теории построения математических моделей акустического поля.

#### **Библиографический список**

1. Щиржецкий, Х. А. К проблеме акустического проектирования современных залов многоцелевого назначения / Х. А. Щиржецкий, В. Н. Сухов, А. Х. Щиржецкий, В. М. Алёшкин // Жилищное строительство. – 2019. – № 7. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme-akusticheskogo-proektirovaniya-sovremennyh-zalov-mnogotsелеvogo-naznacheniya>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
2. Соловьев, А. К. Новые архитектурно-конструктивные решения с учётом естественной акустики при реконструкции и строительстве православных храмов / А. К. Соловьев, К. А. Соловьев, И. Н. Бурляев // АМІТ. – 2017. – № 3 (40). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-arhitekturno-konstruktivnye-resheniya-s-uchyotom-estestvennoy-akustiki-pri-rekonstruktsii-i-stroitelstve-pravoslavnyh-hramov>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Summers, J. Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics / J. Summers, R. Torres, Y. Shimizu // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2004. – Vol. 116. – P. 958–969.
4. Величин, В. З. Модель интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению состоянием строительных конструкций зданий / В. З. Величин, Т. Н. Солдатенко // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 3 (29). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-intellektualnoy-podderzhki-prinyatiya-resheniy-po-upravleniyu-sostoyaniem-stroitelnyh-konstruktsiy-zdaniy>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
5. Caelen, J. Producing and organizing phonetic knowledge from acoustics facts in multi-level data-information / J. Caelen and N. Vigouroux // ICASSP'86. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Tokyo, Japan, 1986. – Tokyo, Japan, 1986. – P. 1209–1212. – DOI: 10.1109/ICASSP.1986.1168802.
6. Tang, Z. Improving Reverberant Speech Training Using Diffuse Acoustic Simulation / Z. Tang, L. Chen, B. Wu, D. Yu and D. Manocha // ICASSP 2020 – 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Barcelona, Spain, 2020. – Barcelona, Spain, 2020. – P. 6969–6973. – DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9052932.
7. Li, F. F. Intelligent and adaptive acoustics in buildings via blind room acoustic parameter estimation / F. F. Li // 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Chengdu, China, 2010. – Chengdu, China, 2010. – P. V3-663–V3-666. – DOI: 10.1109/ICCET.2010.5485761.
8. Huang, W. Collaborating Ray Tracing and AI Model for AUV-Assisted 3-D Underwater Sound-Speed Inversion / W. Huang et al. // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – Oct. 2021. – Vol. 46, № 4. – P. 1372–1390. – DOI: 10.1109/JOE.2021.3066780.
9. Петров, П. С. Математическое моделирование горизонтальной рефракции звука в трехмерных волноводах мелкого моря : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / П. С. Петров. – Владивосток, 2020. – Режим доступа: [https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/users/dissertation/2020/Petrov/thesis\\_sign.pdf](https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/users/dissertation/2020/Petrov/thesis_sign.pdf), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
10. Кузнецова, А. И. Методы моделирования акустического пространства оперных театров / А. И. Кузнецова // Вестник Академии русского балета им. А. Я. Вагановой. – 2018. – № 1 (54). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-modelirovaniya-akusticheskogo-prostranstva-opernyh-teatrov>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
11. Ефимов, А. П. Три взгляда на акустику помещений / А. П. Ефимов // Install-pro. – 2000. – № 3–7. – Режим доступа: <http://rusarch.ru/efimov1.htm>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. Алдошина, И. А. Электроакустика и звуковое вещание : учебное пособие для вузов / И. А. Алдошина, Э. И. Володин, А. П. Ефимов и др. – Москва : Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.
13. Луговец, А. А. Сравнительные характеристики современных потолочных акустических материалов, применяемых для отделки помещений ресторанов / А. А. Луговец // Современное строительство : сборник статей магистрантов и аспирантов. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГАСУ, 2001. – Т. 2, вып. 2. – С. 269–277.
14. Зацепин, А. Ф. Акустический контроль : в 2 ч. Ч. 2. Физические основы ультразвуковой дефектometрии : учебное пособие / А. Ф. Зацепин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 117 с.

15. John Amanatides. Ray tracing with cones / John Amanatides // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. – 1984. – № 18 (3). – P. 129–135.
16. Qin, H. Cone Tracing for Furry Object Rendering / H. Qin, M. Chai, Q. Hou, Z. Ren, K. Zhou // IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. – 2014 Aug. – № 20 (8). – P. 1178–1188.
17. Samuel, Siltanen. Room acoustics modeling with acoustic radiance transfer / Samuel Siltanen, Tapio Lokki, and Lauri Savioja // Proc. ISRA Melbourne. – 2010.
18. Beamer IV, C. W. Radiant exchange in partially specular architectural environments / C. W. Beamer IV and R. T. Muehleisen // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2003. – № 114 (4). – P. 2411.
19. Вахитов, Ш. Я. Модификация метода мнимых источников с целью моделирования реального процесса первых отражений в помещении / Ш. Я. Вахитов, Д. А. Давыдов, В. М. Алешкин // Academia. Архитектура и строительство. – 2017. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-metoda-mnimykh-istochnikov-s-tselyu-modeirovaniya-realnogo-protsesta-pervykh-otrazheniy-v-pomeschenii>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
20. Chusov, A. Parallel acoustic field simulation with respect to scattering of sound on local inhomogeneities / A. Chusov, L. Statsenko, A. Lysenko, S. Kuligin, N. Cherkassova, P. Unru, M. Bernavskaya // Procedia Computer Science, 2017. Workshop on Large Scale Computational Physics (LSCP), ICCS 2017. – 2017.
21. Chusov, A. A parallel algorithmic approach to simulate acoustical fields with respect to scattering of sound due to reflections / A. Chusov, A. Lysenko, L. Statsenko, S. Kuligin, P. Unru, A. Rodionov. – 2016. – P. 728–732. 10.1109/PIC.2016.7949594.

### References

1. Shchirzheckiy, H. A., Sukhov, V. N., Shchirzheckiy, A. H., Alyoshkin, V. M. K probleme akusticheskogo proektirovaniya sovremennykh zalov mnogotselovogo naznacheniya [To the problem of acoustic design of modern multi-purpose halls]. *Zhilyshhnoye stroitelstvo* [Housing construction], 2019, no. 7. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme-akusticheskogo-proektirovaniya-sovremennykh-zalov-mnogotselovogo-naznacheniya>
2. Solovev, A. K., Solovev, K. A., Burlyayev, I. N. Novye arhitekturno-konstruktivnye resheniya s uchytom estestvennoy akustiki pri rekonstruktsii i stroitelstve pravoslavnykh khramov [New architectural and structural solutions taking into account natural acoustics in the reconstruction and construction of Orthodox churches]. *AMIT* [AMIT], 2017, no. 3 (40). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-arhitekturno-konstruktivnye-resheniya-s-uchytom-estestvennoy-akustiki-pri-rekonstruktsii-i-stroitelstve-pravoslavnykh-hramov>
3. Summers, J., Torres, R., Shimizu, Y. Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, vol. 116, pp. 958–969.
4. Velichkin, V. Z., Soldatenko, T. N. Model intellektualnoy podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu sostoyaniem stroitelnykh konstruktsey zdaniy [Model of intelligent decision support for managing the state of building structures]. *Magazine of Civil Engineering*, 2012, no. 3 (29). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-intellektualnoy-podderzhki-prinyatiya-resheniy-po-upravleniyu-sostoyaniem-stroitelnykh-konstruktsey-zdaniy>.
5. Caelen, J. and Vigouroux, N. Producing and organizing phonetic knowledge from acoustics facts in multi-level data-information. *ICASSP '86. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Tokyo, Japan, 1986*. Tokyo, Japan, 1986, pp. 1209–1212. DOI: 10.1109/ICASSP.1986.1168802.
6. Tang, Z., Chen, L., Wu, B., Yu, D. and Manocha, D. Improving Reverberant Speech Training Using Diffuse Acoustic Simulation. *ICASSP 2020 – 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Barcelona, Spain, 2020*. Barcelona, Spain, 2020, pp. 6969–6973. DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9052932.
7. Li, F. F. Intelligent and adaptive acoustics in buildings via blind room acoustic parameter estimation. *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Chengdu, China, 2010*. Chengdu, China, 2010, pp. V3-663–V3-666. DOI: 10.1109/ICCET.2010.5485761.
8. Huang, W. et al. Collaborating Ray Tracing and AI Model for AUV-Assisted 3-D Underwater Sound-Speed Inversion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Oct. 2021, vol. 46, no. 4, pp. 1372–1390. DOI: 10.1109/JOE.2021.3066780.
9. Petrov, P. S. *Matematicheskoe modelirovanie gorizontальной refraktsii zvuka v trekhmernykh volnovodakh melkogo morya* [Mathematical modeling of horizontal sound refraction in three-dimensional shallow sea waveguides]. Vladivostok, 2020. Available at: [https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/users/dissertation/2020/Petrov/thesis\\_sign.pdf](https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/users/dissertation/2020/Petrov/thesis_sign.pdf).
10. Kuznetsova, A. I. Metody modelirovaniya akusticheskogo prostranstva opernykh teatrov [Methods for modeling the acoustic space of opera theaters]. *Vestnik Akademii russkogo baleta imeni A. Ya. Vaganovoy* [Bulletin of the Academy of Russian Ballet named after A. Ya. Vaganova], 2018, no. 1 (54). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-modelirovaniya-akusticheskogo-prostranstva-opernykh-teatrov>
11. Efimov, A. P. Tri vzglyada na akustiku pomescheniy [Three views on room acoustics]. *Install-pro*, 2000, no. 3–7. Available at: <http://rusarch.ru/efimov1.htm>.
12. Aldoshina, I. A., Vologdin, Ye. I., Efimov, A. P. *Elektroakustika i zvukovoe veshchanie : uchebnoe posobie dlja vuzov* [Electroacoustics and sound broadcasting : textbook for universities]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, Radio i svyaz Publ., 2007. 872 p.
13. Lugovets, A. A. Sravnitelnye kharakteristiki sovremennykh potolochnykh akusticheskikh materialov, primenyayemykh dlya otdelki pomescheniy restoranov [Comparative characteristics of modern ceiling acoustic materials used for decorating the premises of restaurants]. *Sovremennoye stroitelstvo : sbornik statey magistrantov i aspirantov* [Modern construction : a collection of articles of undergraduates and graduate students]. St. Petersburg, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 269–277.
14. Zatsepin, A. F. *Akusticheskiy kontrol. Tom 2. Fizicheskie osnovy ultrazvukovoy defektometrii : uchebnoe posobie* [Acoustic control. Vol. 2. Physical bases of ultrasonic defectometry : textbook]. Ekaterinburg, 2006. 117 p.
15. John, Amanatides. Ray tracing with cones. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1984, no. 18 (3), pp. 129–135.

16. Qin, H., Chai, M., Hou, Q., Ren, Z., Zhou, K. Cone Tracing for Furry Object Rendering. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 2014 Aug, no. 20 (8), pp. 1178–1188.
17. Samuel, Siltanen, Tapio, Lokki, and Lauri, Savioja. Room acoustics modeling with acoustic radiance transfer. *Proc. ISRA Melbourne*, 2010.
18. Beamer IV, C. W. and Muehleisen, R. T. Radiant exchange in partially specular architectural environments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, no. 114 (4), p. 2411.
19. Vakhitov, Sh. Ya., Davydov, D. A., Aleshkin, V. M. Modifikatsiya metoda mnimyykh istochnikov s tselyu modelirovaniya realnogo protsessa pervykh otrazheniy v pomeshchenii [Modification of the method of imaginary sources in order to simulate the real process of first reflections in a room]. *Akademia. Arkhitektura i stroitelstvo* [Academia. Architecture and Construction], 2017, no. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-metoda-mnimyyh-istochnikov-s-tselyu-modelirovaniya-realnogo-protsess-pervykh-otrazheniy-v-pomeshchenii>.
20. Chusov, A., Statsenko, L., Lysenko, A., Kuligin, S., Cherkassova, N., Unru, P., Bernavskaya, M. Parallel acoustic field simulation with respect to scattering of sound on local inhomogeneities. *Procedia Computer Science*, 2017. *Workshop on Large Scale Computational Physics (LSCP), ICCS, 2017*, 2017.
21. Chusov, A., Lysenko, A., Statsenko, L., Kuligin, S., Unru, P., Rodionov, A. *A parallel algorithmic approach to simulate acoustical fields with respect to scattering of sound due to reflections*, 2016, pp. 728–732. 10.1109/PIC.2016.7949594.

УДК 004.41

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛА РАСПОЗНАВАНИЯ СИМВОЛОВ НА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ДИСПЛЕЕ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО НЕЙРОНА**

*Статья поступила в редакцию 16.01.2023, в окончательном варианте – 27.01.2023.*

**Шуршев Тимофей Валерьевич**, МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Российская Федерация, г. Москва, пр-т Вернадского, 78,  
студент, ORCID: 0000-0002-2814-3201, e-mail: t.shurshev2002@gmail.com

**Гайрабекова Тамара Израиловна**, Чеченский государственный университет им. А.А. Кадыева, 364093, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. Шерипова, 32,

кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Прикладная математика и компьютерные технологии», ORCID: 0000-0003-0046-6188, e-mail: Sti\_ing@mail.ru

Представлено моделирование узла распознавания символов на жидкокристаллическом дисплее с использованием нейронной сети. Для создания нейронной сети использован язык высокого уровня Verilog. Для работы с языком описания аппаратуры, разработки RTL-моделей использовано специализированное программное обеспечение САПР Xilinx ISE. Для решения данной задачи предложена нейронная сеть, представленная моделью искусственного нейрона. Разработана процедура, в которой переменные, умноженные на коэффициент, складываются, а итоговая сумма является выходом функции. Итоговая сумма для каждого символа при этом будет разной, и этим можно будет отличить один символ от другого. В рамках разработанной нейронной сети реализована функция активации, которая выводит номер символа в сгенерированном алфавите всех используемых символов на низком уровне, а на верхнем уровне – вывод символа, который предсказывает нейронная сеть. На первом этапе моделирования была составлена системная модель, которая сначала была обучена на основе наборов переменных и того факта, что выходы функции для каждого из набора должны отличаться. Предложено преобразовать входные данные: пусть в случае прихода 0 он будет заменён значением –1. Нейронная сеть была реализована на Python, высокоуровневом языке программирования. В нейронную сеть также входит тестовая модель, где был осуществлен прогон всех наборов переменных через функцию. Функция активации определяет, какая итоговая сумма соответствует определённому значению и выдает свое предположение. Было проведено обучение сети на конкретной обучающей выборке. Было произведено тестирование. В ходе работы тестового модуля была сформирована временная диаграмма, зубцы которой показывают предсказания номера символа с LCD-дисплея в сгенерированном алфавите. Тестовый модуль разработан на языке Verilog.

**Ключевые слова:** моделирование, жидкокристаллический дисплей, искусственный нейрон, нейронная сеть, модель, тестирование

### **SIMULATION OF CHARACTER RECOGNITION ASSEMBLY ON LIQUID CRYSTAL DISPLAY USING ARTIFICIAL NEURON MODEL**

*The article was received by the editorial board on 16.01.2023, in the final version – 27.01.2023.*

**Shurshev Timofey V.**, MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation,  
student, ORCID: 0000-0002-2814-3201, e-mail: t.shurshev2002@gmail.com

**Gairabekova Tamara I.**, Chechen State University named after A.A. Kadyrov, 32 Sheripova St., Grozny, 364093, Chechen Republic,

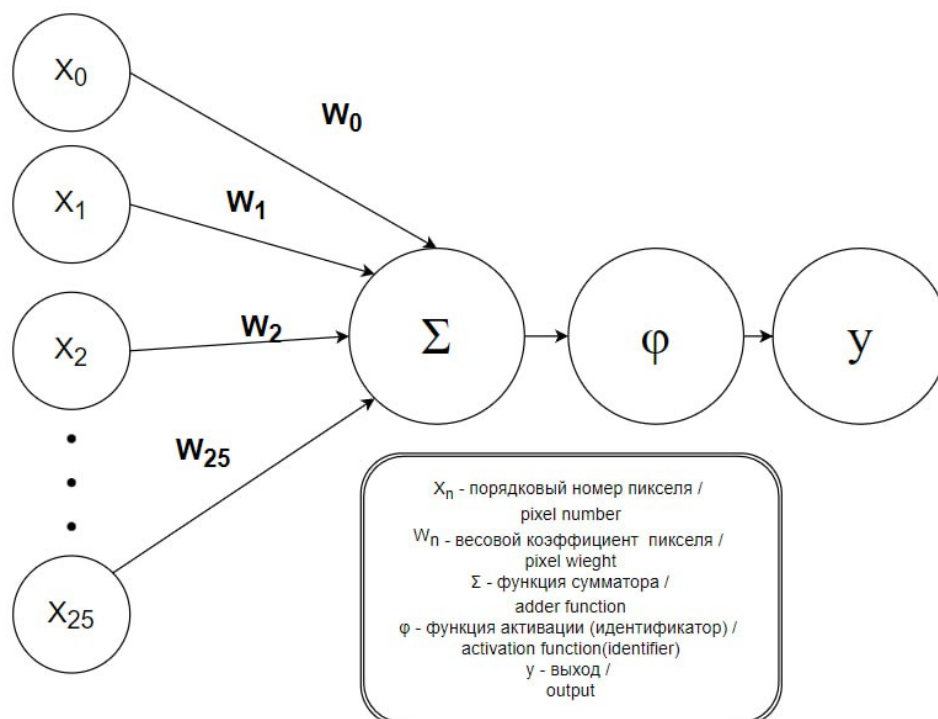
Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Applied Mathematics and Computer Technology, ORCID: 0000-0003-0046-6188, e-mail: Sti\_ing@mail.ru



A simulation of a character recognition node on a liquid crystal display using a neural network is presented. A high-level Verilog language was used to create a neural network. Specialized CAD software Xilinx ISE was used to work with the hardware description language and to develop RTL models. To solve this problem, a neural network is proposed, represented by an artificial neuron model. A procedure has been developed in which variables multiplied by a coefficient are added together, and the final sum is the output of the function. The total amount for each symbol will be different, and this will be possible to distinguish one symbol from another. Within the framework of the developed neural network, an activation function is implemented that outputs the symbol number in the generated alphabet of all the symbols used at the low level, and at the upper level - the output of the symbol that the neural network predicts. At the first stage of modeling, a system model was compiled, which was first trained based on sets of variables and the fact that the outputs of the function for each of the set should be different. It is proposed to transform the input data: let it be replaced with the value -1 in case of arrival of 0. The neural network was implemented in Python, a high-level programming language. The neural network also includes a test model, where all sets of variables were run through the function. The activation function determines which total amount corresponds to a certain value and gives its guess. The network was trained on a specific training sample. Testing was performed. During the operation of the test module, a time diagram was formed, the teeth of which show the predictions of the symbol number from the LCD display in the generated alphabet. The test module is developed in the Verilog language.

**Keywords:** modeling, liquid crystal display, artificial neuron, neural network, model, testing

#### Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Жидкокристаллические дисплеи (LCD (англ. *liquid crystal display*)), способные выводить как один, так и несколько цветов, используются для вывода графической и текстовой информации на многих электронных устройствах. Как правило, жидкокристаллический дисплей размерностью 5x5 монохромен (может выводить только один определенный цвет, который определяется при изготовлении) и располагает ровно двадцатью пятью пикселями.

Нейронная сеть – в узком смысле это частный случай методов распознавания образов, сеть, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей. Использование нейронных сетей помогает оптимизировать и решать невыполнимые до этого задачи [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Одним из основных понятий в теории нейронных сетей является искусственный нейрон. Искусственный нейрон – математическая модель нейронной сети, основан на принципе функционирования естественного нейрона живого организма. Принцип работы заключен в том, что на входы подаются некоторые значения, представленные в данном случае состоянием пикселя, которые умножаются на весовые коэффициенты, полученные в результате обучения нейрона, после чего эти значения передаются на сумматор, который подаёт на свой выход сумму этих произведений. На выходе формируется функция активации, необходимая для определения зависимости между значением на выходе сумматора, которое называется взвешенной суммой, и выходом нейрона. Существует тенденция, согласно которой выбирают дифференцируемую функцию активации, для оптимизации задачи обучения весовых коэффициентов.



Обычно для построения нетребовательных нейронных сетей используются инструменты верхнего уровня, такие как Python [8, 11], но проблема этой задачи в том, что для работы с сигналами с жидкокристаллического дисплея необходимо создать нейронную сеть, основываясь на инструментах низкого уровня. Нейронная сеть может быть построена на базе программируемой логической интегральной схемы, где внутренняя логика не определяется при изготовлении, а может быть задана с помощью программирования интегральной схемы. Такие нейронные сети могут быть отдельными модулями на тех же программируемых логических интегральных схемах и работать вместе с другими модулями. Таким образом, может быть ускорена работа устройства. Для программирования программируемой логической интегральной схемы используются языки описания аппаратуры, например VHDL или Verilog [9].

**Программные и аппаратные средства.** Для создания нейронной сети был использован язык высокого уровня Verilog. Для работы с языком описания аппаратуры было использовано специализированное программное обеспечение САПР Xilinx ISE, помогающее с анализом и синтезом языков описания аппаратуры.

**Альтернативный вариант.** Обычно для работы какого-либо модуля требуется сконструировать несколько других вспомогательных [10], однако в при реализации поставленной задачи понадобится только делитель частоты.

Важно понимать то, какая информация приходит в модуль – это упорядоченный набор из 25 двоичных переменных. Переменная принимает значение 1, если пиксель светится, и значение 0 – в противном случае. Эти данные приходят от других модулей, которые определяют состояние «горит» / «не горит» (эти модули не будут описаны в данной работе). Нужно определить с помощью этих наборов, какой символ (число, буква и т.д.) высветился на жидкокристаллическом дисплее, т.е. тридцать шесть наборов нужно сопоставить с нужными значениями. Для этой цели возможно использовать постоянное запоминающее устройство, которое может хранить нужное значение в ячейке, адрес которой представлен в виде набора из двадцати пяти двоичных переменных, приходящих в модуль, или использовать дешифратор.

**Пример:** На дисплее загорается цифра «2», приходит значение

[1, 1, 1, 1, 0,  
0, 0, 0, 0, 1,  
0, 1, 1, 1, 0,  
1, 0, 0, 0, 0,  
1, 1, 1, 1, 1],

которое соответствует значению «2» на дисплее, и для него выдается код, идентифицирующий цифру 2 в двоичной системе.

Если сопоставить приходящее значение и вид символа «2» на дисплее (рис. 1), возможно наглядно увидеть взаимосвязь между сигналом со значением «1» и горящим пикселем.

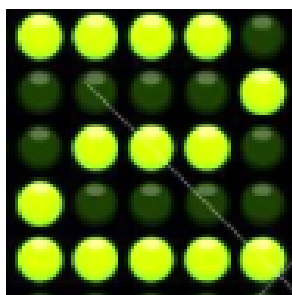


Рисунок 1 – Вид символа на LCD-дисплее

Однако использовать столь большое пространство постоянного запоминающего устройства для такой задачи нецелесообразно. Поэтому для решения этой задачи используется нейронная сеть, представленная моделью искусственного нейрона.

**Процедура моделирования.** Предложена процедура (рис. 2), в которой переменные ( $x$ ), умноженные на коэффициент ( $W$ ), будут складываться ( $\Sigma$ ), а итоговая сумма будет являться выходом функции. Итоговая сумма для каждого символа будет разной, и этим можно будет отличить один символ от другого. В рамках разработанной нейронной сети реализована функция активации ( $\phi$ ), которая выводит ( $y$ ) номер символа в сгенерированном алфавите всех используемых символов на низком уровне, а на верхнем уровне выводится символ, который предсказывает нейронная сеть. Алфавит представлен цифрами, идущими в порядке возрастания, после которых идет классический английский алфавит, т.е. от «0» до «9», а после – от «A» до «Z».



```

Число 21: [1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1].
Предположение: L
Число 22: [1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1].
Предположение: M
Число 23: [1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1].
Предположение: N
Число 24: [0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0].
Предположение: O
Число 25: [1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0].
Предположение: P
Число 26: [0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1].
Предположение: Q
Число 27: [1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1].
Предположение: R
Число 28: [0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0].
Предположение: S
Число 29: [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0].
Предположение: T
Число 30: [1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0].
Предположение: U
Число 31: [1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0].
Предположение: V
Число 32: [1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1].
Предположение: W
Число 33: [1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0].
Предположение: X
Число 34: [1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0].
Предположение: Y
Число 35: [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1].
Предположение: Z
    
```

Рисунок 4 – Результат тестирования

После того как нейронная сеть обучилась, было проведено обучение сети, чтобы выявить ошибки переобучения, при которой точность прогноза велика на конкретной обучающей выборке и существенно уменьшается на дополнительных тестовых данных. Но учитывая тот факт, что каждый класс представлен ровно одним экземпляром, после обучения сети на всех классах возможна ситуация, при которой ошибки переобучения не будут получены, поэтому нужно перенести функцию и полученные значения коэффициентов и итоговых сумм на программируемую логическую интегральную схему. Модуль на программируемой логической интегральной схеме представлен в виде комбинационной схемы, в процессе которой будут происходить операции умножения и сложения, а также постоянное запоминающее устройство, на которое будут подаваться выходы комбинационной схемы и будет выходить номер символа в сгенерированном алфавите.

Согласно логике работы системной модели нейронная сеть была описана в САПР Xilinx на языке описания аппаратуры Verilog. В основном модуле – модуле нейронной сети – записаны встроенные коэффициенты для распознавания символов и букв английского алфавита в верхнем регистре, также в него встроен набор из 36 параметризованных нейронов с необходимой настройкой (разрядность коэффициентов 25) и из параметризованного приоритетного шифратора с необходимой настройкой. Нейроны обрабатывают входные данные, после чего шифратор переводит в код (в данном случае 8-разрядный) данные срабатывания, полученные с нейронов. Помимо кода, шифратор также выводит сигнал, сообщающий о том, распознала ли нейронная сеть данные.

Основная сложность при переносе заключается в работе с представлениями чисел. Так как наша системная модель не имеет представлений в виде чисел с плавающей запятой (дробей), то можно смело отказаться от работы с мантиссой. Для оптимизации и удобства расчетов все расчеты будут делаться в неотрицательном виде представления, то есть не будут задействованы ни обратный, ни дополнительный код – только прямой. Но для реализации такого подхода нужно убедиться, что при переносе минимального отрицательного числа, получаемого в виде результата или промежуточных значений на аккумуляторе, не будет увеличивать разрядность представления чисел.

В данном проекте были реализованы 3 модуля, каждый из которых выполняет свою определенную задачу. Самый низкий модуль называется “Neuron” и симулирует работу нейрона, внутри которого происходят все расчеты. Средний модуль, по своей сути являющийся главным, синтезирует модули “Neuron”, в которые передает значения с жидкокристаллического дисплея и значения для идентификации, на выходе получает номер символа в сгенерированном алфавите. Самый высокий модуль является модулем UUT-тестирования, в нем создается среда, в которой будет симулироваться работа нашего

устройства. Само тестирование представляет из себя описание состояний, приходящих на устройство, и временных задержек между ними.

При работе в САПР Xilinx ISE была получена RTL-модель, которая показывает работу узлов между собой и то, как будет выглядеть верхний уровень. Входы и выходы объединяются в модули, модули в устройство, это и есть RTL-модель. Фрагмент RTL-модели модуля нейронной сети представлен на рисунке 5.

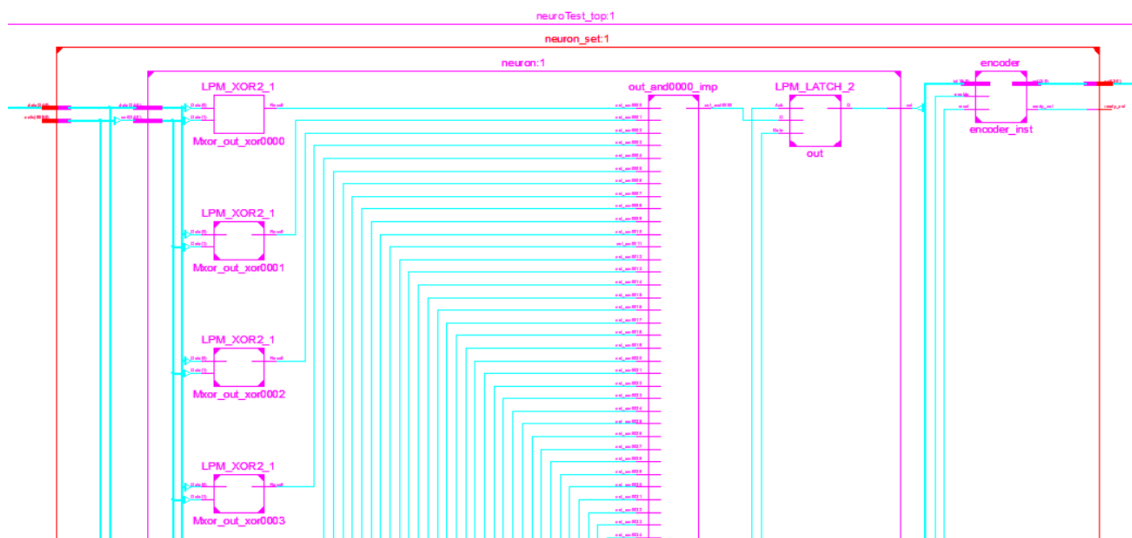


Рисунок 5 – Фрагмент RTL-модели модуля нейронной сети

Было произведено тестирование, для которого было сформировано окружение данного модуля, в котором были созданы подаваемые значения, симулирующие значения, приходящие с LCD-дисплея, учитывая каждый требуемый для проверки набор данных.

В ходе работы тестового модуля была сформирована временная диаграмма, зубцы которой показывают предсказания номера символа с LCD-дисплея в сгенерированном алфавите. После каждого предсказания значение сбрасывается, чтобы при идентификации следующего сигнала одновременно не горели несколько значений. В дальнейшем можно будет подать полученные данные на другие модули, логические элементы или ячейки памяти для дальнейших обработок, хранений или передач этой информации.

Результат представлен на временной диаграмме на рисунке 6.

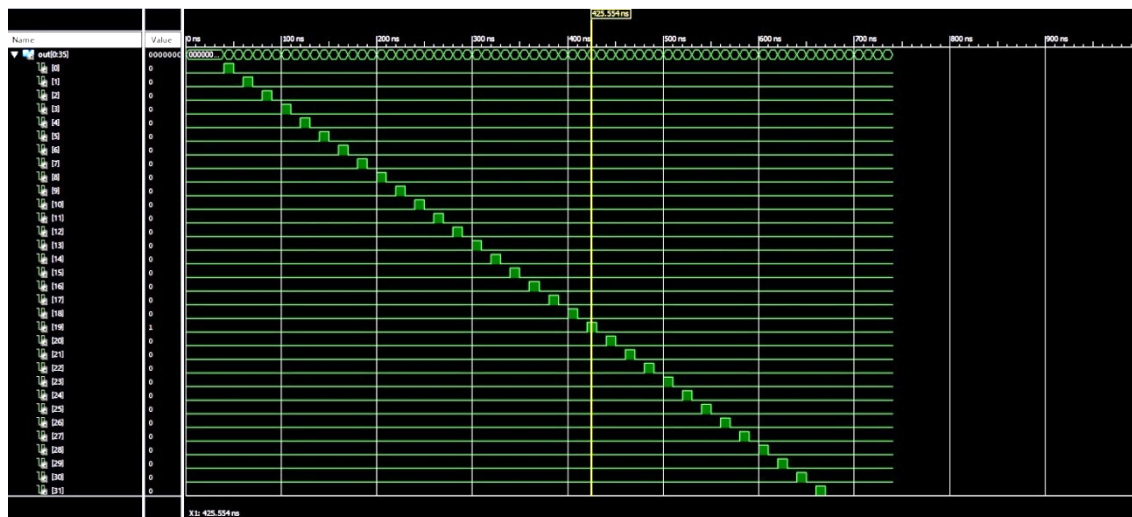


Рисунок 6 – Временная диаграмма работы нейронной сети

**Заключение.** Проведено моделирование функционального узла распознавания символов на LCD-дисплее размером 5x5 на базе программируемой логической интегральной схемы в инструментальной среде разработки программ Xilinx Vivado Design Suite. Построена модель нейронной сети на базе искусственного нейрона на языке высокого уровня Python, обучены весовые коэффициенты этого нейрона. Модель перенесена на язык описания аппаратуры Verilog. Рассмотрены особенности реализации модулей на программируемой логике. Запрограммированный функциональный узел на базе программируемой логической интегральной схемы предназначен для создания конфигурируемых цифровых электронных схем. Разработанный узел может быть использован в программируемой логической интегральной схеме и перенесён на её кристалл, проведено успешное тестирование модулей, составляющих узел управления матричным индикатором.

#### Библиографический список

1. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории / А. И. Галушкин. – Москва : Горячая Линия – Телеком, 2010. – 496 с.
2. Шарипова Д. Д. Нейронная сеть Imageai: распознавание объектов / Д. Д. Шарипова // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2020. – № 2 (11). – С. 140–144.
3. Афонин, В. Л. Нейронная сеть на основе специальной потенциальной функции для распознавания многофункциональных сигналов / В. Л. Афонин, В. В. Слепцов // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 9. – С. 478–483.
4. Иванов, С. А. Модель системы управления комбинированным отоплением теплицы в условиях закрытого грунта на базе микроконтроллера RASPBERRY PI / С. А. Иванов, И. Ю. Квятковская, А. Ф. Дорохов, Н. Д. Шишкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 2. – С. 32–37.
5. Алексеев, П. П. Применение нейронных сетей в системе распознавания промышленных гидробионтов в условиях повышенной флуктуации / П. П. Алексеев, И. Ю. Квятковская // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 2. – С. 76–86.
6. Алексеев, П. П. Применение нейронных сетей для распознавания принципиальных условно-графических электрических обозначений / П. П. Алексеев, И. Ю. Квятковская // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 2. – С. 47–56.
7. Kvyatkovskaya I. Development of a searching algorithm based on neural networks for the optimal university studies schedule / I. Kvyatkovskaya, A. Khasukhadzhiev, T. Magomaev // AIP Conference Proceedings. Ser. "I International Conference ASE-I – 2021: Applied Science and Engineering, ASE-I 2021". – 2021. – P. 040001.
8. Шуршев, Т. В. Способ поабзачного ввода числовых значений в массив в языке программирования PYTHON / Т. В. Шуршев // Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения : материалы Третьей Междунар. молодеж. конф. (Астрахань, 1–5 октября 2019 г.). – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2019.
9. Шуршев, Т. В. Моделирование функционального узла управления матричным индикатором на базе программируемой логической интегральной схемы / Т. В. Шуршев, Е. П. Карлина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 4. – С. 42–47.
10. Шуршев, Т. В. Решение задачи выбора варианта промышленного сооружения при разработке морского нефтегазового месторождения / Т. В. Шуршев // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа : материалы XIII Международной научно-практической конференции. – Астрахань, 2022. – С. 393–395.
11. Шуршев, Т. В. Рекурсивный алгоритм вычисления оценки согласованности экспертов // Технические средства систем управления и связи / Т. В. Шуршев // Технические средства систем управления и связи : материалы Международного научного форума, материалы VI Международной конференции, материалы 15-й Международной конференции. – Астрахань, 2022. – С. 157–159.

#### References

1. Galushkin A. I. *Neyronnye seti. Osnovy teorii* [Neural networks. Fundamentals of the theory]. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom, 2010. 496 p.
2. Sharipova, D. D. *Neyronnaya set Imageai: raspoznavanie obektov* [Neural network Imageai: object recognition]. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya* [Information Technologies. Problems and Solutions], 2020, no. 2 (11), pp. 140–144.
3. Afonin, V. L., Sleptsov, V. V. *Neyronnaya set na osnove spetsialnoy potentsialnoy funktsii dlya raspoznavaniya mnogofunktsionalnykh signalov* [Neural network based on a special potential function for recognition of multifunctional signals]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2021, vol. 27, no. 9, pp. 478–483.
4. Ivanov, S. A., Kvyatkovskaya, I. Yu., Dorokhov, A. F. and Shishkin, N. D. *Model sistemy upravleniya kombinirovannym otopleniem teplitsy v usloviyakh zakrytogo grunta na baze mikrokontrollera RASPBERRY PI* [Model of the control system for greenhouse combined heating in greenhouse conditions based on the RASPBERRY PI microcontroller]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics], 2015, no. 2, pp. 32–37.

5. Alekseev, P. P., Kvyatkovskaya, I. Yu. Primeneniye neyronnykh setey v sisteme raspoznavaniya promyslovyykh gidrobiontov v usloviyakh povyshennoy fluktuatsii [The use of neural networks in the recognition system of commercial aquatic organisms under conditions of increased fluctuation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics], 2022, no. 2, pp. 76–86.
6. Alekseev, P. P., Kvyatkovskaya, I. Yu. Primeneniye neyronnykh setey dlya raspoznavaniya printsipialnykh uslovno-graficheskikh elektricheskikh oboznacheniy [The use of neural networks for recognition of fundamental conditionally graphic electrical designations]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics], 2021, no. 2, pp. 47–56.
7. Kvyatkovskaya, I., Khasukhadzhiev, A., Magomaev, T. Development of a searching algorithm based on neural networks for the optimal university studies schedule. *AIP Conference Proceedings. Ser. "I International Conference ASE-I - 2021: Applied Science and Engineering, ASE-I 2021"*, 2021, p. 040001.
8. Shurshev T. V. Sposob poabzatsnogo vvoda chislovykh znacheniy v massiv v yazyke programmirovaniya PYTHON [A method for paragraph-by-paragraph input of numerical values into an array in the PYTHON programming language]. *Informatsionnye tekhnologii i tekhnologii kommunikatsii: sovremennye dostizheniya: materialy Tret'ey Mezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii (Astrakhan, 1–5 oktyabrya 2019 g.)* [Information technologies and communication technologies: modern achievements: materials of the Third Intern. youth conf. (Astrakhan, October 1–5, 2019) Astrakhan, ASTU Publishing House, 2019.
9. Shurshev, T. V., Karlina, E. P. Modelirovanie funktsionalnogo uzla upravleniya matrichnym indikatorom na baze programmirovemoy logicheskoy integralnoy shemy [Modeling of the functional unit for controlling a matrix indicator based on a programmable logic integrated circuit]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics], 2022, no. 4, pp. 42–47.
10. Shurshev, T. V. Reshenie zadachi vybora varianta promyslovogo sooruzheniya pri razrabotke morskogo neftegazovogo mestorozhdeniya [Solving the problem of choosing a variant of a field facility in the development of an offshore oil and gas field]. *Noveyshie tekhnologii osvoeniya mestorozhdeniy uglevodorodnogo syr'ya i obespechenie bezopasnosti ekosistem Kaspiyskogo shelfa : materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The latest technologies for the development of hydrocarbon deposits and ensuring the safety of the ecosystems of the Caspian shelf : materials of the XIII International Scientific and Practical Conference]. Astrakhan, 2022, pp. 393–395.
11. Shurshev, T. V. Rekursivnyy algoritm vychisleniya otsenki soglasovannosti ekspertov [Recursive Algorithm for Computing Expert Consistency Estimates]. *Tekhnicheskies sredstva sistem upravleniya i svyazi : materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma, materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii, materialy 15-y Mezhdunarodnoy konferentsii* [Technical means of control and communication systems. International Scientific Forum on Control and Engineering : materials of the International Scientific Forum, materials of the VI International Conference, materials of the 15th International Conference]. Astrakhan, 2022, pp. 157–159.

## 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 публикаций 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 страничке 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 10, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисуночных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 8 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:  
ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:  
управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2023  
№ 1 (61)**

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

Издание включено в Интернет-каталог  
ООО «Агентство «Книга-Сервис» 2022/1

**Главный редактор И.М. Ажмухамедов**

Редактирование,  
компьютерная правка, верстка *Н.Н. Сахно*

Дата выхода в свет 20.04.2023 г.

Цена свободная

Уч.-изд. 12,0. Усл. печ. л. 16,8.

Заказ № 4500. Тираж 500 экз. (первый завод – 25 экз.)

---

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
тел. (8512) 24-66-60 (доб. 3; издательско-полиграфический отдел)  
E-mail: asupress@yandex.ru

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